



- **Uppkomsten av de första galaxerna – nya resultat från James Webb-teleskopet**

Peter Johansson, Professor i astrofysik
Institutionen för Fysik, Helsingfors Universitet

Presentation på Svenska Klubben

Helsingfors 18.1.2023



I det här föredraget behandlas

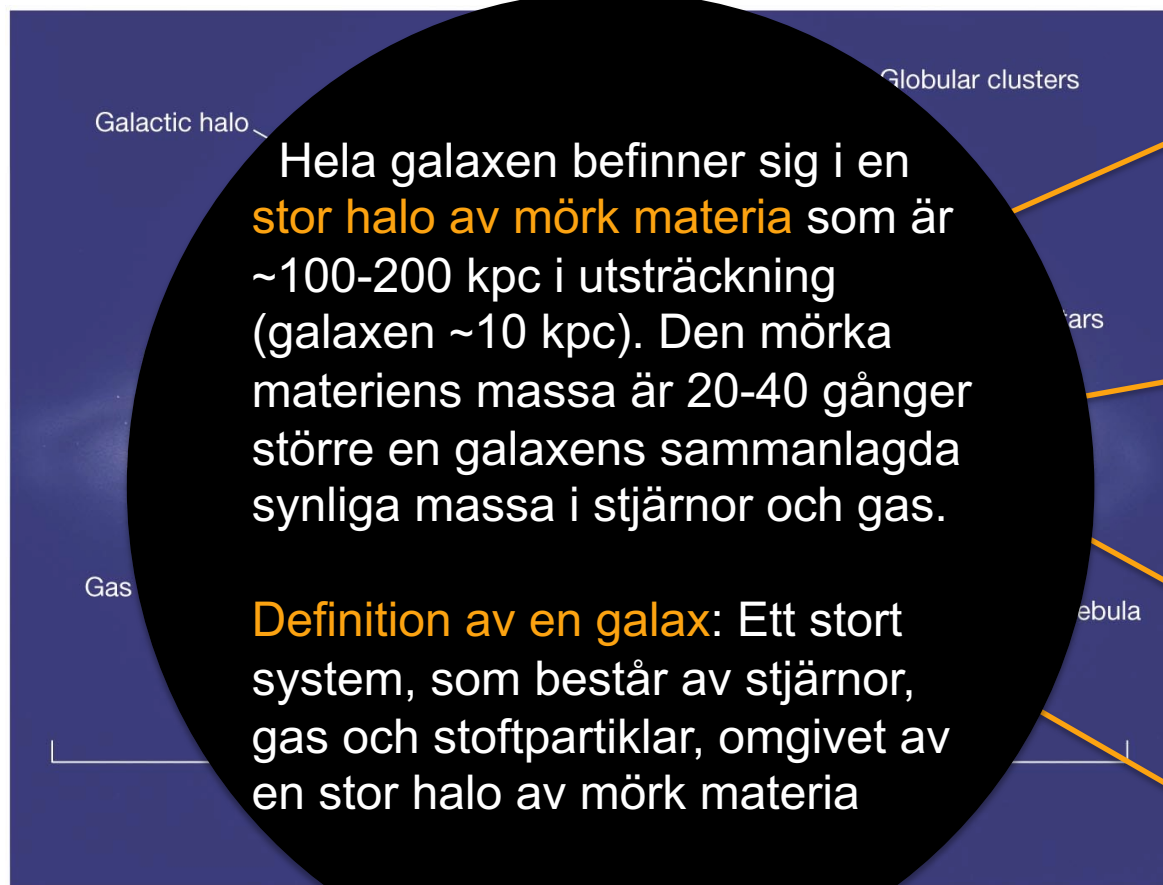
1. Vad är galaxer?
 2. Vad är den kosmologiska standardmodellen?
 3. Hur uppstår galaxer?
 4. Hurudana var de första galaxerna?
 5. Motsvarar observationerna teorin?
 6. Vad lärde vi oss idag?
- Färgkoden berättar vilken fråga behandlas. **Målsättningarna med dagens föredrag är att få en överblick av vad galaxer är, hur de har uppstått och utvecklats, och slutligen varför de är viktiga.**



1. Vad är galaxer?

- Galaxernas struktur

Credit: Pearson Education Inc.



Hela galaxen befinner sig i en **stor halo av mörk materia** som är ~100-200 kpc i utsträckning (galaxen ~10 kpc). Den mörka materiens massa är 20-40 gånger större en galaxens sammanlagda synliga massa i stjärnor och gas.

Definition av en galax: Ett stort system, som består av stjärnor, gas och stoftpartiklar, omgivet av en stor halo av mörk materia

Galaxens **kärnparti** är oftast **klotformigt** och hyser en stor mängd äldre röda stjärnor.

Galaxens **skiva** är en stor flat **diskusliknande struktur** och hyser unga stjärnor och gas.

Galaxens **yttre halo** består av mycket gamla stjärnor med låg metallicitet och klotformiga stjärnhopar.

