



Mitä uutta avaruusteleskooppi James Webb kertoo galaksien ja tähtien synnystä ja omasta aurinkokunnastamme?

Peter Johansson, Astrofysiikan professori
Fysiikan laitos, Helsingin yliopisto

Skepsis ry. Luento

Helsinki 5.4.2023



Tällä luennolla käsitellään

1. Mitä ovat planeetat?
 2. Mitä ovat tähdet ja miten ne kehittyvät?
 3. Mitä ovat galaksit ja miten ne syntyvät?
 4. Millainen on James Webb avaruuskaukoputki?
 5. Mitä James Webbin ensimmäiset kuvat kertovat meille?
 6. Mitä opimme?
- Värikoodi kertoo missä aiheessa mennään. **Luennon** oppimistavoitteena on ymmärtää mitä maailmankaikkeuden perusrakenteet ovat ja mitä voimme oppia niiden synnystä ja kehityksestä James Webb avaruuskaukoputken avulla.



Maailmankaikkeuden rakenteet

1. **Planeetta:** Kappale, joka on riittävän massiivinen ollakseen pyöreä. Ei tuota fuusioenergiaa. Kiertää keskustähteä radallaan, jonka painovoimakenttä dominoi.
2. **Tähti:** Massiivinen plasmapallo hydrostaattisessa tasapainossa (painovoima $\leftrightarrow$ kaasun paine), joka tuottaa energiaa fuusioreaktioissa.
3. **Galaksi:** Suuri tähdistä, kaasusta ja pölystä muodostunut järjestelmä joka sijaitsee pimeän aineen halossa.





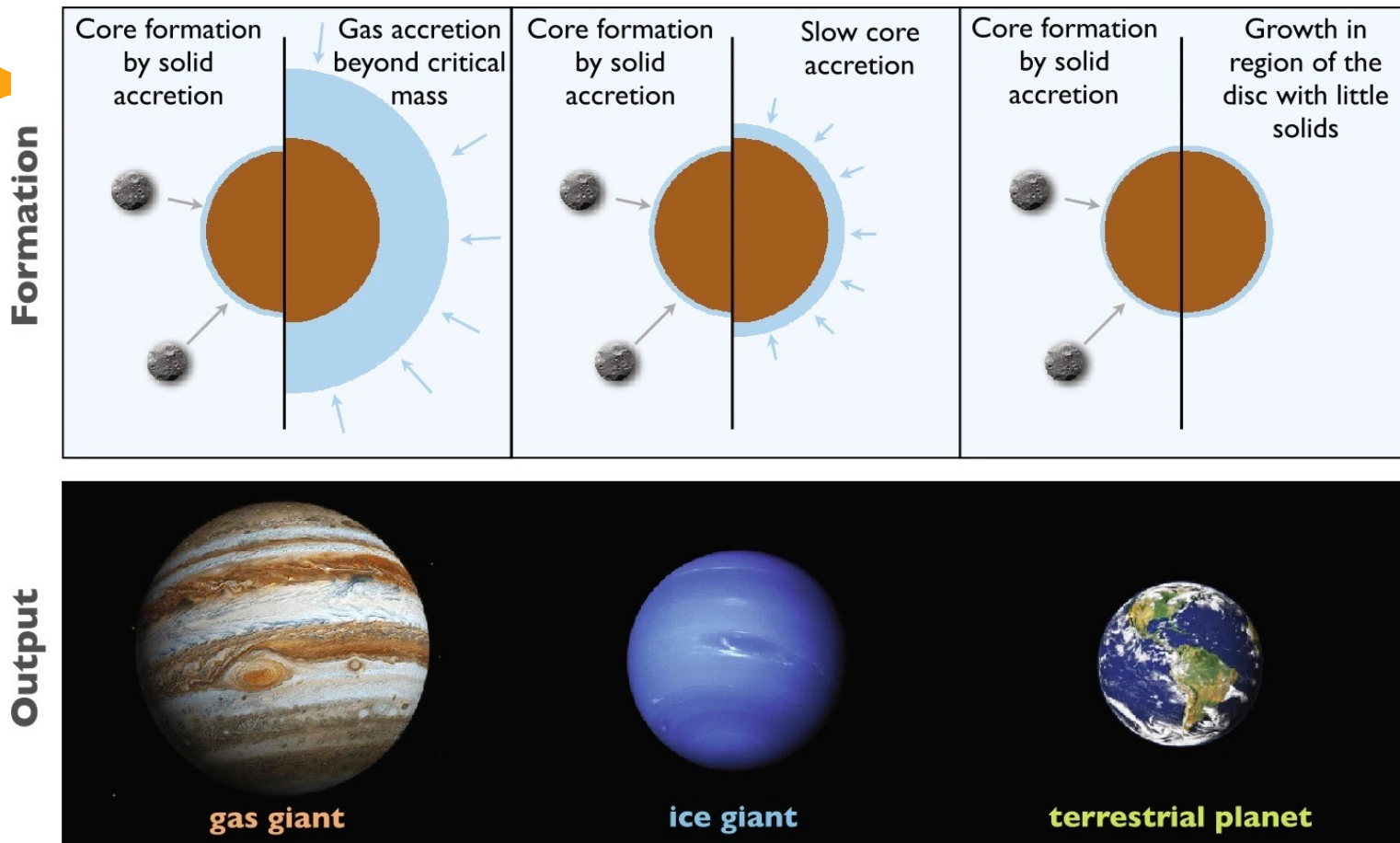
1. Aurinkokunnan planeetat

- Aurinkokunnan sisimmällä neljällä planeetalla on korkeat tiheydet (kivi-metallikoostumus), kun taas ulkoplaneetat ovat kaasumaisia matalan tiheyden kappaleita.
- Planeettojen syntyteorioiden tulisi selittää nämä havainnot.





