



UNIVERSITY OF HELSINKI

# Galaksien synty ja kehitys

Peter Johansson

Fysiikan laitos, Helsingin yliopisto

---

Tähtitieteellinen yhdistys Ursa yleisöesitelmä  
Helsinki, 19. maaliskuuta , 2013

# Esitelmä tänään

1. Johdatus galaksitutkimukseen. Mitä galaksit ovat ja minkälaisia galakseja on olemassa maailmankaikkeudessa?
2. Kosmologinen standardimalli. Mikä on maailmankaikkeuden koostumus?
3. Galaksien synty standardimallissa. Miten maailmankaikkeuden pienet tiheyshäiriöt syntyivät ja miten galaksit kehittyivät niistä?
4. Minkälaisia olivat maailmankaikkeuden ensimmäiset galaksit ja milloin ne muodostuivat?
5. Galaksien kehitys nykypäivään ja galaksit tänään. Vastaavatko havainnot teoriaa?



# 1. Galaksitutkimus: lyhyt historia

- Läheisimmät ja kirkkaimmat galaksit (esim. Andromeda ja Magellanin pilvet näkyvät hyvin myös paljain silmin ututäplinä.
- 1700-luvun puolessa välissä ranskalainen tähtitieteilijä **Charles Messier** teki kuuluisan **luettelonsa** taivaan utumaisista sumuläiskistä jotka eivät liikkuneet taustataivaan suhteen (eivät siis olleet komeettoja).
- 1847 **Lord Rosse** havaitsi selvää **spiraalirakennetta** kohteessa M51, mutta kohteiden todellinen rakenne oli edelleen tuntematon.
- 1921 käytiin **suuri väittely Shapleyn ja Curtisin** välillä ja muutamaa vuotta myöhemmin **Hubblen havainnot** yksittäisistä muuttuvista tähtistä lähigalakseissa osoitti Curtisin kannan oikeaksi, muut galaksit ovat valtavan isoja ja kaukana olevia itsenäisiä **“Saarimaailmankaikkeuksia”**.



# Galaksin rakenneosat

Koko galaksi sijaitsee suuren **pimeän aineen halon sisällä** joka on  $\sim 100\text{--}200$  kpc kokoinen (galaksi  $\sim 10$  kpc) ja 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 tyypillisesti **vanhoista punertavista tähdistä**.

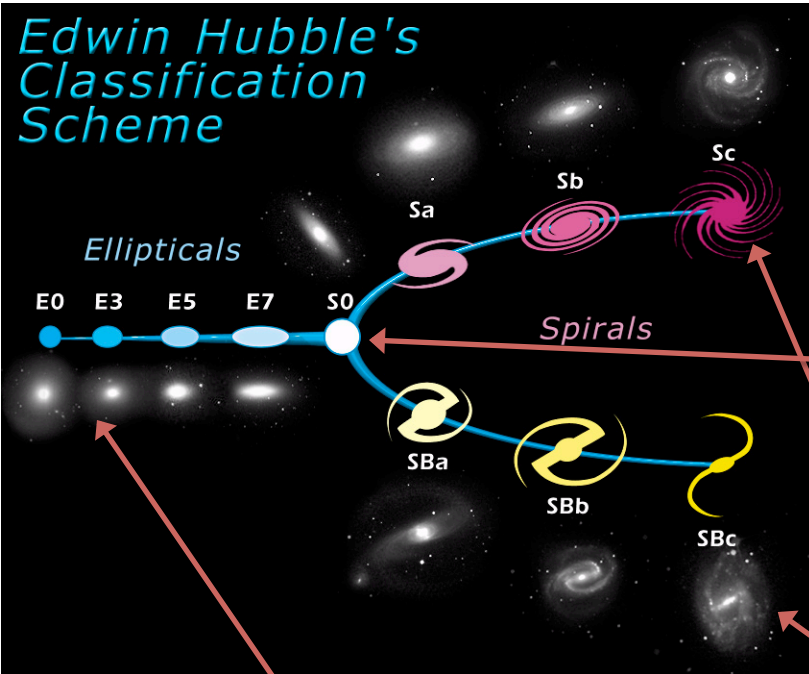
Galaksin **kiekko** on laaja litteä rakennelma, jossa on **runsaasti kaasua ja nuoria tähtiä**.

Galaksin **halossa** on hyvin **vanhoja ja pienen metallipitoisuuden tähtiä** sekä pallomaisia tähti-joukkoja.

Galaksin **ytimestä** löytyy **massiivien musta aukko**, jonka massa korreloi galaksin massan kanssa.



# Hubblen galaksiluokittelu



**Linssimäiset** (S0 galaksit) ovat ellipsien ja spiraalien **välimuotoja**. Ellipsigalaksien tavoin niissä on vähän kaasua ja ei näkyvää spiraalirakennetta. Toisaalta niissä on tähdistä koostuva litteä kiekko.



**Ellipsigalaksit** ovat enemmän tai vähemmän litistyneitä, yleensä **massiivisia tähtijärjestelmiä**, joissa on **vähän kaasua** ja paljon **vanhoja punertavia tähtiä**.



**Spiraaligalakseissa** on kiekko jossa on **selvää spiraalirakennetta** ja E-galakseja muistuttava **keskuspullistuma**. Myös **paljon kaasua ja nuoria tähtiä**, alaluokkana on normaalit ja sauvaspiraalit.

# Galaksiluokittelu jatkoa

- Hubblen galaksiluokittelusta **puuttuvat himmeät ja epä-säännölliset galaksit**, jotka ovat hyvin yleisiä mutta vaikeasti havaittavissa.



**Epäsäännöllisissä galakseissa** ei ole selvää kiekko- tai spiraalirakennetta. Suhteellisesti erittäin paljon kaasua, nuoria tähtiä ja tähtiensyntäalueita (HII-alueita).



**Kääpiöellipseissa** tähtitiheys on paljon pienempi kuin normaaleissa E-galakseissa. Erittäin himmeitä, ja tähtien massan suhde pimeään aineen massaan hyvin pieni.



**Häiriintyneet galaksit** ovat yleensä seurausta kahden galaksin törmäyksestä ja ovat hyvin kirkkaita, varsinkin infrapuna-alueella.





# Galaksien koot ja kirkkaudet

- Lukumäärällisesti suurin osa maailmankaikkeuden galakseista ovat pieniä noin muutaman kiloparsekin kokoisia järjestelmiä ja niiden tyypilliset massat vastaavat noin miljardia Auringon massaa.
- Suurin osa maailmankaikkeuden tähdistä sijaitsevat kuitenkin suurimmissa Linnunradan kokoluokkaa olevissa galakseissa ja näistä tulee myös suurin osa galaksien valosta.