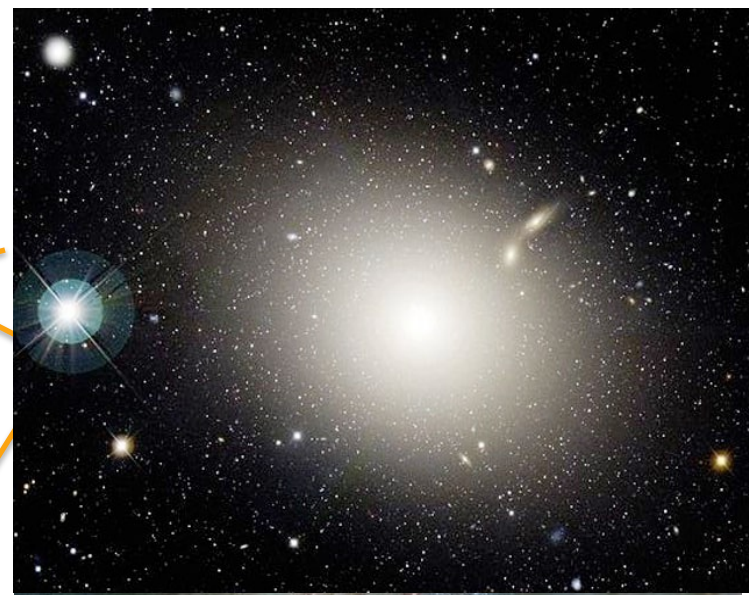
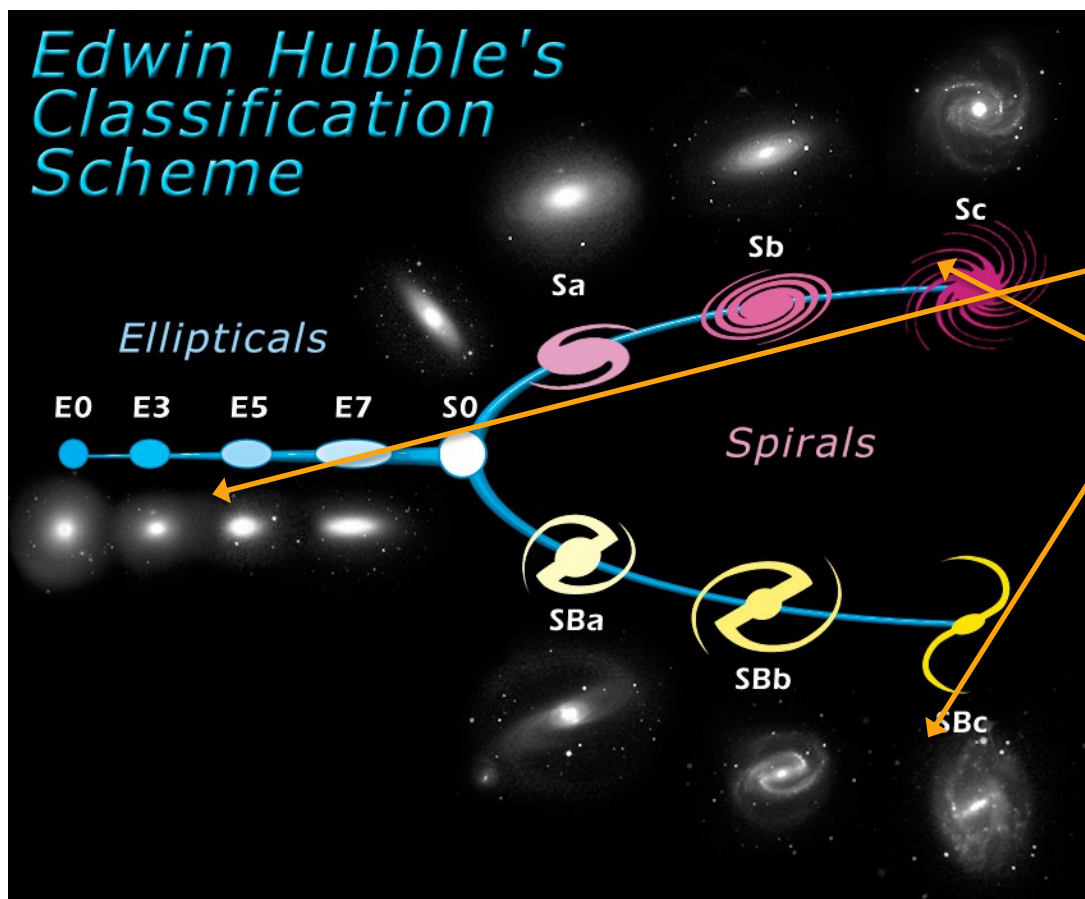
I **galaxernas centrum** befinner sig ofta ett **super-massivt svart hål**.

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



Klassificering av galaxer

Credit: Wikipedia & NASA/ESA



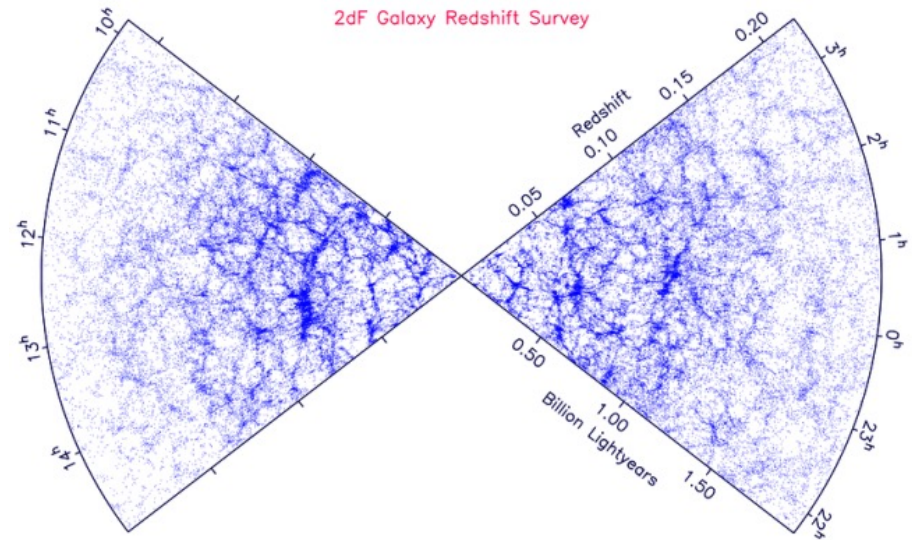
Spiralgalaxerna består av en diskusliknande skiva. De har mycket kall gas och en stor mängd unga massiva stjärnor. Kan delas in i normala och stavgalaxer.



2. Den kosmologiska standardmodellen - Λ CDM modellen

- Den **kosmologiska standardmodellen** baserar sig på den **allmänna relativitetsteorin** och på principen att vårt universum är **isotropiskt och homogent** på stora avståndsskalor.
- Det här är en generalisering av den **kopernikanska principen** att observatörer på jorden inte intar någon ovanlig eller privilegierad plats inom universum som helhet.

Credit: 2dF Galaxy Redshift Survey



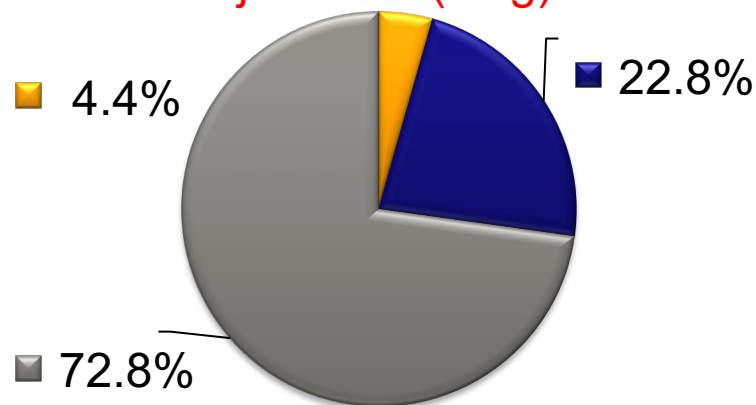
Observationer av galaxer i den näraliggande delen av vårt universum. Varje punkt motsvarar en galax.