Planeettojen synty

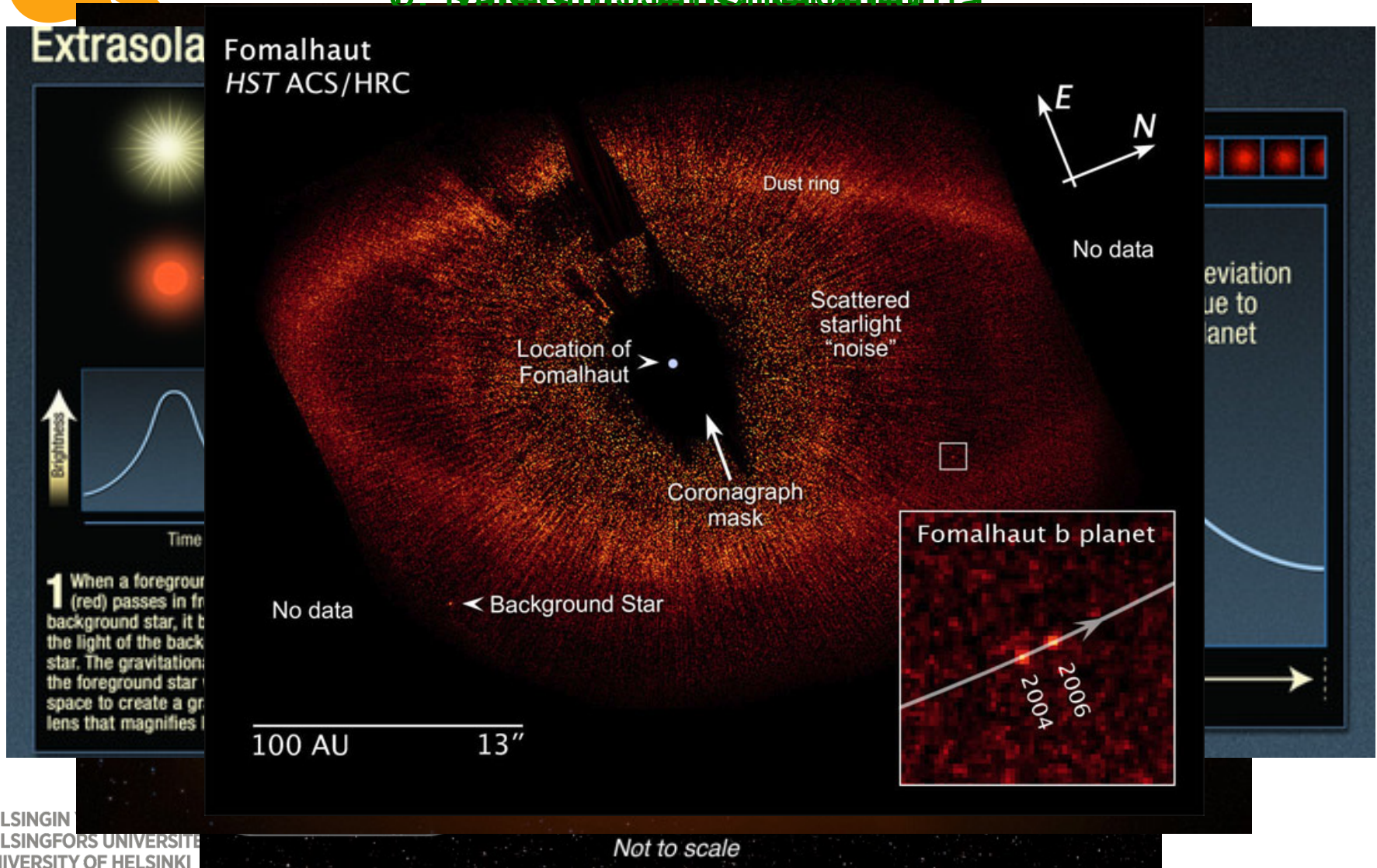


- **Planeetat** syntyvät tähtiä kiertävissä kiekkoissa, kun pienistä pölyhiukkasista kasvaa ensin kivenmurikoita ja myöhemmin **planeetta-alkioita** törmäysten kautta. Kaasuplaneetat syntyvät niin sanotun ”lumirajan” takana.