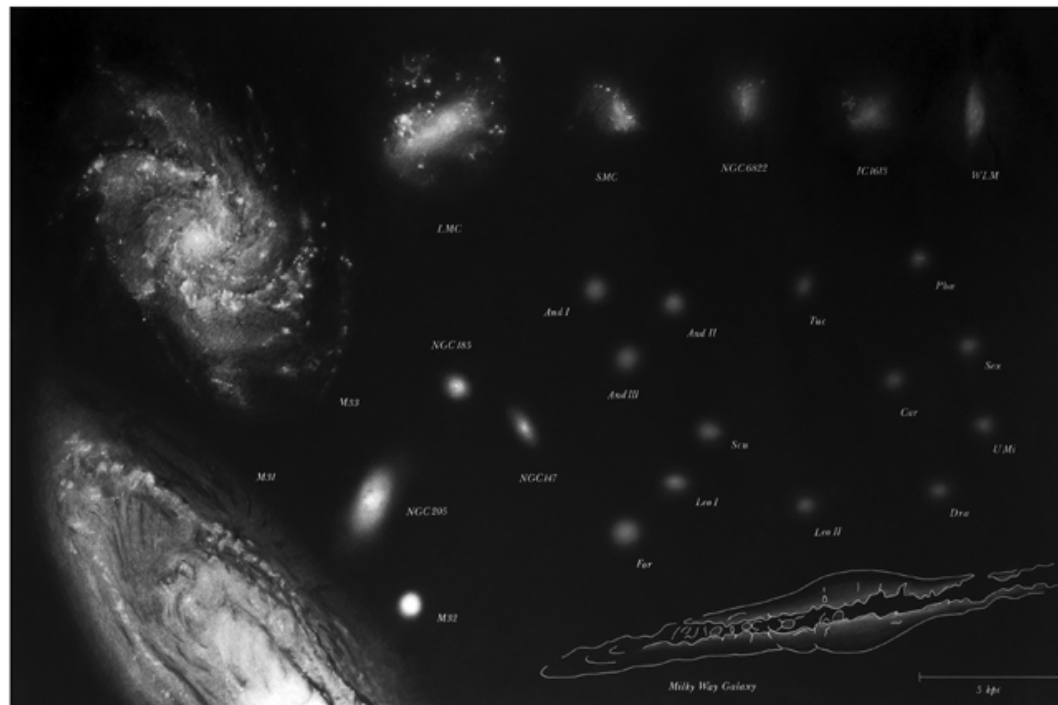


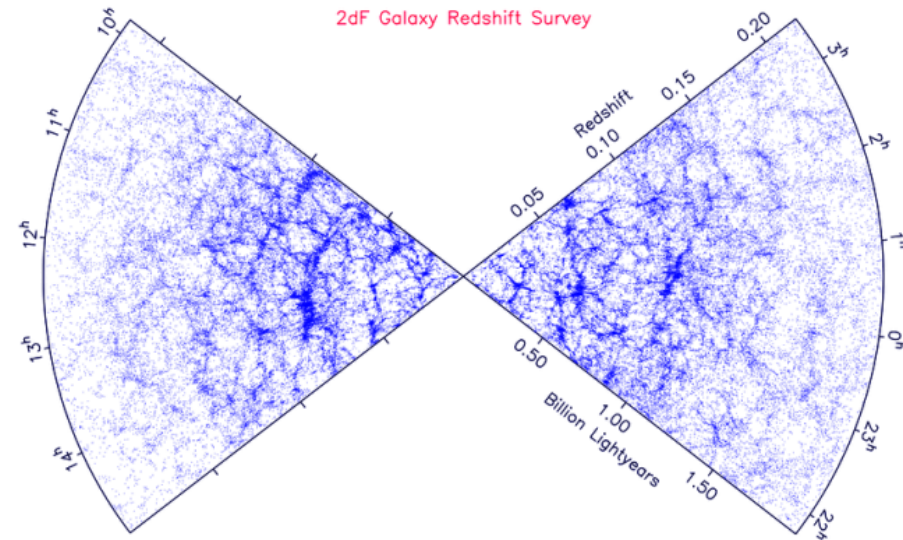
Fig 4.1 (B. Binggeli) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Paikallisessa galaksijoukossa on kolme isompaa galaksia (Andromeda, Linnunrata, M33) ja loput ~40 galaksia ovat epäsäännöllisiä kääpiöitä ja kääpiösferoidealeja.



## 2. Kosmologinen standardmalli: Kosmologinen periaate

- Kosmologinen periaate on hypoteesi, jonka mukaan maailmankaikkeus on hyvin suurilla etäisyyksillä **homogeeninen ja isotrooppinen**.
- Tämä on **yleistys Kopernikaanisesta periaatteesta** jonka mukaan meidän paikkamme maailmankaikkeudessa ei ole mitenkään erityisasemassa.
- Nykyiset kosmologiset mallit perustuvat tähän periaatteeseen ja yleiseen suhteellisuusteoriaan.



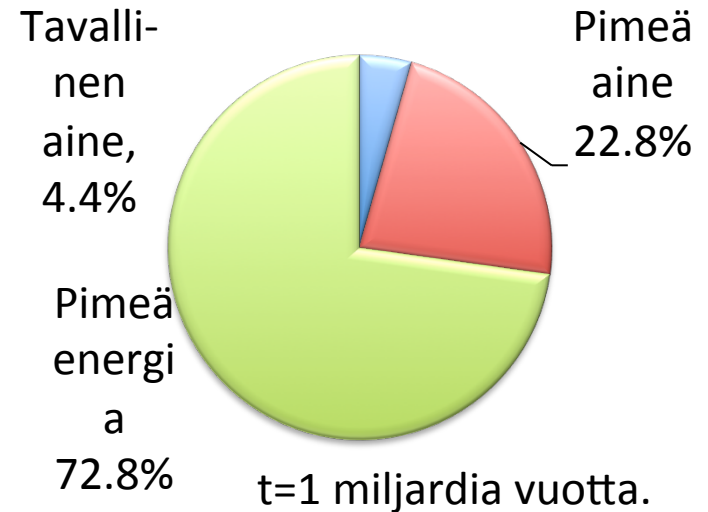
Lähiavaruuden suuren mittakaavan rakennetta, jokainen piste vastaa galaksia.



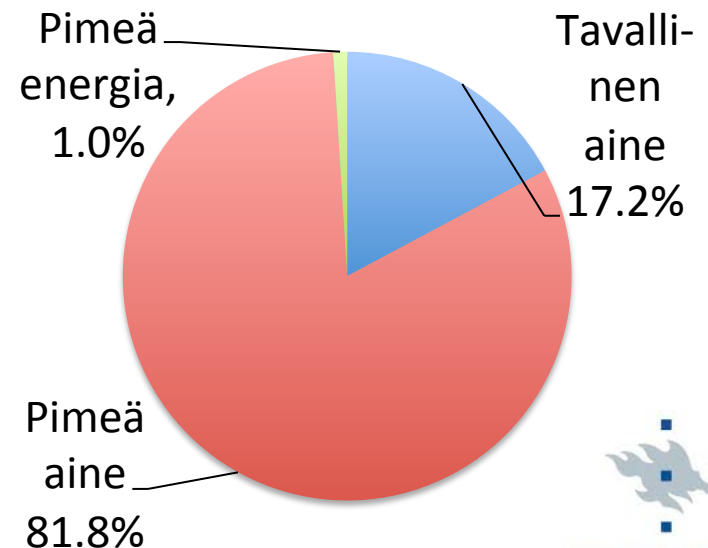
# Maailmankaikkeuden koostumus

- Tänä päivänä maailmankaikkeus koostuu enimmäkseen **pimeästä aineesta (23%) ja pimeästä energiasta (73%)**. Tavallisen aineen (baryonit) osuus on vain 4.4%.
- Pimeä energia on voidaan ymmärtää tyhjiöenergiana joka täyttää koko avaruuden. Sillä on myös hyvin erikoinen ominaisuus, eli **negatiivinen paine**  $\rho = -P$ , joka aiheuttaa avaruuden kiihtyvän laajenemisen.
- Pimeän energian energiatiheys on vakio, tavallisen aineen ja pimeän aineen energiatiheys muuttuu tilavuuden mukaan.

$t = 13.7$  miljardia vuotta (nykypäivä).

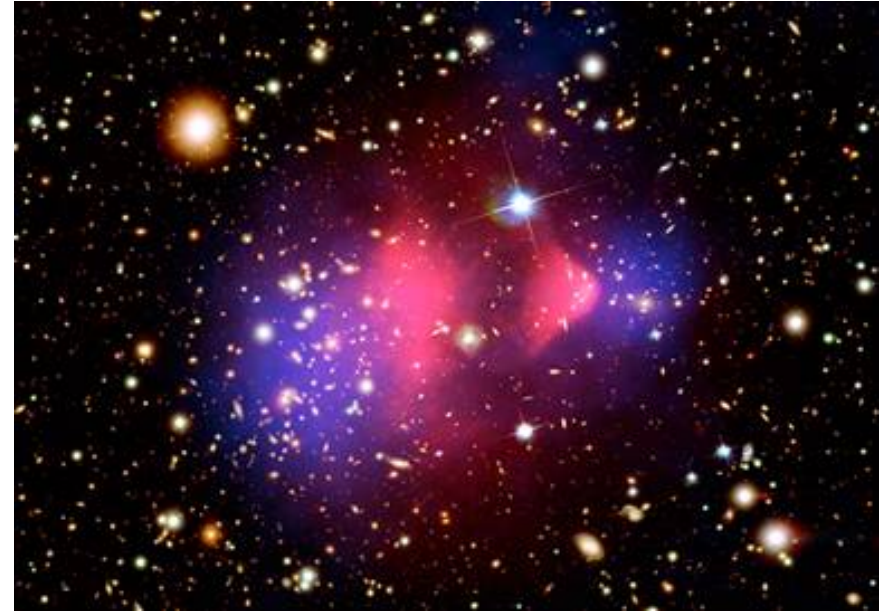


$t = 1$  miljardia vuotta.



# Baryonit ja pimeä aine

- Kaikki tavallinen aine, kuten, planeetat, tähdet, vety jne. koostuvat baryoneista.
- **Baryonit vuorovaikuttavat sähkömagneettisesti** ja voivat täten emittoida ja absorboida valoa.
- **Pimeä aine ei ole baryonista ja ne vuorovaikuttavat ainoastaan painovoiman välityksellä.** Koostuu todennäköisesti eksoottisista hiukkasista, esim. WIMPs.
- Pimeää ainetta voidaan ainoastaan havaita epäsuorasti galaksien liikkeistä.