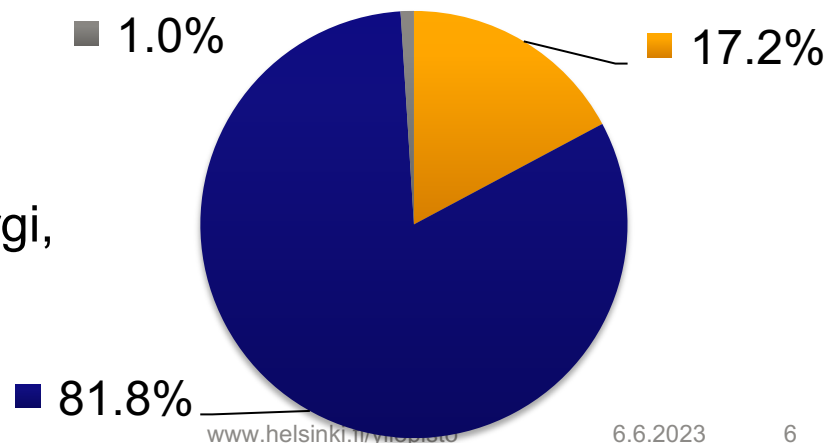
Universums sammansättning

- Idag består vårt universum till största delen av **mörk materia (23%)** och **mörk energi (73%)**. Andelen av **atomiskt materia** är bara **4.4%**.
- All **vanlig materia**, så som planeter, stjärnor, väte, osv. består av **atomer**.
- Vi vet inte vad **mörk materia** är (CDM=cold dark matter), men den växelverkar åtminstone via gravitationen. Möjligen består mörk materia av exotiska partiklar, t.ex. så kallade WIMPs.
- Vi vet inte vad **mörk energi** är (Λ), men den kan beskrivas som en form av vakuumenergi, som genomtränger hela rymden och som synes öka universums expansionstakt.

t=13.8 miljarder år (idag).



t=1 miljarder år.

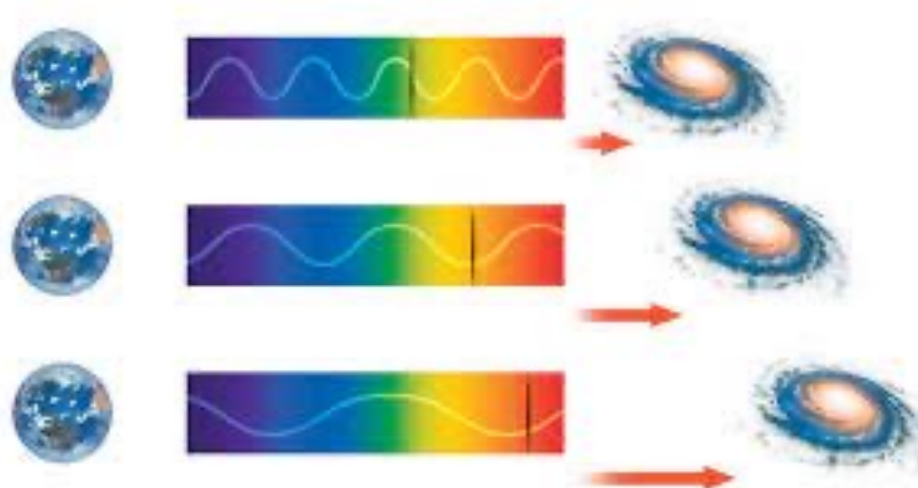




Rödförskjutning och Jeans-massan

- **Rödförskjutning:** Beskriver hur våglängden ökar (dvs. frekvensen minskar) för ljussignaler som avlägsnar sig från oss. Universums expansion förorsakar att ljuset rödförskjuts. Om ett objekt har en rödförskjutning av $z=1$, var Universums storlek $1/(1+z)=1/2$, dvs. hälften av vad det är dag då ljussignalen sändes iväg.

- **Jeans-massa:** energin som gravitationell massan är jämförbar med. Om objektet har en massa som är större än Jeans-massan, kan det kollapsa.



den termiska
jämvikt med
gasen. Jeans-
massan. Om objektet
har en massa som är större än Jeans-massan, kan det kollapsa.

Credit: BBC Sky at Night Magazine

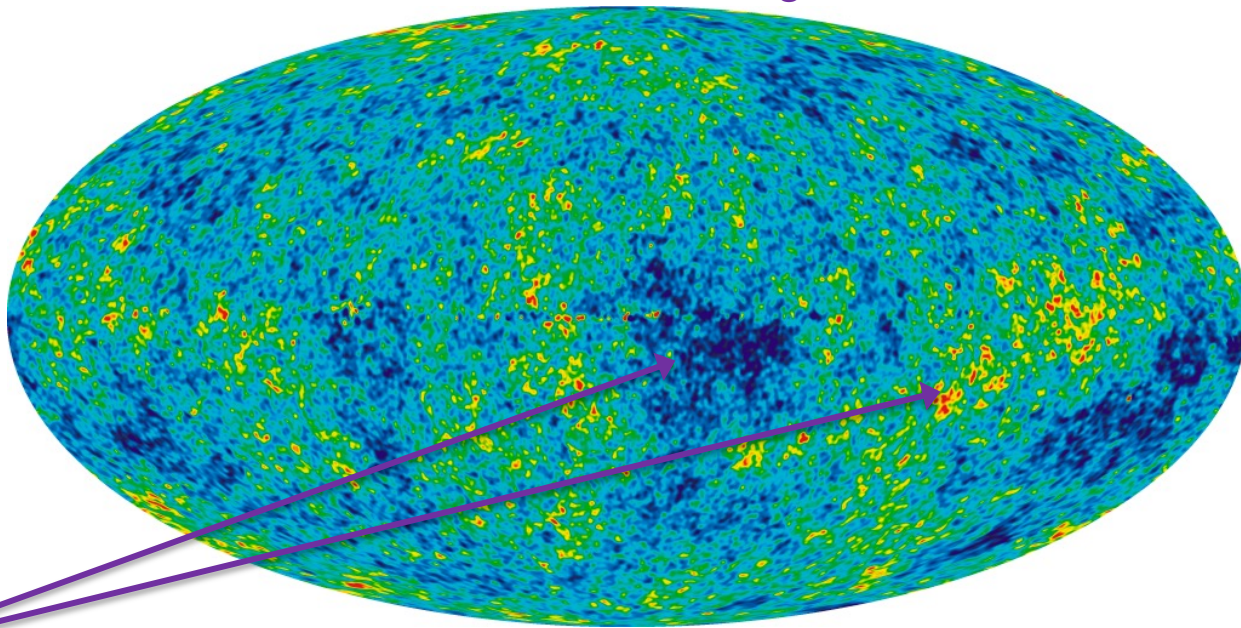


3. Hur uppstår galaxer?

- Den kosmiska bakgrundsstrålningen

$t=400\,000$ år ($z=1100$)

De ursprungliga densitetsfluktuationerna uppstod högst antagligen i det mycket tidiga universumet.