Eksoplaneettojen etsintä

1. Suora havainto
2. Välikappaleiden avulla
3. Välikappaleiden avulla
4. Suoratiivakainneotelmä





Eksoplaneettojen ominaisuuksia

- **Kuumat Jupiterit:** Ensimmäiset löydetty eksoplaneetat olivat massiivisia kaasujättiläisiä jotka kiertävät hyvin lähellä emotähteään.
- **Pienemmät planeetat:** Suurin osa näistä ovat Neptunuksen kaltaisia jääjättiläisiä, mutta on olemassa myös merkkejä pienemmistä kivi/rauta-planeetoista.
- **Planeettoja, joilla on "maan-kaltaisia" olosuhteita on jo löydetty ja ensimmäinen aidosti Maata muistuttava planeetta löydetään mahdollisesti noin 5-10 vuoden sisällä.**



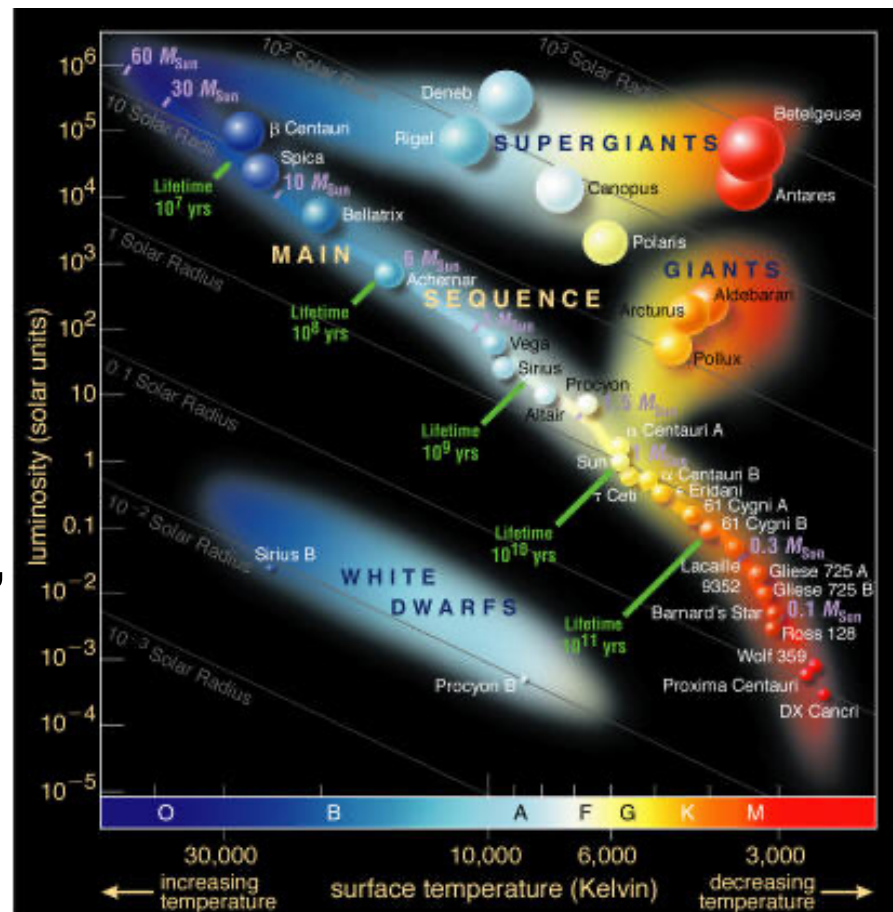
Taitelijan näkemys Proxima B planeetasta.