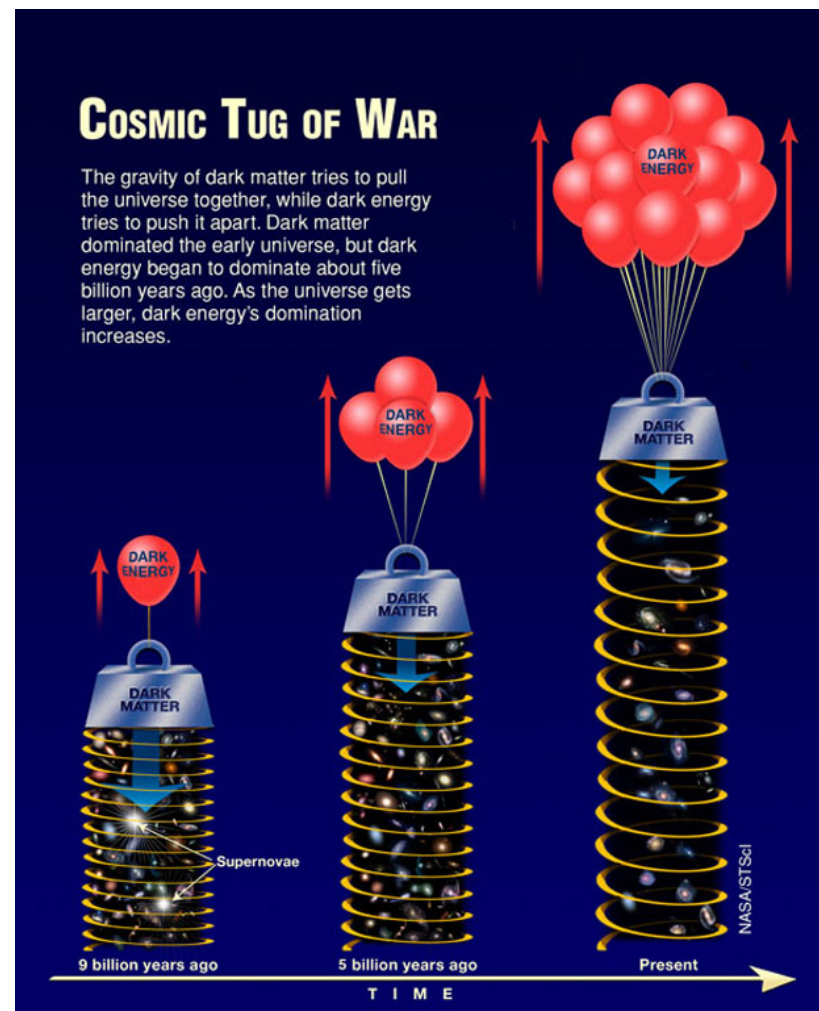


Kahden galaksijoukon välinen törmäys. Punaisella merkitty kaasu törmää ja kuumenee shokissa, mutta pimeä aine joka dominoi painovoimakenttää jatkaa liikettään ja ei vuorovaikuta törmäävän kaasun kanssa.



# Pimeä energia

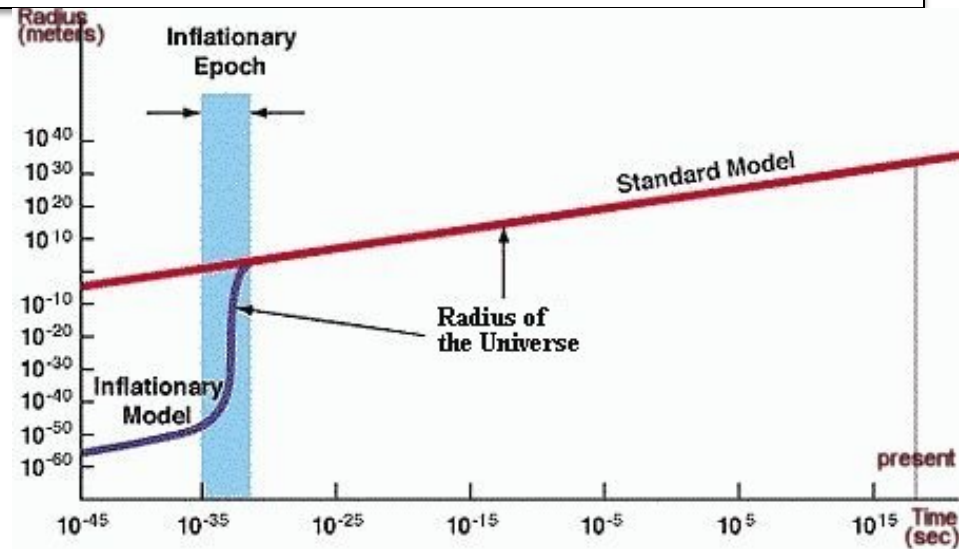
- Pimeä energia on nykyfysiikan suurimpia ongelmia.
- Havaintojen mukaan pimeä energia on tasaisesti jakautunutta ympäri maailmankaikkeuden.
- Kvanttiteoria ennustaa tyhjiökentän olemassaolon, mutta tämän teorian mukainen tyhjiökenttä tulisi olla  $10^{120}$  suurempi kuin havaittu kenttä.
- Pimeän aineen ja pimeän energian tämän hetkinen kosminen energiatiheys on samaa suuruusluokkaa. Onko tämä sattumaa, vai osoitus syvemmästä teoreettisesta yhteydestä?





### 3. Galaksien synty standardimallissa: Häiriöiden synty

- Nykykäsityksen mukaan maailmankaikkeus syntyi hyvin kuumassa alkuräjähdyksessä.
- Inflaatioteorian** mukaan, kun maailmankaikkeuden ikä oli noin  $10^{-35} \text{ s} < t < 10^{-33} \text{ s}$  tapahtui symmetriarikko ja maailmankaikkeus joutui hetkeksi "väärän tyhjiön" tilaan, jolla oli negatiivinen paine.
- Tämä aiheutti maailmankaikkeuden eksponentiaalisen nopean laajentumisen** ja maailmankaikkeuden koko kasvoi noin tekijällä  $10^{28}$ .



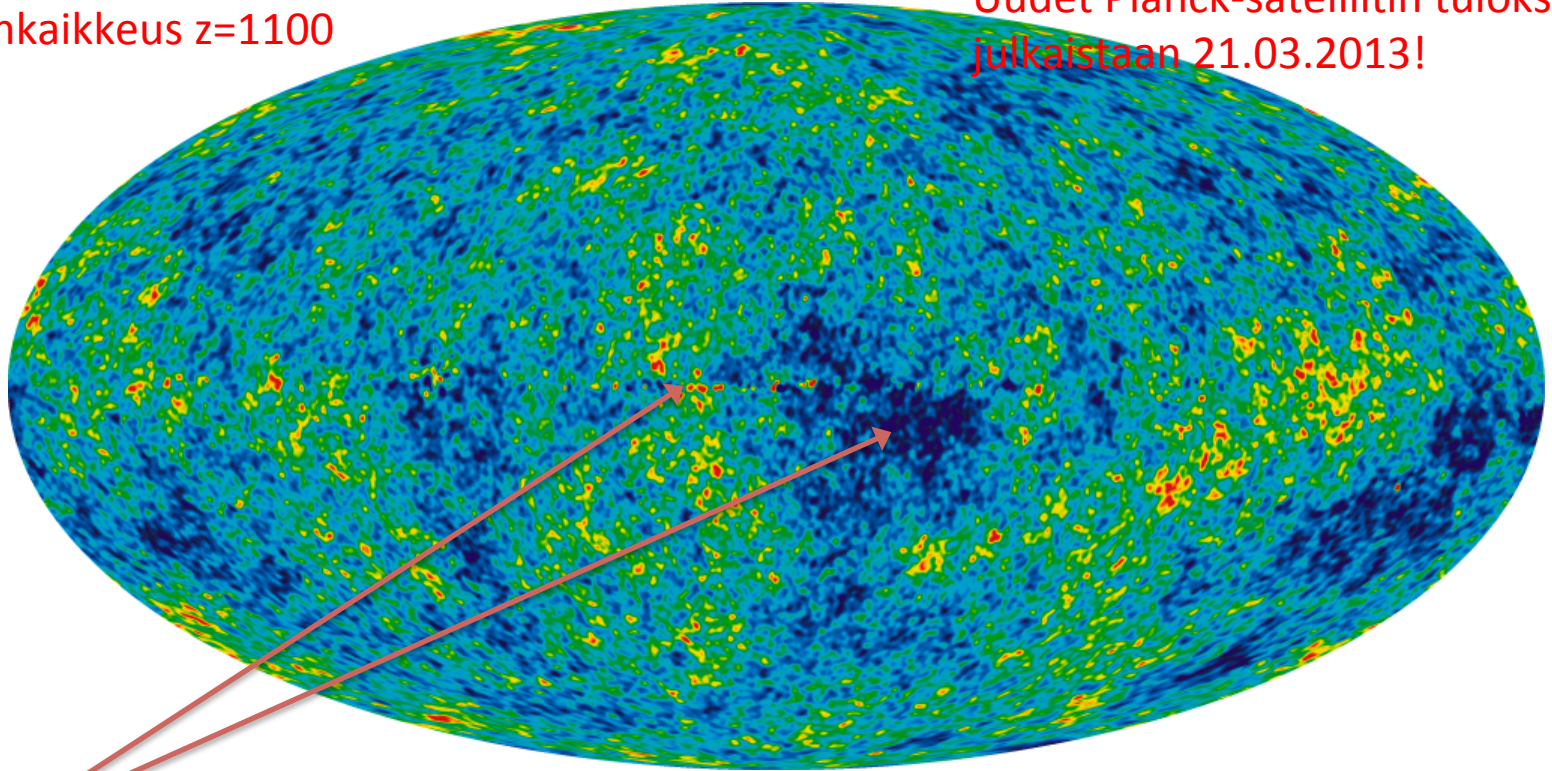
- Inflaatiokentässä tapahtui myös pieniä kvantti-fluktuaatioita, jotka loivat tiheyshäiriöitä, joista galaksit sitten myöhemmin kehittyivät.
- Inflaatioteoria selittää myös maailmankaikkeuden laakeuden ja sen miksi kosminen mikroaaltotaustasäteily on melkein samanlainen kaikissa suunnissa.