Credit: ESA

Hur utvecklades de mycket små fluktuationerna i bakgrundsstrålningen till de stora galaxerna, som vi ser idag

Idag för galaxer: $\delta \sim 10^6$
och galaxhopar: $\delta \sim 10^3$

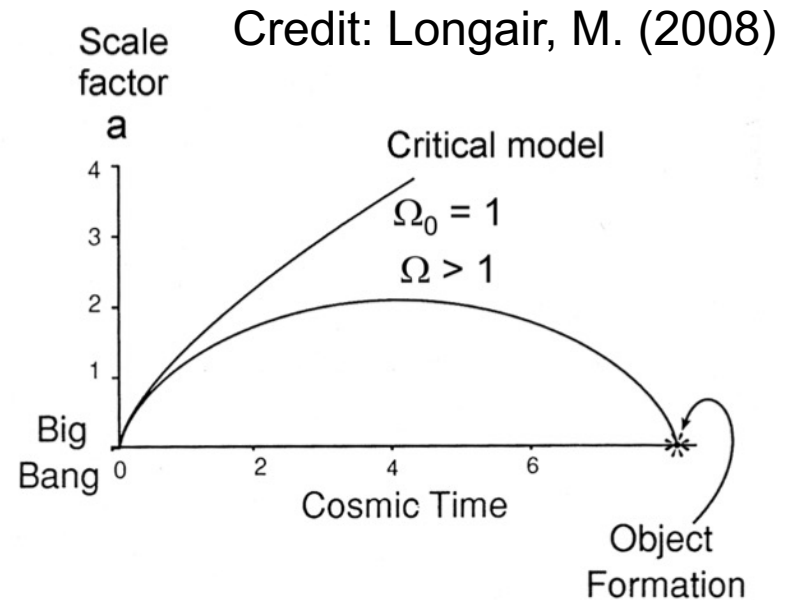
$$\frac{T - T_0}{T_0} \sim 10^{-5} \Rightarrow \delta = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \sim 10^{-5}$$



Hur växer små fluktuationer i ett expanderande universum

- I ett universum som expanderar växte fluktuationerna mycket långsamt. Man kan visa att fluktuationerna växte med tiden bara som $\delta \propto t^{2/3}$.
- Den här tillväxten är också direkt proportionell till rödförskjutningen, vilket betyder att från en rödförskjutning av $z=1100$ fram till idag ($z=0$) borde fluktuationerna bara växa med en faktor av ungefär ~ 1000 .
- I standardmodellen fanns det alltså inte tillräckligt med tid för att fluktuationerna skulle hinna växa. **Det här betyder alltså att det inte borde finnas galaxer, stjärnor eller människor.**

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

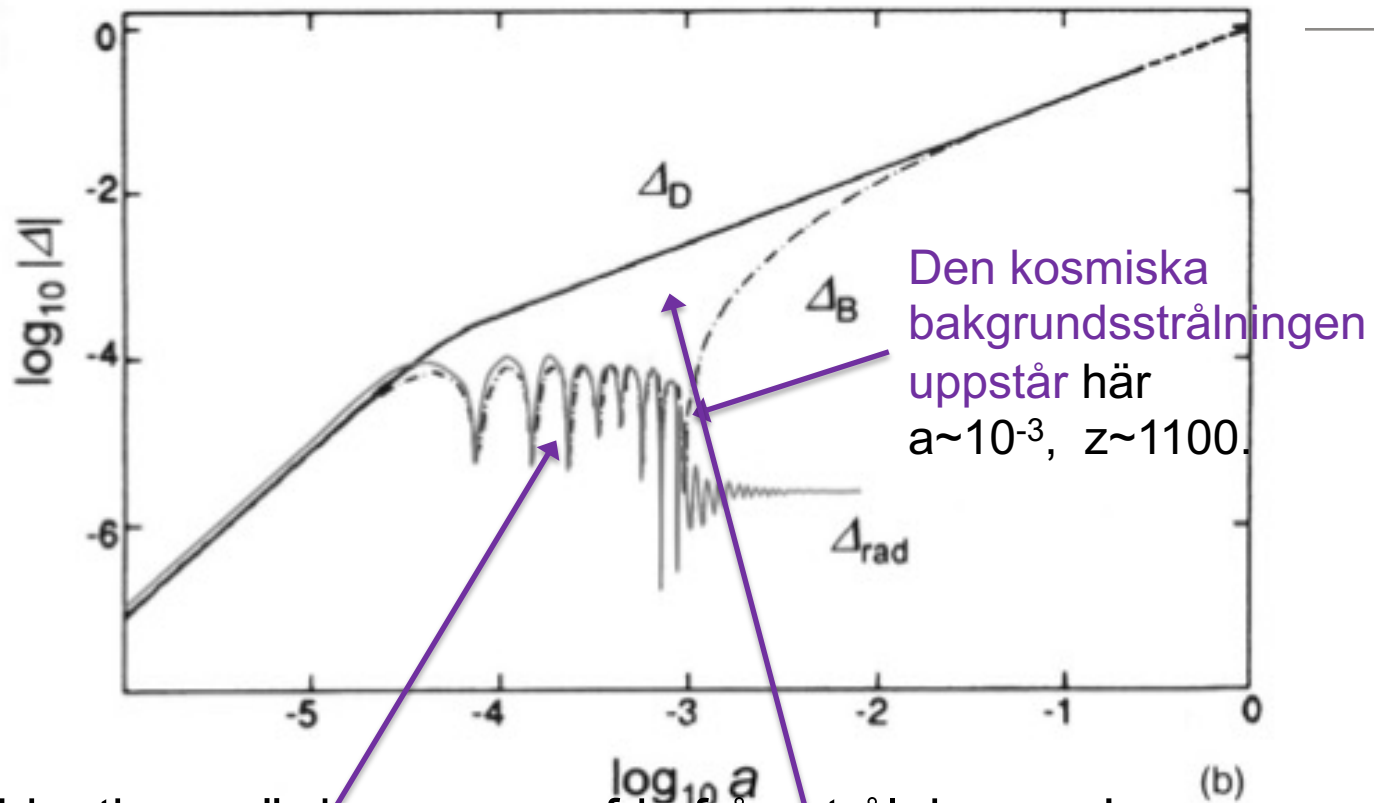


$$\delta_k \propto t^{2/3} \propto a = (1 + z)^{-1}$$



Mörk materia och uppkomsten av strukturer

Credit: Longair, M. (2008)