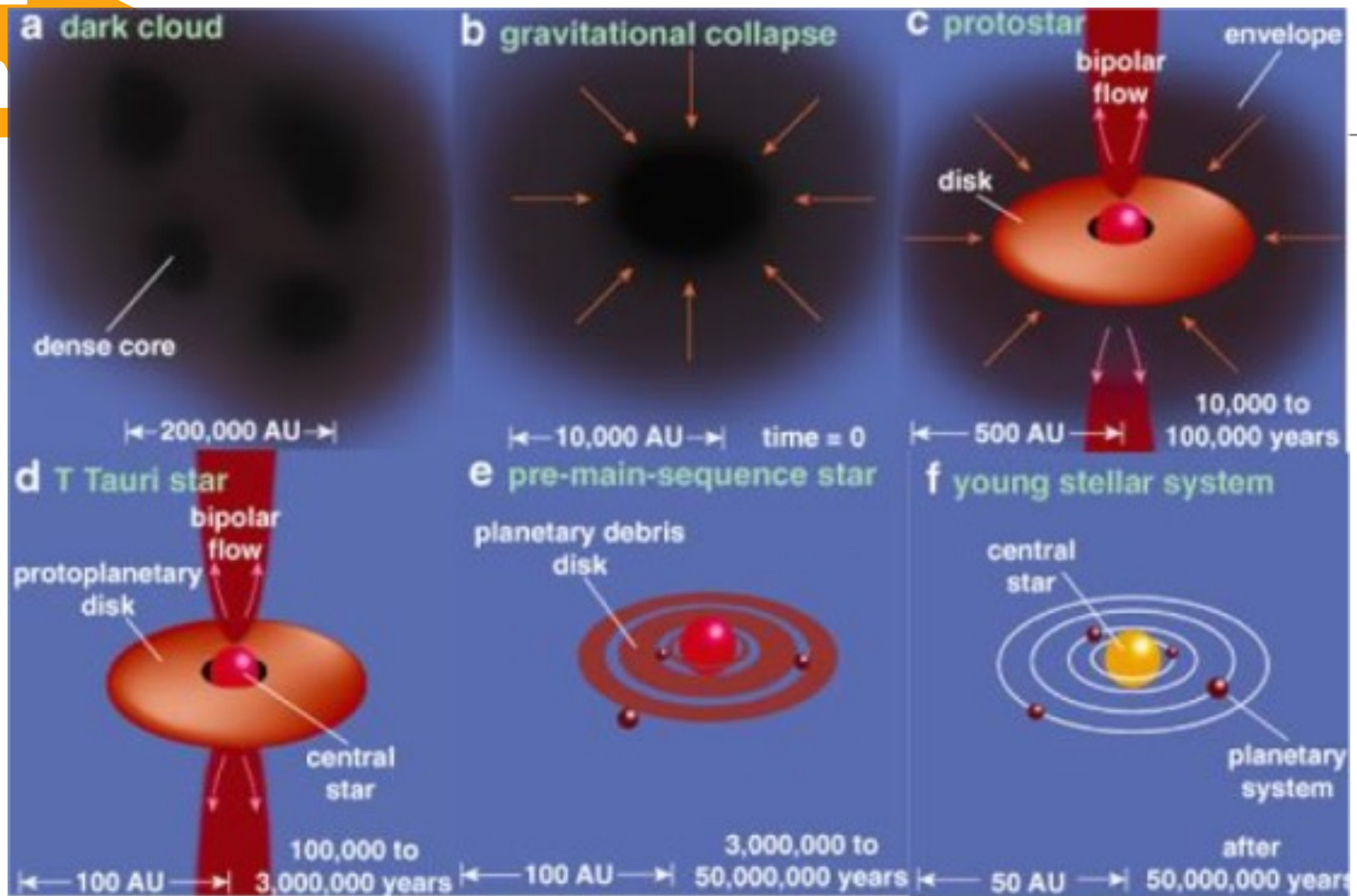


2. Tähtien rakenne ja kehitys

- Tähtien elinikä ja valovoima riippuvat voimakkaasti tähden massasta. Mitä suurempi massa sitä kirkkaampi tähti, mutta sitä lyhyempi sen elinikä on.
- Suurimassaiset tähdet elävät vain muutamia miljoonia vuosia, keskimassaiset tähdet kuten aurinko 10 miljardia vuotta ja punaiset kääpiöt jopa satoja miljardeja vuosia.