# Kosminen taustasäteily – Galaksien synnyn alkuehdot

Maailmankaikkeus  $z=1100$

Uudet Planck-satelliitin tulokset  
julkaistaan 21.03.2013!



$$\frac{T - T_0}{T_0} \sim 10^{-5} \Rightarrow \delta = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \sim 10^{-5}$$

Tänään galakseilla:  $\delta \sim 10^6$   
ja galaksijoukoilla:  $\delta \sim 10^3$

Miten pienistä tiheyshäiriöistä muodostuivat galaksit, joita näemme tänään?



# Pienten häiriöiden kasvu

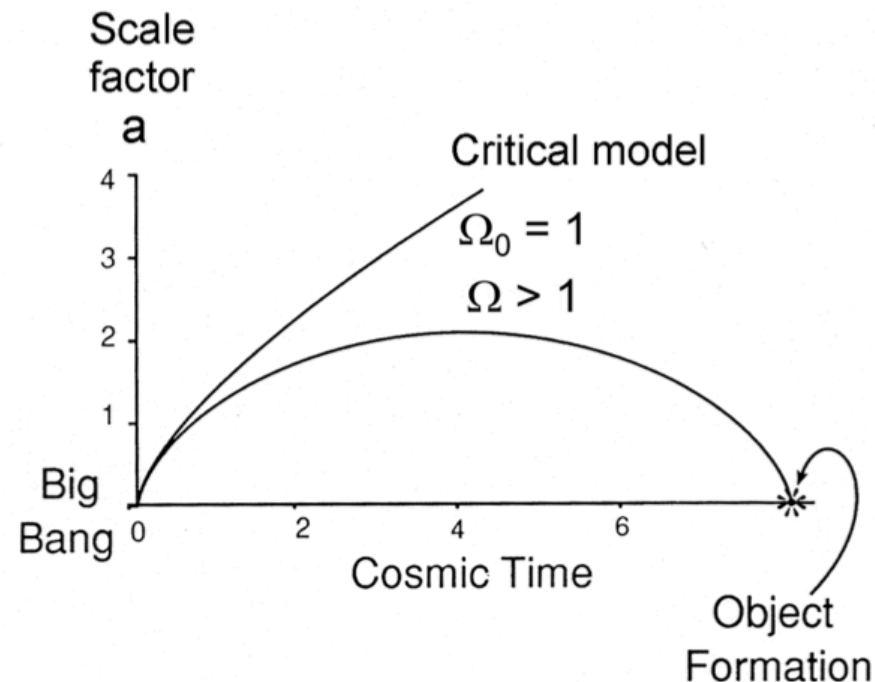
- **Punasiirtymä:** Kuvaa lähetetyn valosignaalin ja vastaanotetun valosignaalin aallonpituuksien suhdetta. Valon aallonpituus punasiirtyy (venyy) maailmankaikkeuden laajetessa. Mikäli kohde on punasiirtymällä  $z=1$  oli maailmankaikkeuden koko  $1/(1+z)=1/2$ , eli puolet tämänhetkisestä koosta, kun valo lähti liikkeelle.
- **Jeansin massa:** Massiivinen kappale voi olla tasapainossa, mikäli kaasun lämmöstä johtuva paine, joka pyrkii hajottamaan pilveä ja kaasun massasta johtuva painovoima, joka pyrkii kutistamaan pilveä ovat tasapainossa. Jeansin massa on raja-arvo, kappaleet jotka ovat yli Jeansin massan eivät voi olla stabiileja ja ne romahtavat kokoon. Suurilla massoilla, painovoima aina lopulta voittaa!
- **Jeansin massa staattisessa avaruudessa:** Mikäli ympäröivä avaruus on staattinen ja ei laajene, voidaan osoittaa että tiheyshäiriöt  $\delta$  kasvavat hyvin nopeasti eksponentiaalisesti  $\rightarrow$  tähtien synty.

**Staattinen ratkaisu - Jeansin yhtälö:**  $\dot{a} = 0 \Rightarrow \delta_{\pm} \propto e^{\pm \sqrt{4\pi G \bar{\rho}} t}$



# Pienten häiriöiden kasvu laajenevassa maailmankaikkeudessa

- **Jeansin massa laajenevassa avaruudessa:** Mikäli ympäröivä avaruus laajenee, kuten on asian laita galaksien synnyn tapauksessa, tiheyshäiriöt kasvavat paljon hitaammin.
- Voidaan osoittaa, että tässä tapauksessa tiheyshäiriöt eivät kasva eksponentiaalisesti, vaan ajan funktiona,  $\delta \propto t^{2/3}$ . Tämä kasvu on myös suoraan verrannollinen punasiirtymään. Eli  $z=1100 \rightarrow z=0$ , häiriön pitäisi kasvaa vain tekijällä 1000.

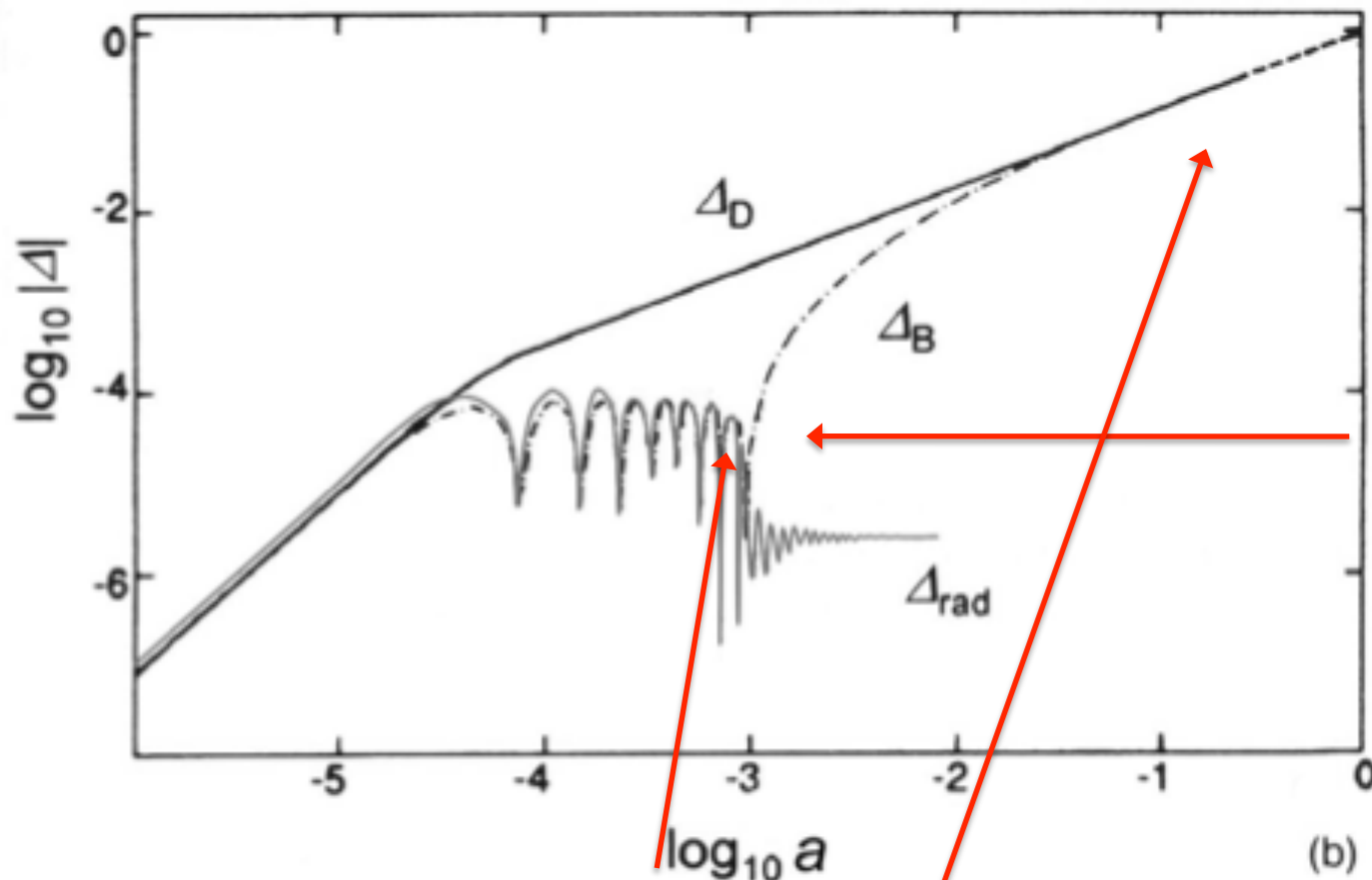


$$\delta_k \propto t^{2/3} \propto a = (1+z)^{-1}$$

Standardimallissa ei ollut riittävästi aikaa tiheyshäiriöiden kasvuille. Galakseja ja meitä ei tulisi olla olemassa!!!