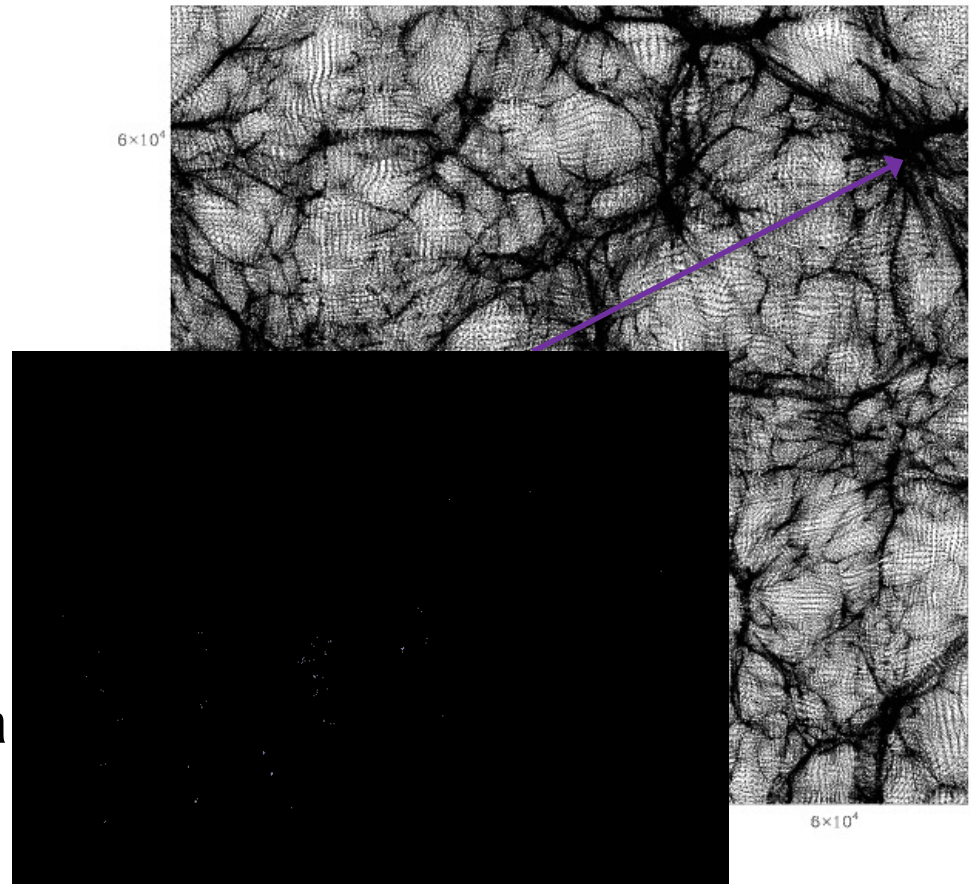
Efter rekombinationen är baryonerna fria från strålningen, Jeans-massan är $M_J \sim 10^5 M_\odot$ och baryonerna kan följa den mörka materiens gravitationsfält. Strålningen och baryonerna är sammankopplade genom Thomsonspridningen, fluktuationerna kan inte växa och Jeans massan är $M_J \sim 10^{16} M_\odot$.



Den icke-linjära uppkomsten av strukturer

En kosmologisk galaxsimulation, gjord av vår forskningsgrupp. —

- När densitetfluktuationerna har vuxit till $\delta \sim 1$, gäller inte längre den linjära teorin, som vi hittills beskrivit.
- Strukturerna kollapsar nu i stället relativt snabbt och bildar galaxer som är bundna av gravitationen.
- Nu krävs det **numeriska simulationer** för att beskriva händelse-förloppet.





4. Hurudana var de första galaxerna? – Den kosmiska tidslinjen

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

De första stjärnorna

bildades ungefär på en rödförskjutning av $z \sim 20-30$ ($t \sim 100-200$ miljoner år).

De första galaxerna

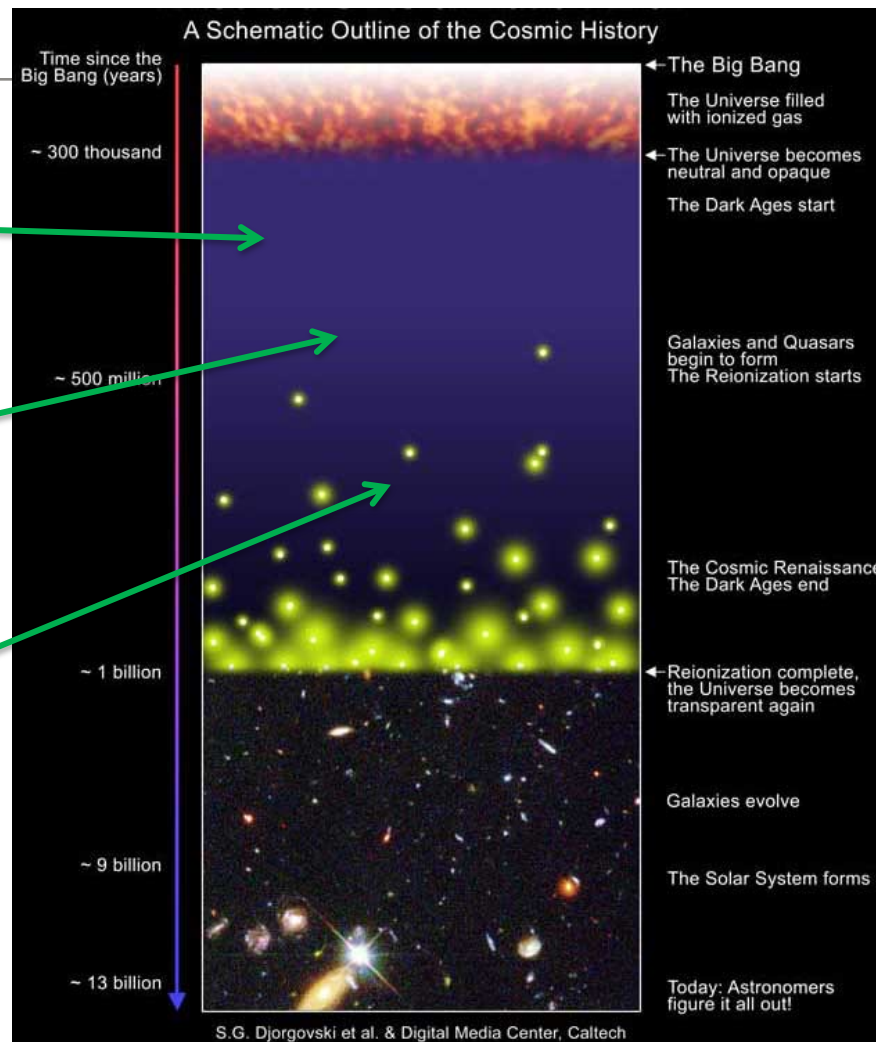
bildades ungefär på en rödförskjutning av $z \sim 10-15$ ($t \sim 300-500$ miljoner år).