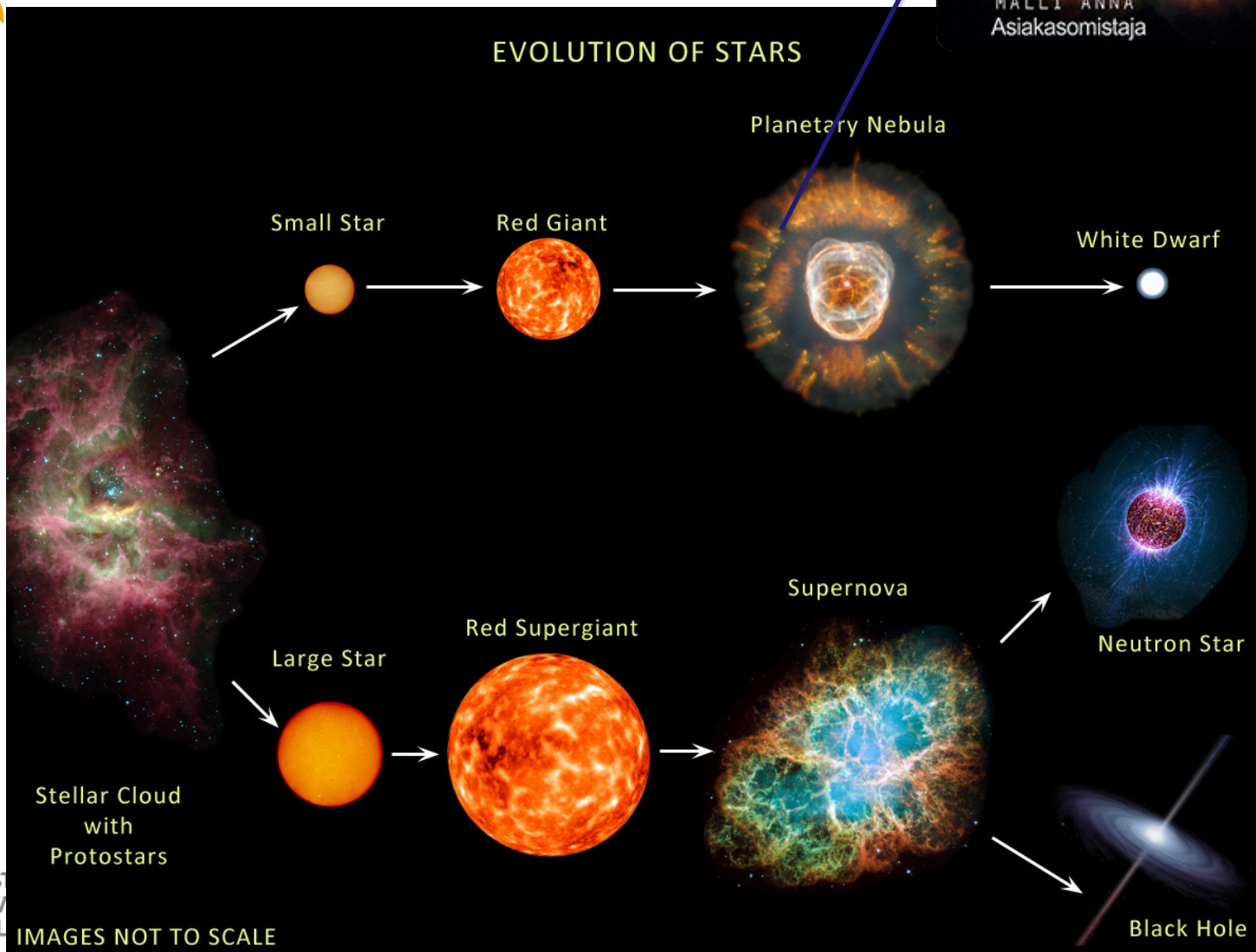
Tähtien synty





Tähtien kehitys

NGC 2818





Ensimmäiset tähdet

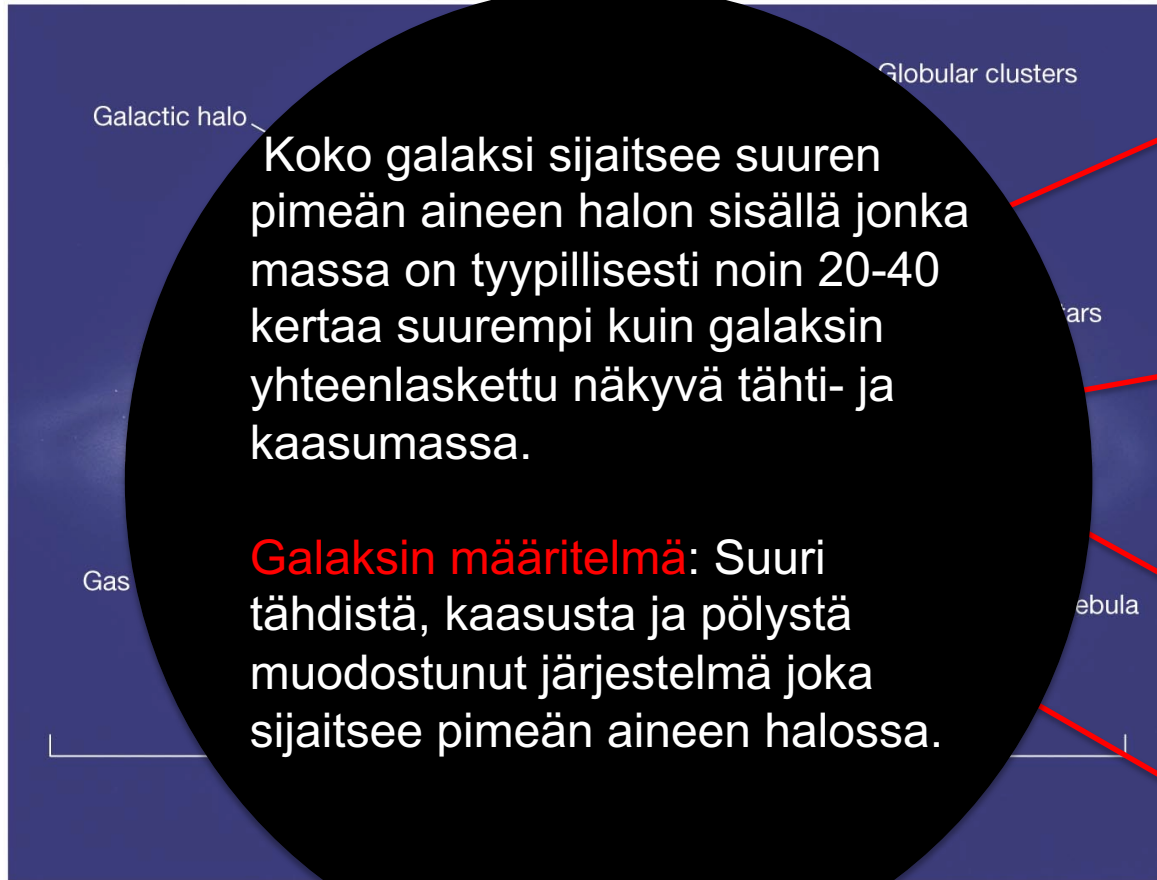
- Alkuräjähdyksessä syntyi 75 % vetyä, 25 % heliumia ja hyvin pieniä määriä litiumia, mutta ei lainkaan raskaita alkuaineita.
- Ensimmäiset tähdet syntyivät tästä kaasusta ja koska jäähtyminen oli tehotonta puuttuvien raskaiden aineiden takia ($T \approx 300$ K), tarvittiin hyvin suuri massa ennen kuin tähti pystyi ylittämään kaasun paineen ja syntyä.