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

# Pimeän aineen vaikutus rakenteen syntymiseen



Kosminen tausta-  
säteily syntyy tässä  
 $a \sim 10^{-3} \rightarrow z \sim 1100$ .

Säteily ja baryoninen aine ovat kytkettynä toisiinsa Thomson-sironnan kautta, häiriöt eivät voi kasvaa,  $M_j \sim 10^{16} M_\odot$ .

Rekombinaation jälkeen  $M_j \sim 10^5 M_\odot$  ja baryonit voivat pudota kylmän pimeän aineen muodostamiin potentiaaliukuoppiin.

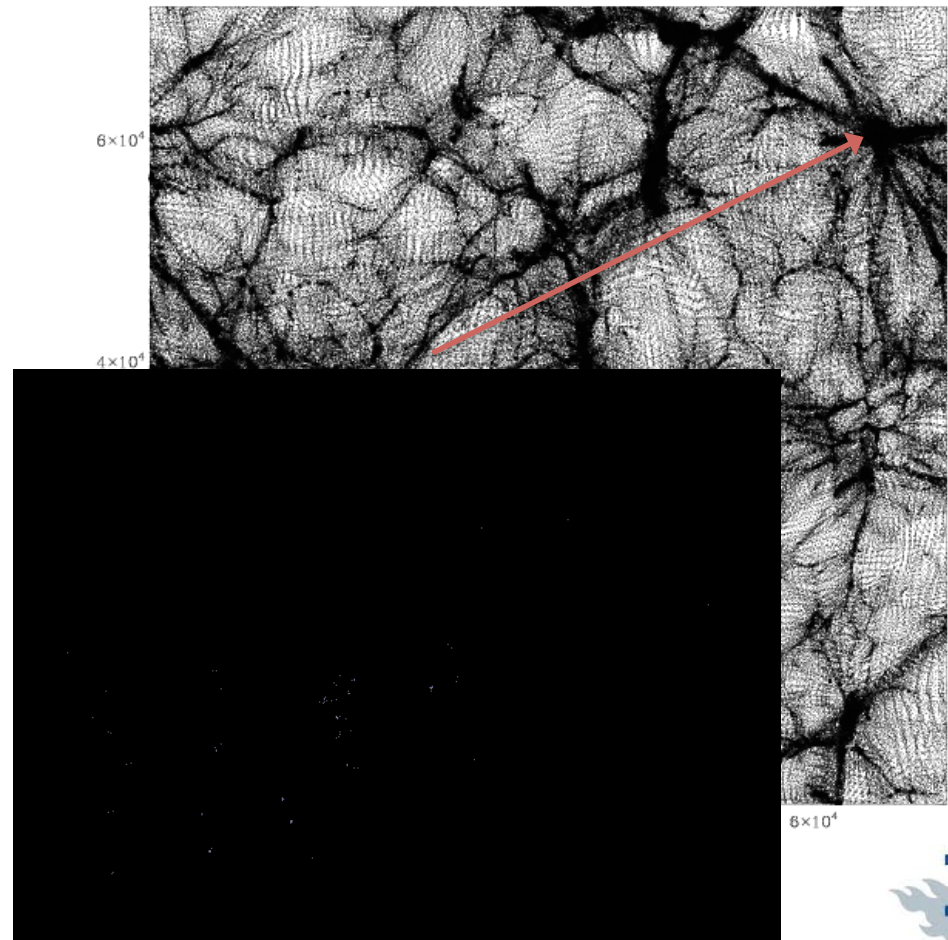




# Rakenteen epälineaarinen kasvu

- Kun tiheyshäiriöt ovat  $\delta \sim 1$ , lineaariteoria ei enää päde. Mallintamisessa käytetään tällöin numeerisia simulaatioita.
- Yksinkertaisen pallomaisen luhistumisen laskelman mukaan luhistumisen loppuvaiheessa  $\delta \sim 178$  ja tätä ylitiheyttä ( $\delta \sim 200$ ) käytetäänkin usein pimeän aineen halon määritelmänä.
- Kun kohteen ylitiheys on 200, se ei enää osallistu yleiseen maailmankaikkeuden laajenemiseen, vaan se on sidottu painovoiman avulla itsenäiseksi kappaleeksi.

Tutkimusryhmämme simulaatio muodostuvasta ellipsigalaksista.





## 4. Ensimmäisten galaksien synty: Kosminen aikajana

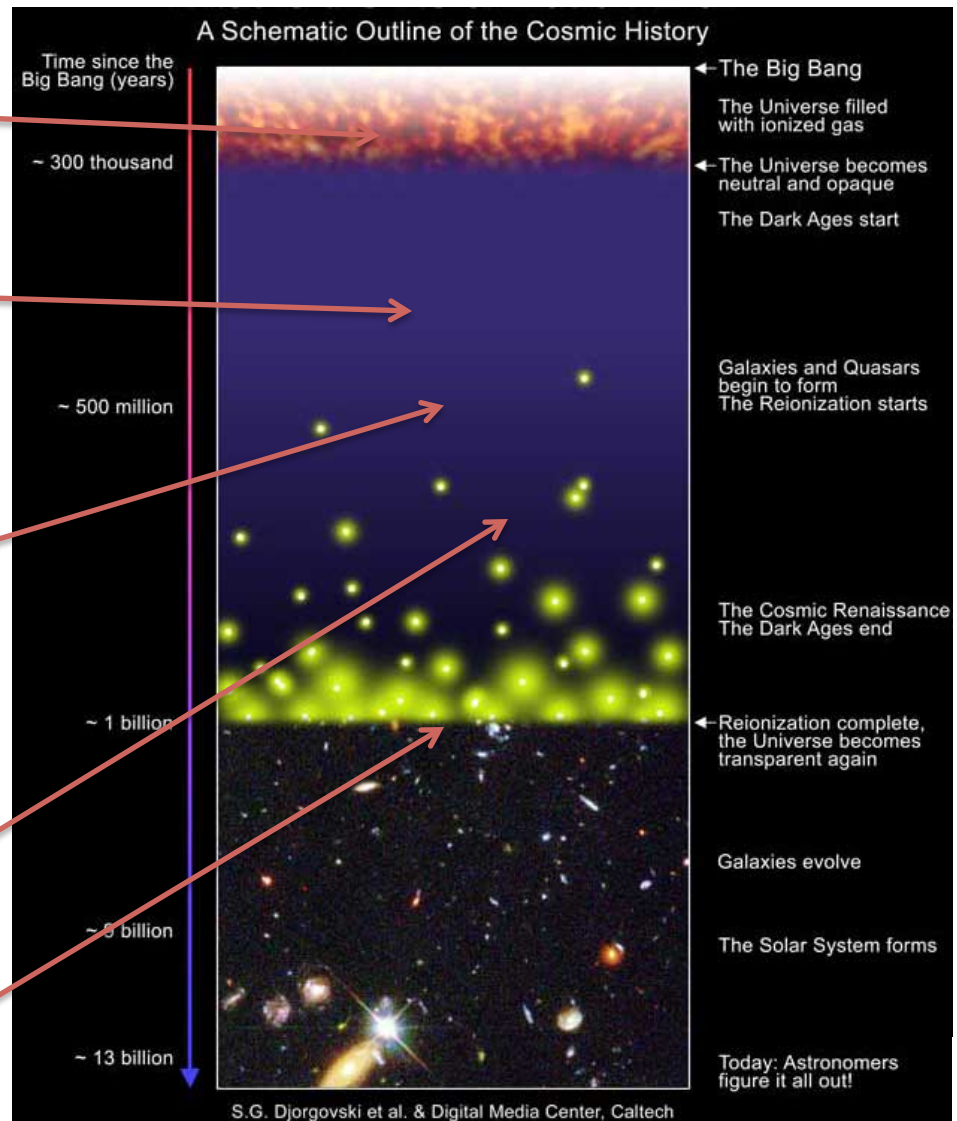
Kosminen mikromaalto-  
tausta.

Ensimmäiset tähdet  
muodostuvat noin  
punasiirtymillä  $z \sim 20-30$ .

Ensimmäiset galaksit  
muodostuvat noin  
punasiirtymillä  $z \sim 10-15$ .