Den avlägsnaste kända

galaxen: GN-z11, $z=11$ $t \sim 400$ miljoner år. JWST har också upptäckt galaxkandidater med $z \sim 13-15$.

HELSINGIN YLIOPISTO
HELSINGFORS UNIVERSITET
UNIVERSITY OF HELSINKI

Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta /
Peter Johansson / Galaksien synty ja kehitys

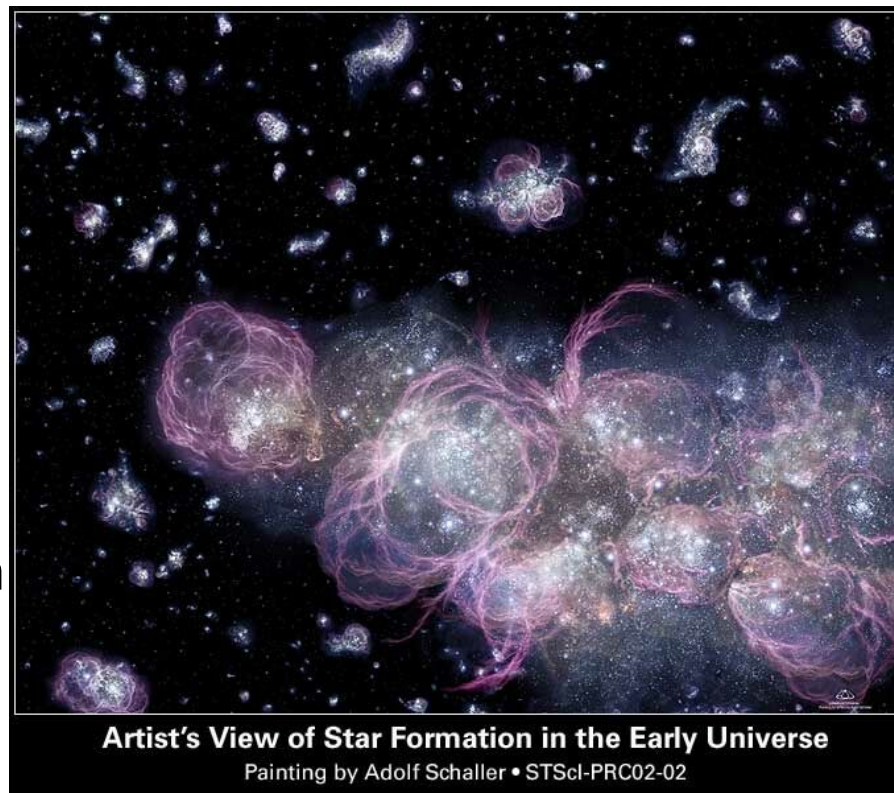




De första stjärnorna och galaxerna

- **De första stjärnorna:** Uppstod av gas, som endast bestod av väte och helium. Stjärnorna var antagligen mycket massiva ($50\text{-}200 M_{\odot}$) och de levde bara en kort stund. Till slut exploderade stjärnorna i gigantiska supernovor.
- **De första galaxerna:** De var små och deras massor var bara ungefär $10^7\text{-}10^8 M_{\odot}$ ($<1/10000$ av Vintergatan) och de uppstod i små minihalos, som bestod av mörk materia och de första stjärnorna.