Ensimmäiset tähdet syttyivät noin 200-300 miljoonaa vuotta alkuräjähdysen jälkeen ja olivat hyvin massiivisia ($M \approx 100-300 M_{\odot}$). Tähdet elivät hyvin lyhyen ajan



3. Galaksien synty ja kehitys: Rakenneosat



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 **keskuspulistuma** 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.

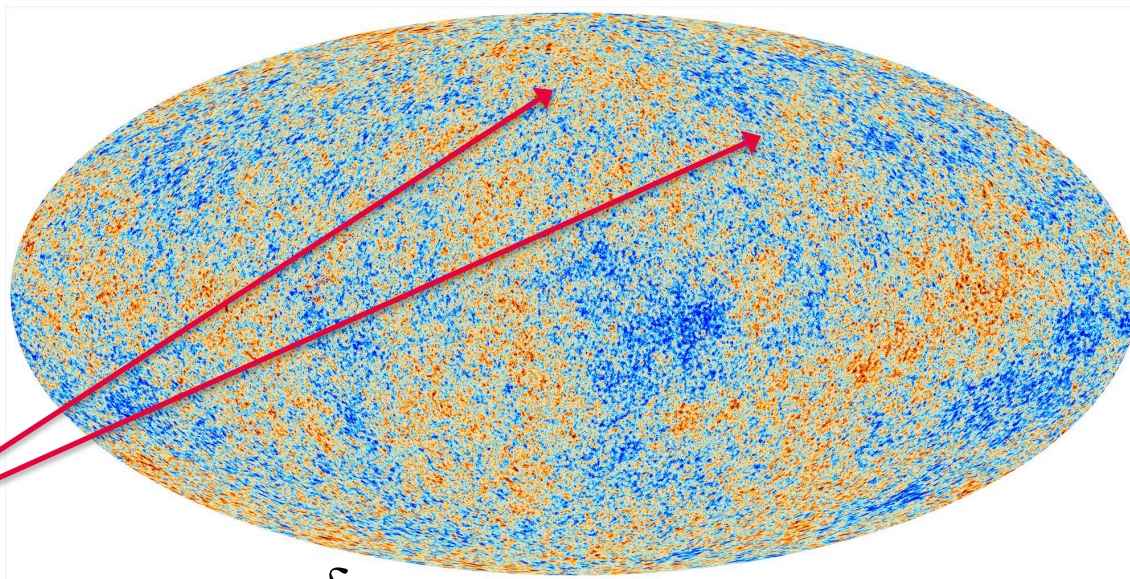
Galaksin ytimessä on yleensä **supermassiivinen musta aukko**.

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



Kosminen taustasäteily

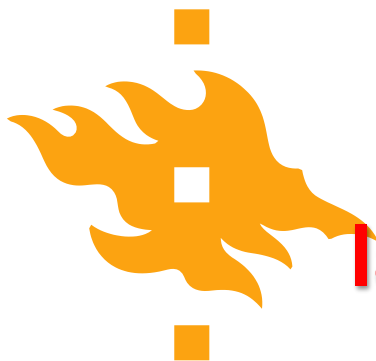
Maailmankaikkeuden ikä noin 380 000 vuotta $z=1100$



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

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

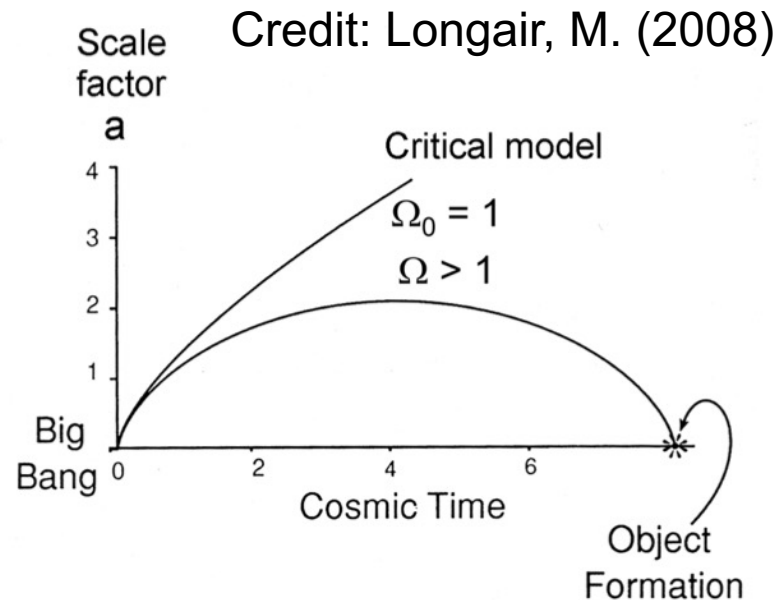
Miten galaksit muodostuivat pienistä tiheyshäiriöistä?