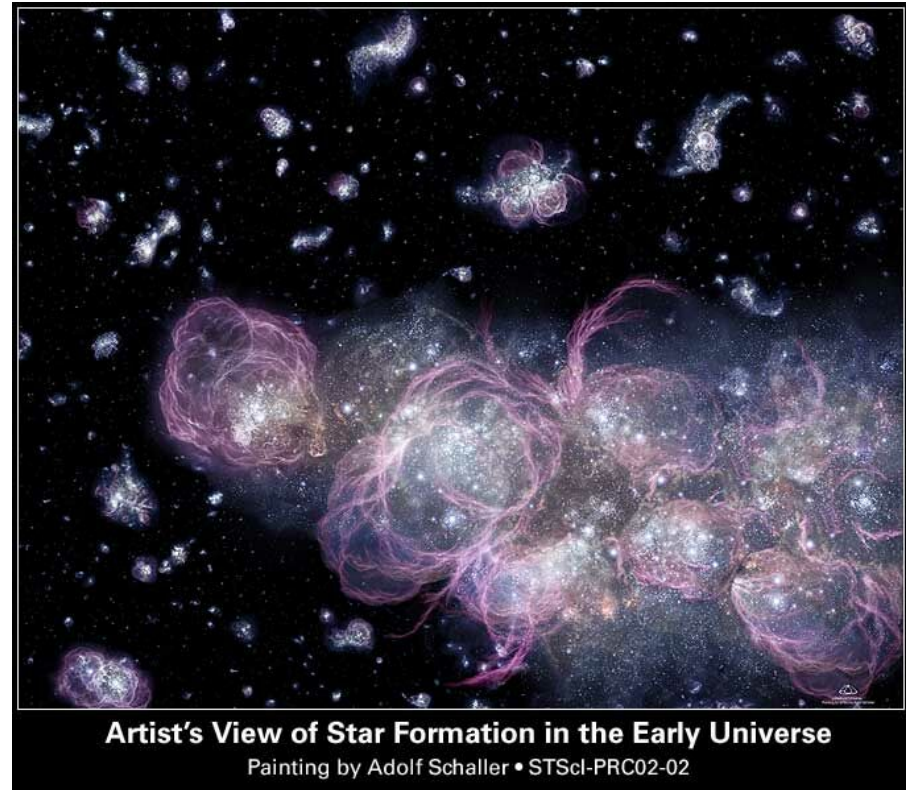
Kaukaisin varmistettu  
kohde, GRB  $z=8.2$ ,  $t=650$   
miljoonaa vuotta. Myös  
galaksikandidaatteja.

Varmistettuja galaksi-  
havaintoja  $z \sim 6-7$ .



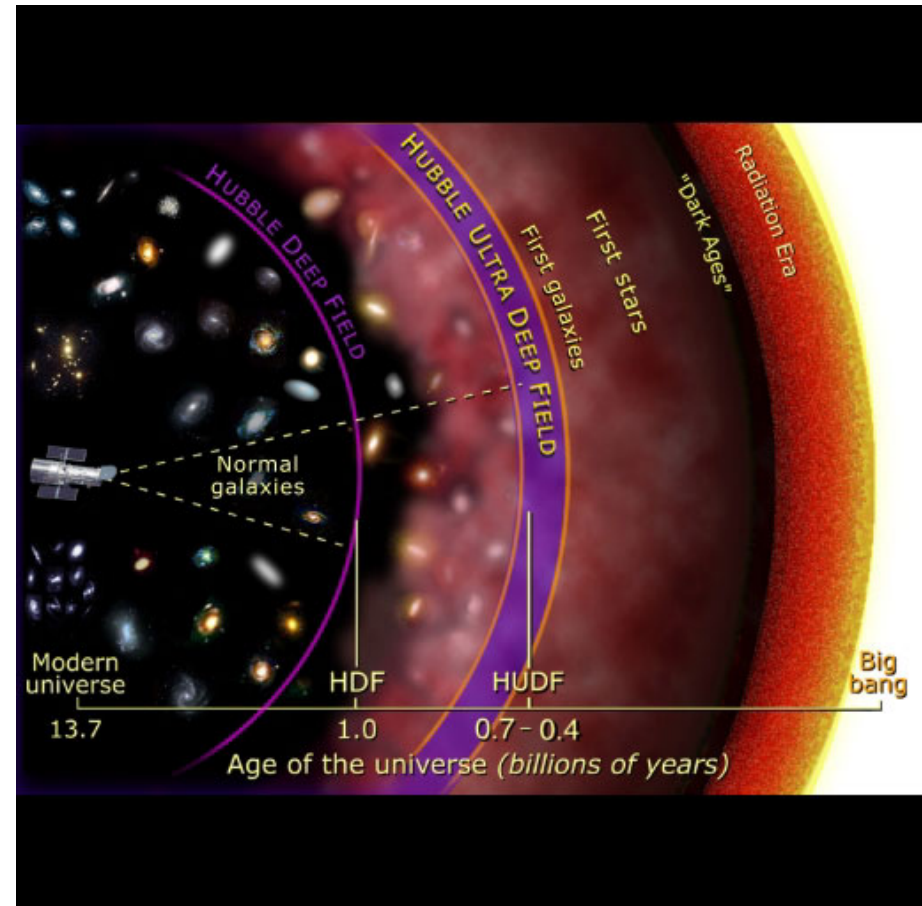
# Ensimmäiset tähdet

- Maailmankaikkeuden ensimmäiset tähdet syntyivät kaasusta, joka koostui ainoastaan vedystä ja heliumista. Raskaampia alkuaineita (metalleja) ei ollut vielä syntyneet tähtien ytimissä.
- Raskaiden alkuaineiden puuttuminen tarkoitti sitä että kaasun jäähtyminen oli varsin tehotonta.
- Ensimmäiset tähdet olivat oletettavasti hyvin raskaita ( $50\text{--}200 M_{\odot}$ ) ja täten selvästi raskaampia kuin valtaosa tänä päivänä syntyvistä tähdistä.



# Ensimmäiset galaksit

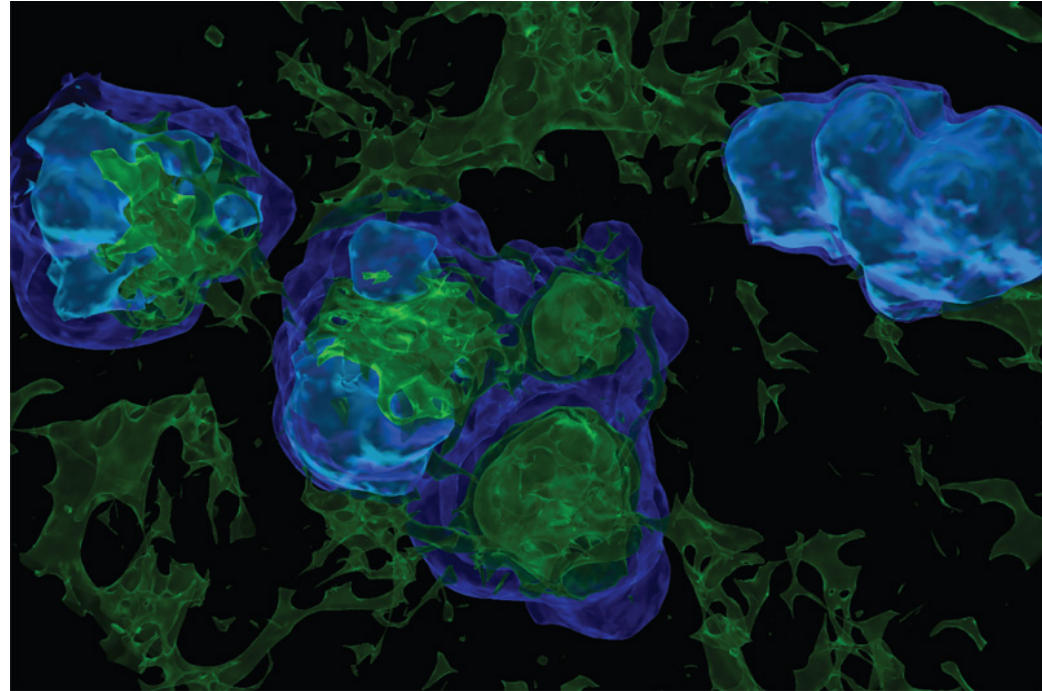
- Ensimmäisten galaksien massat olivat noin  $10^7$ - $10^8 M_{\odot}$  ja ne muodostuivat pienistä minihaloista kerääntymällä, joiden keskustoissa oli ensimmäisiä tähtipopulaatioita.
- Galakseilla täytyi olla riittävän suuri massa, jotta atomaarinen vety ( $T=10^4$  K) ei pääsisi karkaamaan niistä.
- Ensimmäisten tähtisukupolvien jälkeen kaasun metallipitoisuus nousi nopeasti ja myös tavallisia pienempi-massaisia tähtiä syntyi, joita voimme havaita tänään, esim. Linnunradassa.





# Ensimmäisten galaksien elämä

- Koska galaksien ensimmäiset tähdet olivat hyvin massiivisia, ne **elivät hyvin lyhyen ajan** (muutamia miljoonia vuosia) ja **kuolivat näyttävästi valtaisissa supernoväräjähdyksissä**.
- Massiivisten tähtien voimakas UV-säteily, yhdessä tähtituulien ja supernoväräjähdysten avulla muokkasivat voimakkaasti protogalakseja.
- Myös tähdissä tuotetut metallit levisivät tehokkaasti ympäri galaksia ja osittain galaksienväliseen avaruuteen.