En konstnärs syn på de första stjärnorna



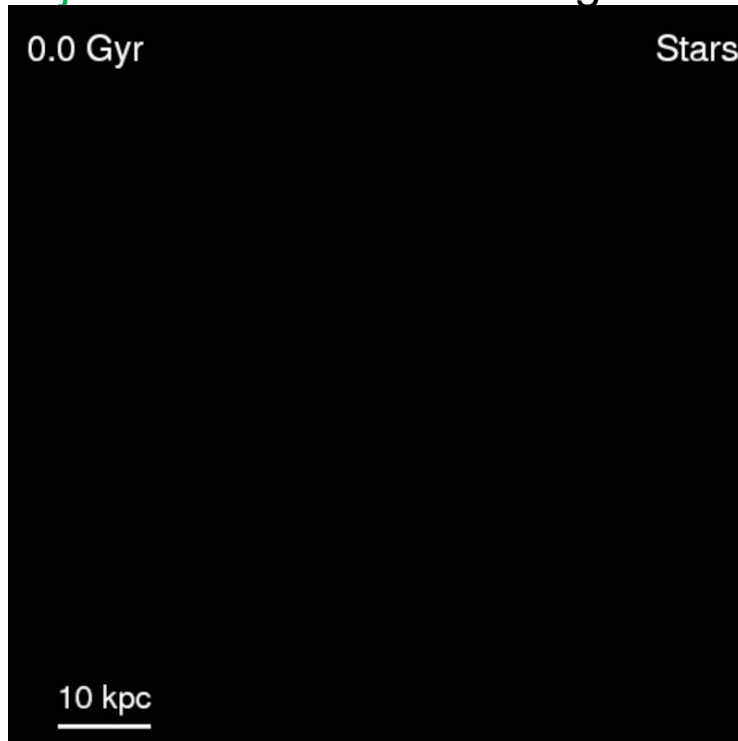
Credit: NASA/ESA



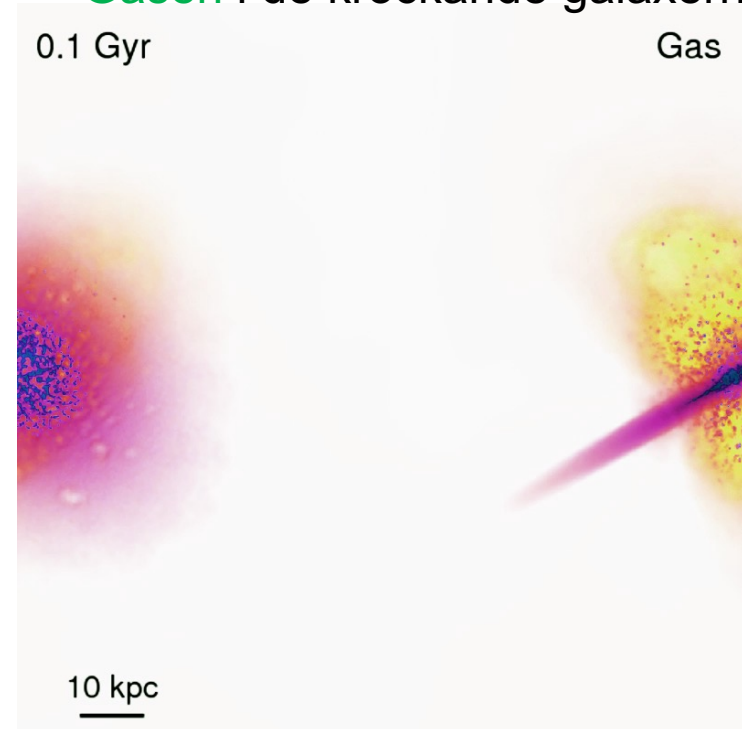
Galaxernas utveckling– Krockande galaxer

Animationerna: Prof. Phil Hopkins (Caltech)

Stjärnorna i de krockande galaxerna



Gasen i de krockande galaxerna

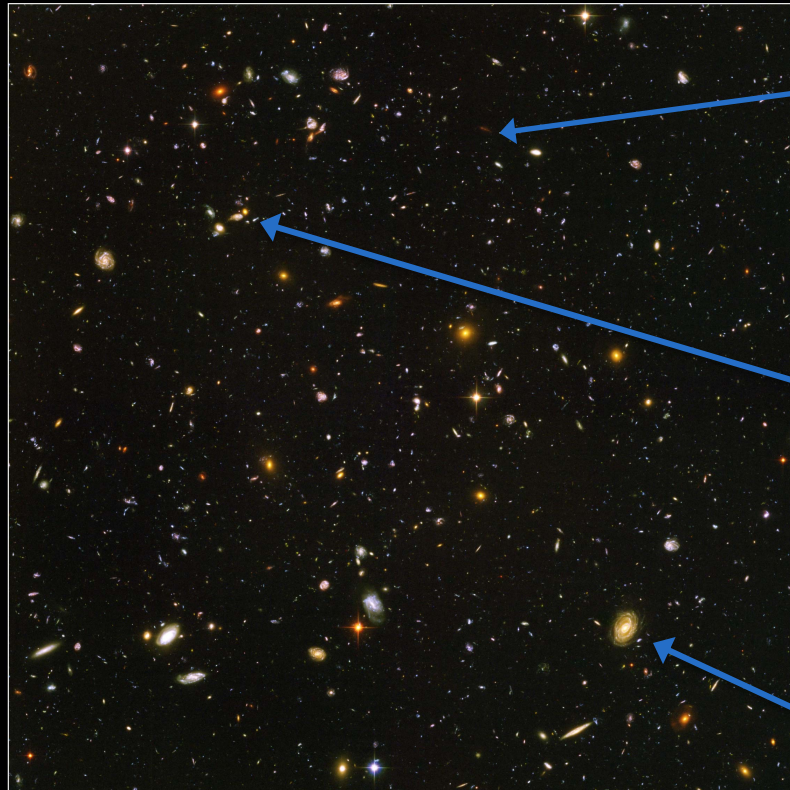


- **Krockar är en viktig aspekt av galaxutvecklingen.** Alla stora galaxer har uppstått genom hundratals galaxkrockar.



5. Motsvarar observationerna teorin?

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

De mest avlägsna galaxerna är små och befinner sig på en rödförskjutning av $z \sim 10-15$, ungefär 300 miljoner år efter ursmällen.

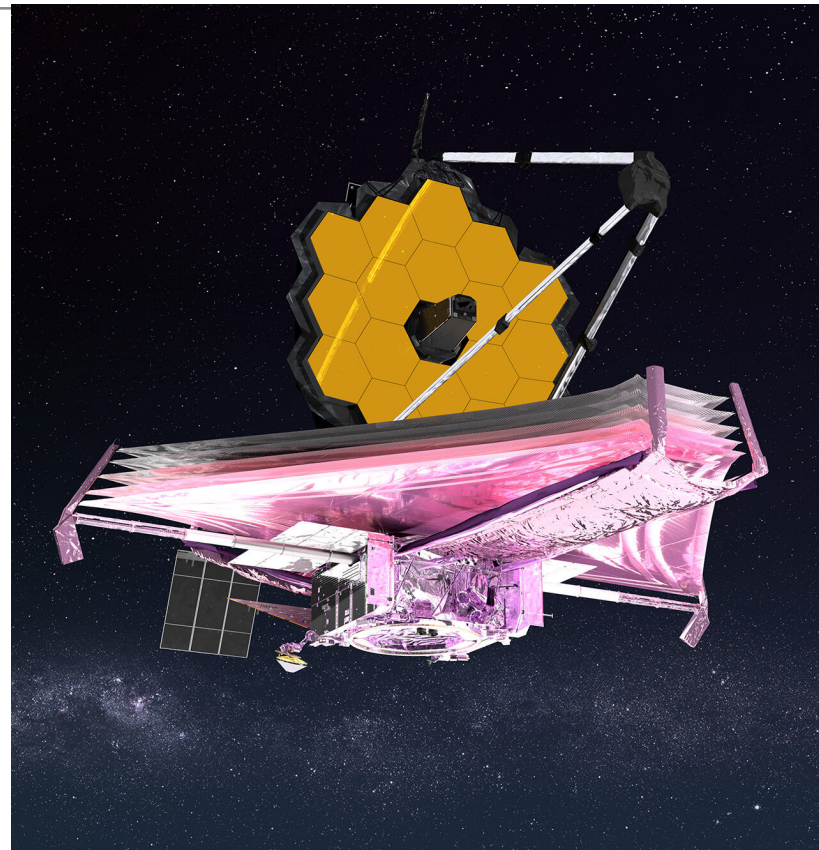
Många galaxer är oregelbundna. Galaxkrockar förekom oftare i det tidigare universumet. Strukturerna växer från små till större.