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 noin ~ 1100 .
- Standardimallissa ei ollut siis riittävästi aikaa tiheyshäiriöiden kasvuille.
Galakseja, tähtiä ja meitäkään ei pitäisi siis olla olemassa!

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

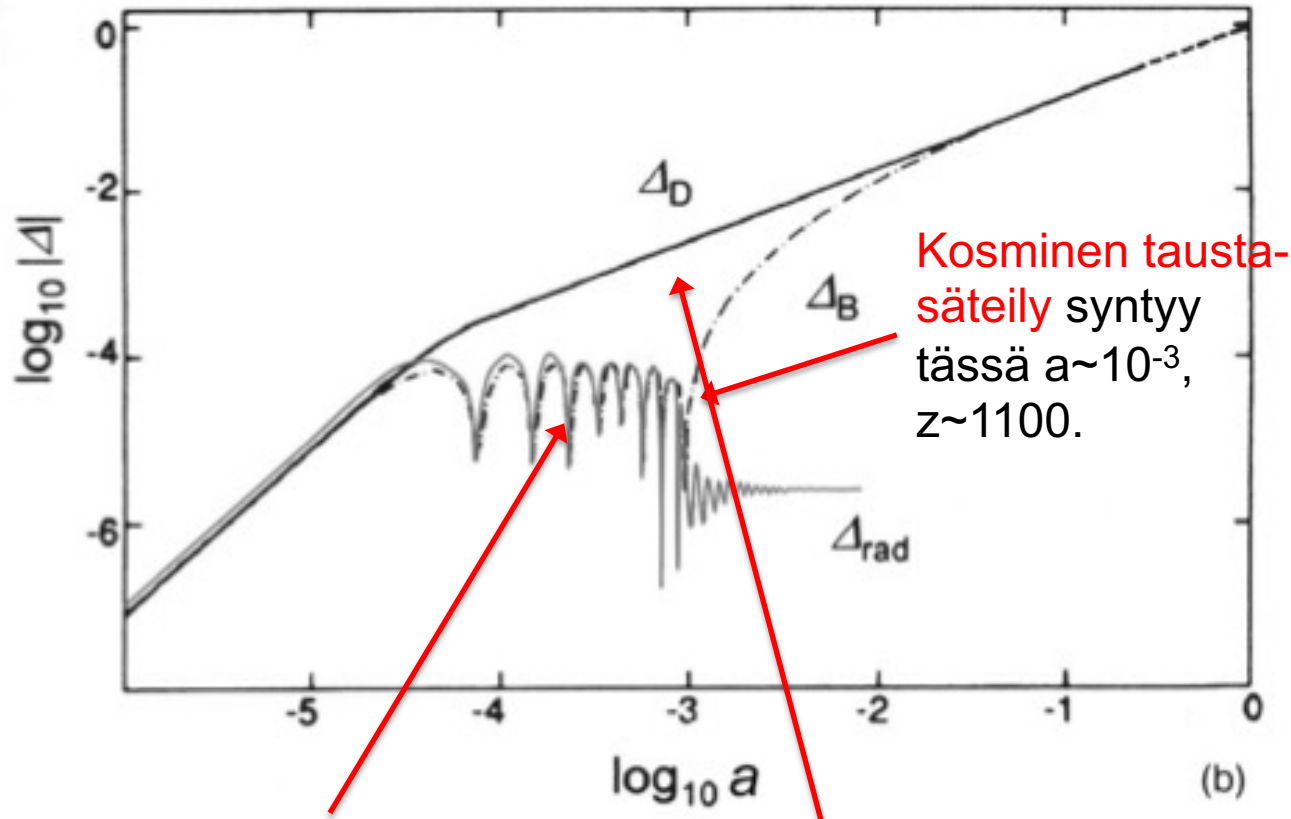


$$\delta_k \propto t^{2/3} \propto a = (1 + z)^{-1}$$



Galaksien synty

Credit: Longair, M. (2008)