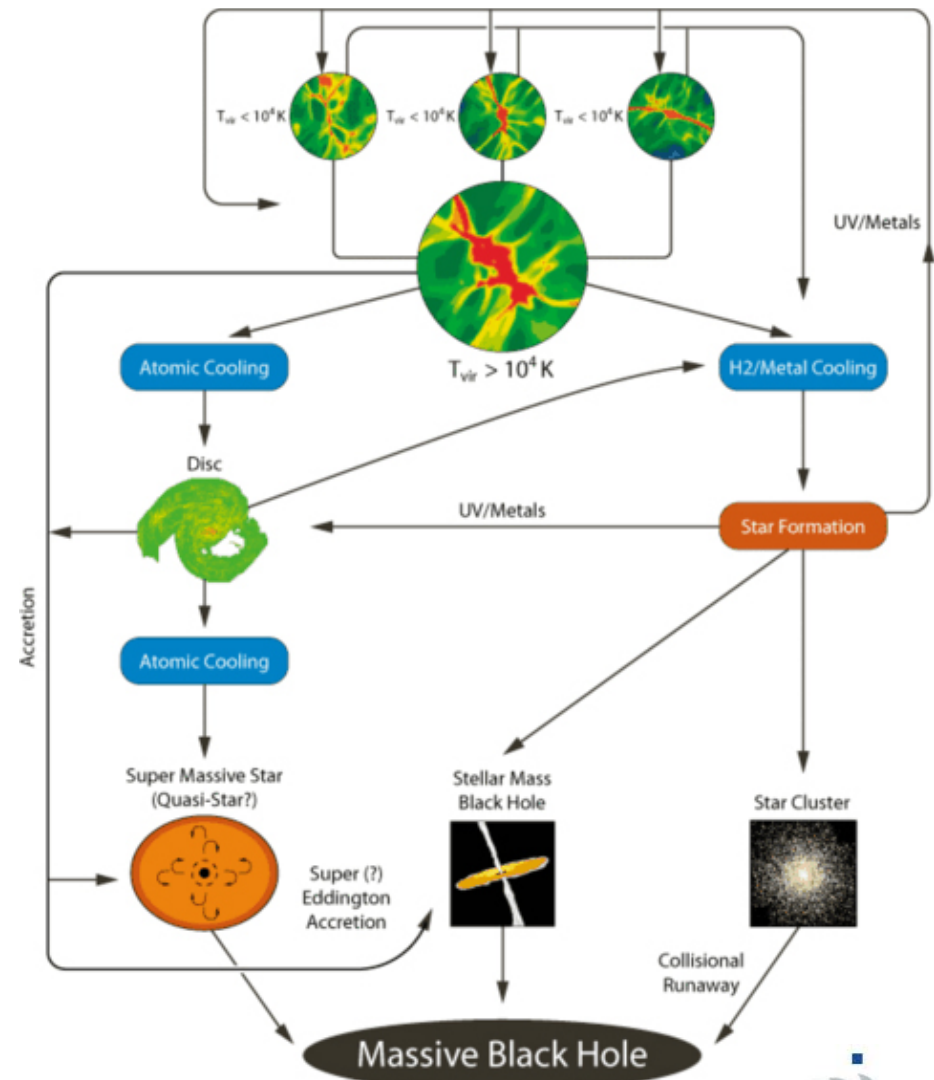


Ensimmäisten tähtien aiheuttamia supernoväräjähdyksiä ja tähtituulia varhaisessa maailman-  
kaikkeudessa.

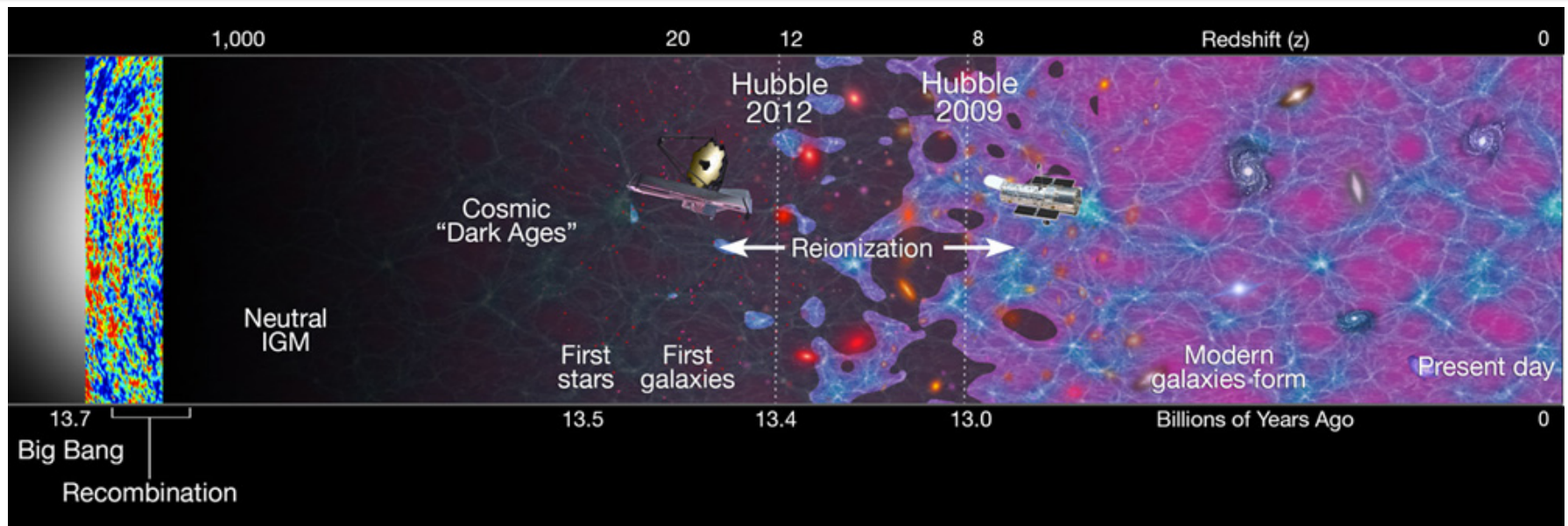


# Supermassiivisten mustien aukkojen synty

- Samoihin aikoihin galaksien keskustoihin kehittyi supermassiivisia mustia aukkoja, joiden **massat havaintojen mukaan olivat jo yli  $10^9 M_{\odot}$  alle miljardi vuotta alkuräjähdyksen jälkeen.**
- Mustien aukkojen tarkkaa syntymekanismia ei tunneta, mutta ne syntyivät todennäköisesti joko massiivisten tähtien jälkeen jättämistä aukoista tai suoraan romahtamalla  $10^4 M_{\odot}$  kokoisiksi aukoiksi.



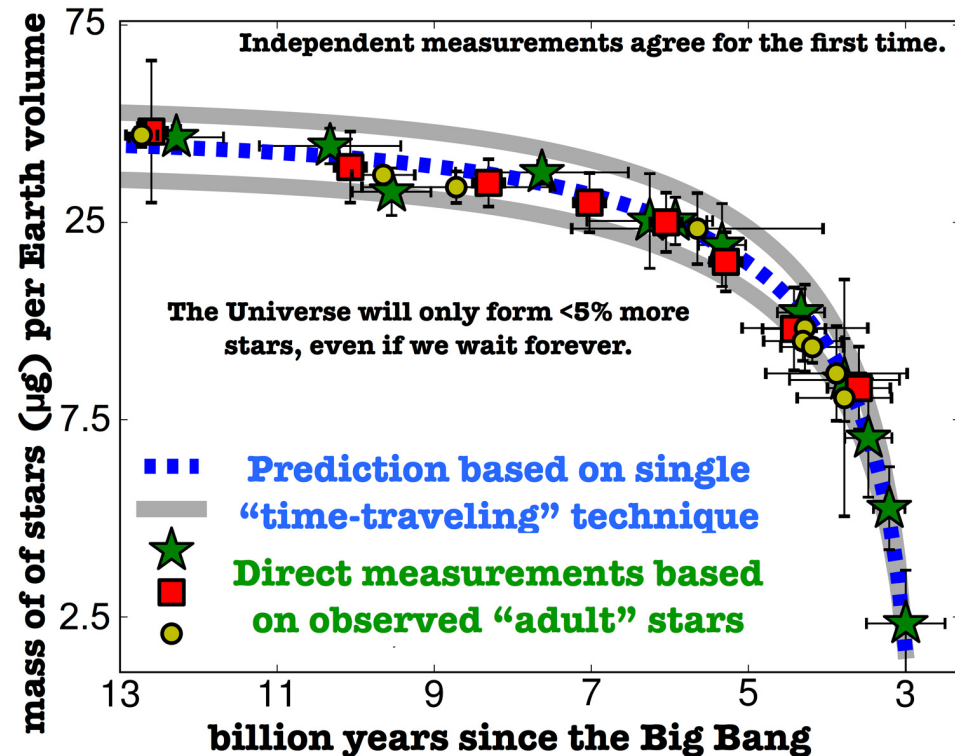
# Reionisaatio



- Kosmisen mikroaaltotaustasäteilyn synnyn jäljiltä maailmankaikkeuden kaasu oli neutraalia. Neutraali vetykaasu absorboi erittäin tehokkaasti säteilyä ja maailmankaikkeus oli läpinäkymätön (Dark ages).
- Ensimmäisistä tähdistä ja mustista aukoista lähtevä voimakas säteily rupesi ionisoimaan vetyä ja jokaisen galaksin ympärille kasvoi ionisoituneen vedyn kupla. **Lopulta eri kuplat yhtyivät ja kaikki kaasu ionisoitui ja samalla avaruus muuttui läpinäkyväksi.**