De största galaxerna befinner sig relativt nära ($z \sim 0.1$) och de är regelbundna spiralgalaxer och elliptiska galaxer.



James Webb rymdteleskopet

- I december 2021 sköts James Webb (JWST) rymdteleskopet upp och det håller på att **fullständigt revolutionera galaxforskningen**.
- JWST har en spegel med en diameter av 6.5 meter (6x större yta än Hubble) och den är optimerad för att observera infrarött ljus, till skillnad från Hubble.
- De första observationerna med JWST har redan visat, att **stjärnorna och galaxerna uppstod tidigare än vad modellerna hade förutspått**.

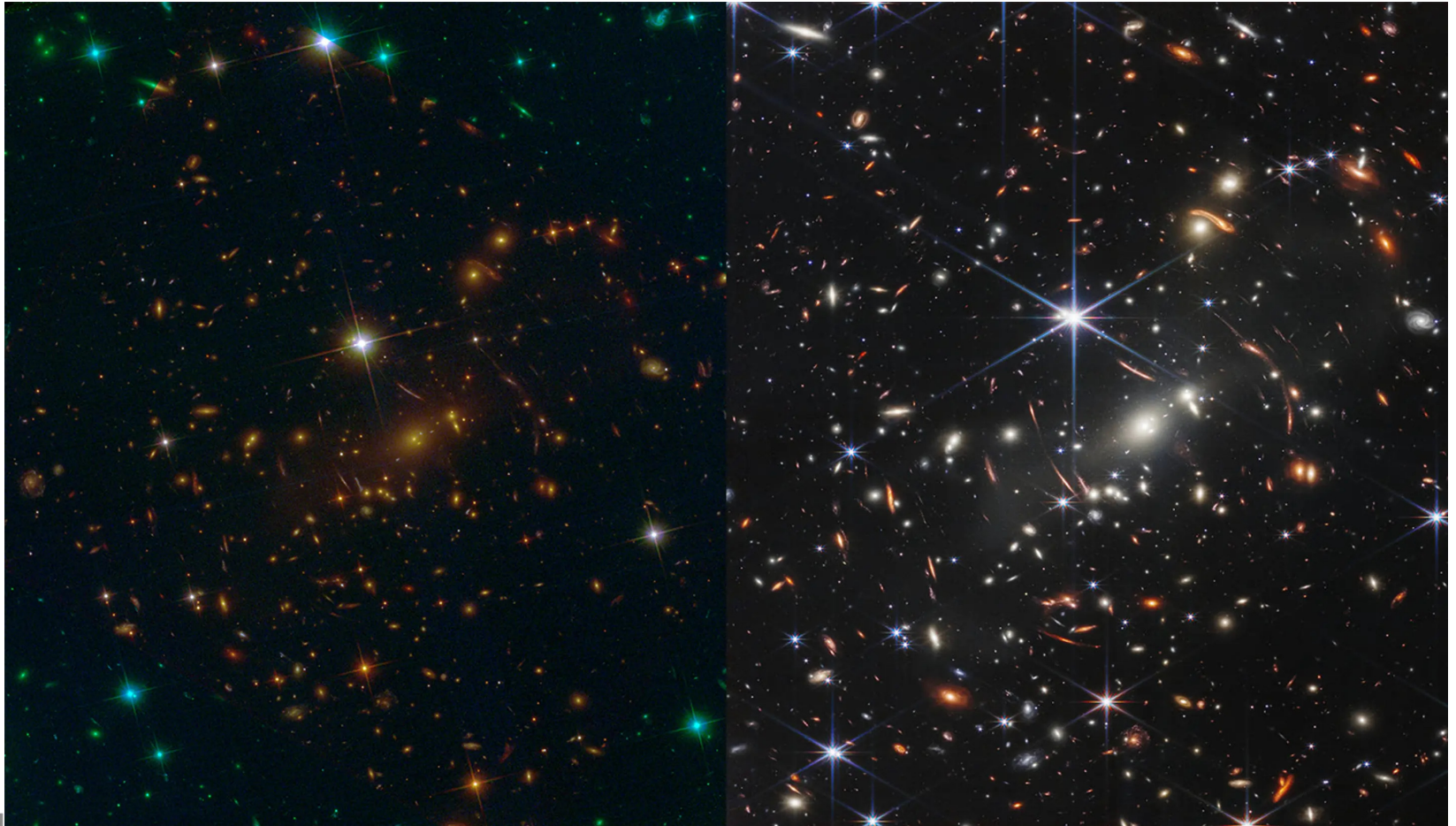


Credit: NASA/ESA



En jämförelse mellan Hubble och JWST (Credit NASA/ESA)

SMACS 0723 galaxer Ap 17 år 200 4 miljarder år





Vad lärde vi oss idag?

1. **Vad är galaxer?** Galaxerna är stora system, som består av stjärnor, gas och stoftpartiklar, omgivna av en stor halo av mörk materia
2. **Vad är den kosmologiska standardmodellen?** Λ CDM-modellen består vårt universum av mörk materia (23%), mörk energi (73%), och vanligt atomiskt materia (4.4%). Vi förstår inte helt vad mörk materia är och vi förstår inte alls vad mörk energi är.
3. **Hur uppstår galaxer?** Den mörka materian har en avgörande betydelse för galaxernas uppkomst. Utan mörk materia skulle galaxerna inte ha hunnit uppstå från de små fluktuationerna som har observerats i den kosmiska bakgrundsstrålningen. Galaxerna uppstår då gas kyls ner och bildar stjärnor i halon som består av mörk materia.
4. **Hurudana var de första galaxerna?** De vara små och hade en oregelbunden struktur. De första stjärnorna var mycket massiva och de levde korta liv som slutade i en våldsam död (supernovor).
5. **Motsvarar observationerna teorin?** Ja, de första galaxerna som vi har observerat var små och deras massor var av rätt storleksordning. De nya observationerna från JWST håller på och revolutionera galaxforskningen.