## 5. Galaksien kehitys nykypäivään

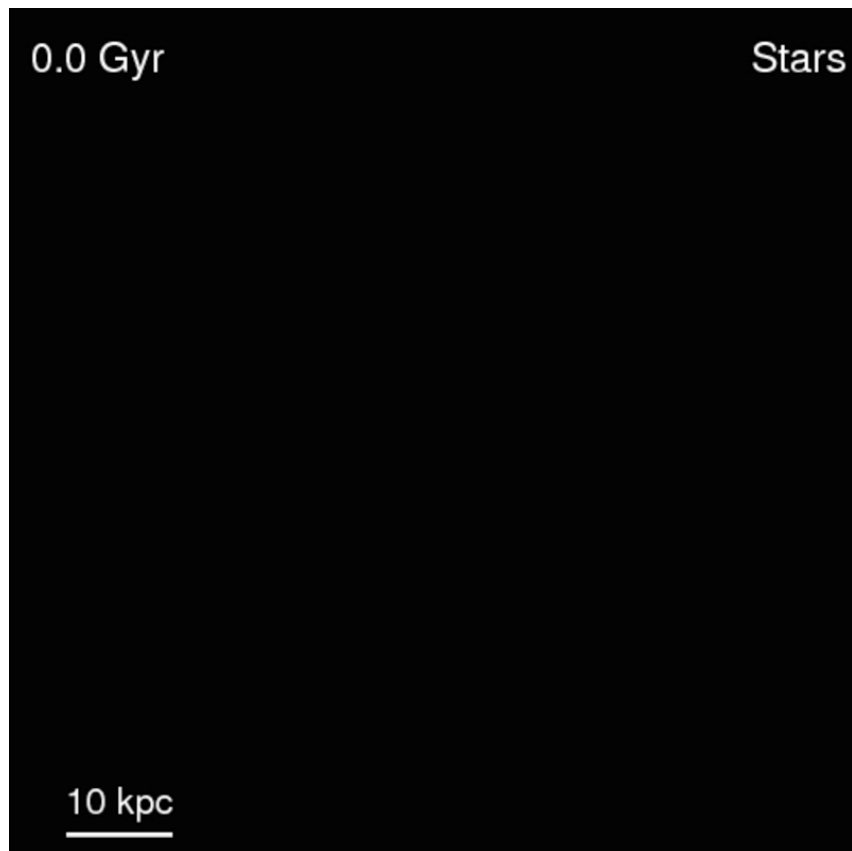
- Ensimmäisen vuosimiljardin jälkeen galaksien kehitys jatkoi tasaisena. **Pienemmät galaksit yhtyivät suurimmiksi törmäyksissä ja suuret galaksijoukot muodostuivat pikkuhiljaa.**
- Maailmankaikkeuden tähtiensyntä ja musta aukko **aktiivisuus saavutti huippunsa noin 6-7 miljardia vuotta sitten** kun maailmankaikkeudessa oli vielä paljon vapaata kaasua ja törmäyksiä sattui usein.



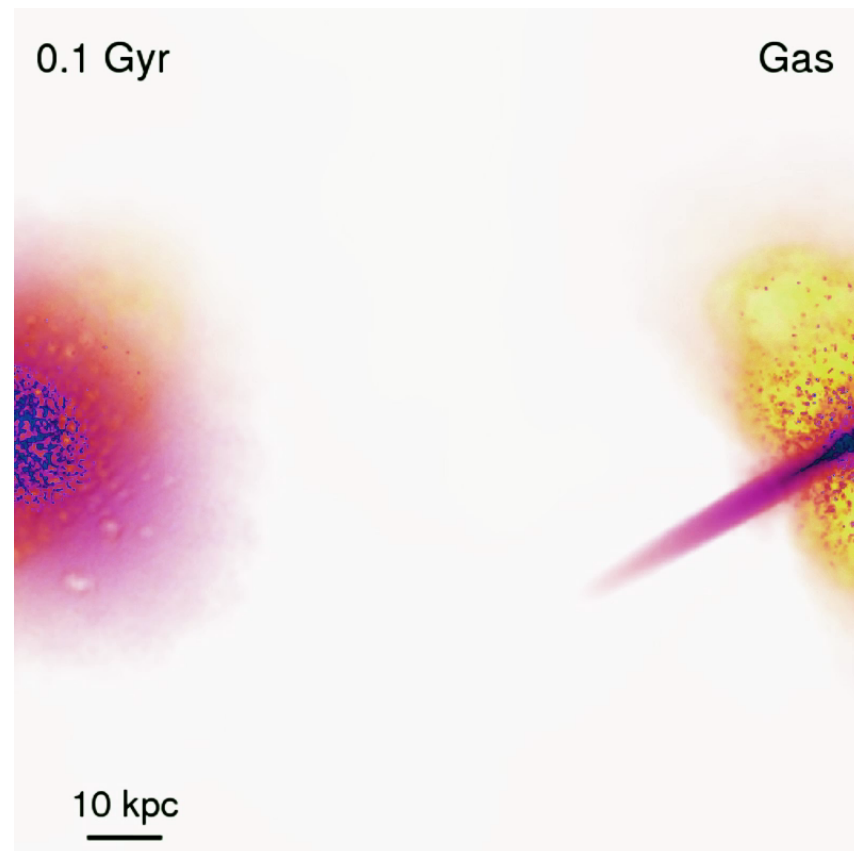
# Galaksitörmäykset tietokoneessa

Animaatiot: Dr. Phil Hopkins (Caltech)

Tähdet törmäävissä galakseissa



Kaasu törmäävissä galaksissa



- Toisin kuin tähtien tapauksessa, törmäykset ovat tärkeä osa galaksien elämää. Kaikki suuret galaksit ovat rakentuneet useista sadoista törmäyksistä pienempien galaksien kanssa, esim. Linnunrata.



# Ellipsigalaksien synty ja kehitys

- Elliptiset galaksit ovat tyypillisesti hyvin massiivisia ja lähes kaikki ellipsigalaksien tähdet ovat hyvin vanhoja.
- Täten ellipsigalaksit ovat muodostuneet varhain korkeilla punasiirtymillä ja sen jälkeen ne ovat kasvaneet lähinnä syömällä pienempiä kaasuköyhiä galakseja.
- Monet ellipsigalaksit pyörivät myös erittäin hitaasti, joka viittaa siihen, että ne ovat syntyneet useamman pienen galaksin törmäyksissä.
- Jotkut pienimassaisemmat ellipsigalaksit ovat myös voineet syntyä kiekkogalaksien törmäyksissä.



Tutkimusryhmämme **simulaatio** muodostuvasta **ellipsigalaksista**



# Kiekkogalaksien synty ja kehitys

- Kiekkogalaksien tähdillä on laajempi ikähaitari. Keskuspullistuman tähdet ovat hyvin vanhoja, mutta kiekossa on sekä vanhoja, että verrattain nuoria tähtiä.
- Kiekkogalaksit ovat välttäneet suurimpia galaksitörmäyksiä, jotka olisivat tuhonneet niiden kiekot.
- Synnyttääkseen kiekon vaaditaan paljon kaasua ja tehokasta supernova-aktiivisuutta, joka säätelee tähtiensyntyä galaksissa.

The *Eris* N-body simulation of a massive late-type spiral galaxy in a WMAP3 cosmology (Guedes, Callegari, Madau, & Mayer 2011). The simulation was performed with the GASOLINE code on NASA's *Pleiades* supercomputer and used 1.5 million cpu hours.

$M_{\text{vir}} = 7.9 \times 10^{11} M_{\text{sun}}$   
 $N_{\text{DM}} + N_{\text{gas}} + N_{\text{star}} = 7M + 3M + 8.6M$  within the final  $R_{\text{vir}}$   
force resolution = 120 pc

RESEARCH FUNDED BY NASA, NSF, AND SNF

Kiekkogalaksin synty.

Simulaatio Javiera Guedes et al. 2011



# Vastaavatko havainnot teoriaa?



**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 kuvassa ovat **pieniä ja punasiirtymällä  $z \sim 6-7$**  noin miljardi vuotta alku-räjähdyksen jälkeen.

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

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



# Yhteenveto

1. Galaksit ovat suuria tähdistä, kaasusta ja pölystä koostuvia järjestelmiä, jotka sijaitsevat pimeän aineen haloissa.
2. Kosmologisessa standardimallissa maailmankaikkeus koostuu 4%:sta tavallista ainetta, 23%:sta pimeää ainetta ja 76%:sta pimeää energiaa. Emme täysin ymmärrä pimeän aineen olemusta ja emme ollenkaan pimeää energiaa.
3. Kylmä pimeä aine on olennainen osa galaksien muodostumista, ilman sitä galaksit eivät ehtisi syntyä pienistä taustasäteilyn havaituista häiriöistä.
4. Maailmankaikkeuden ensimmäiset tähdet olivat hyvin massiivisia ja ne elivät lyhyen ja väkivaltaisen elämän. Jo muutamien ensimmäisten tähtisukupolvien jälkeen nykymuotoinen tähtiensynty käynnistyi.
5. Yksityiskohtaista teoriaa siitä, miksi juuri tietyntyyppiset galaksit syntyvät tietyillä alueilla ei vielä tunneta. **Paljon tutkittavaa ja opittavaa!**