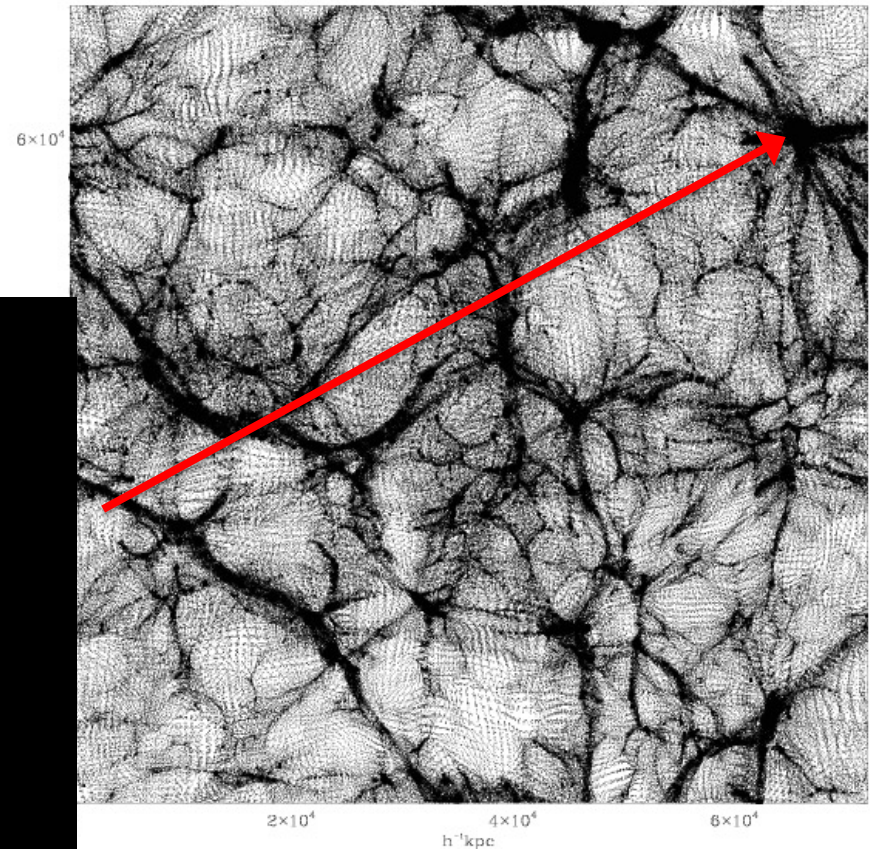
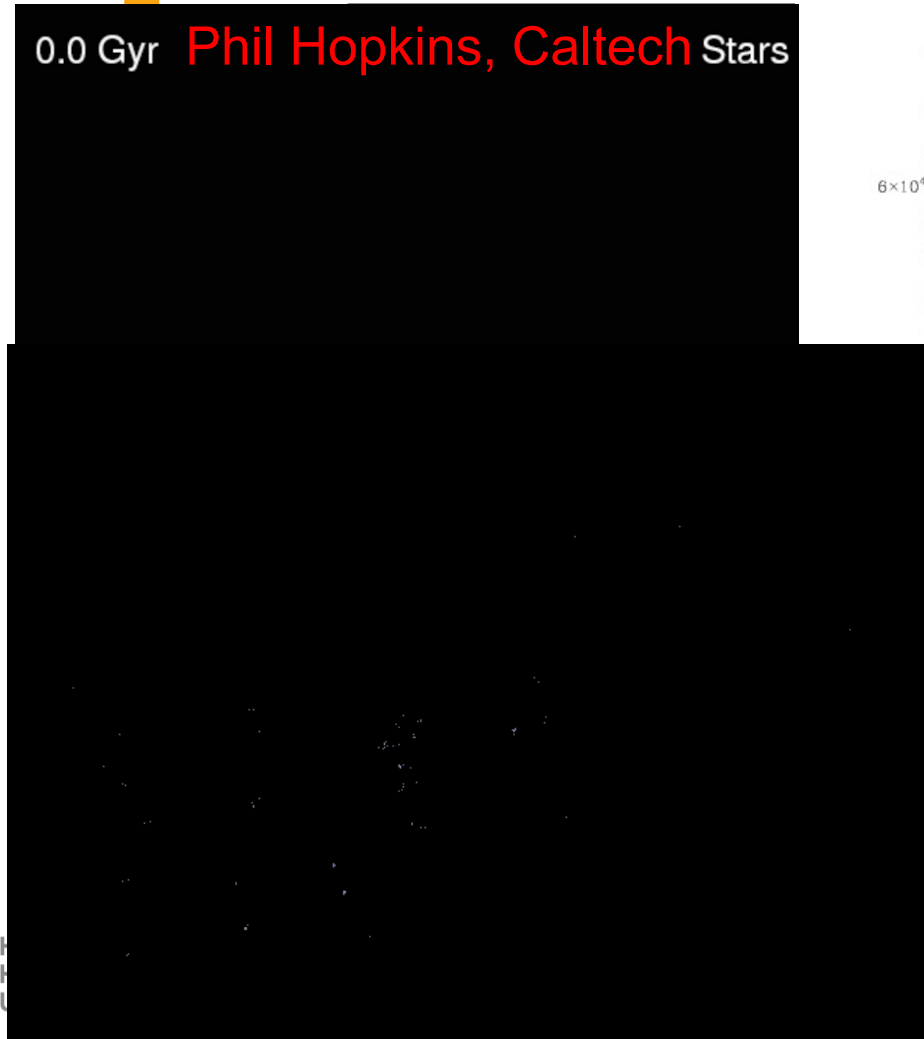
Räteilylinjaryömyjä kukaan $M \sim 10^5 M_\odot$ ja yhä voimakkaita sitoumattakäyttään
pimeä aine ei voi kasvaa $M \sim 10^{16} M_\odot$ kuoppiin.



Galaksien synnyn numeerinen mallintaminen

Galaksitörmäykset

Kosmologinen galaksisimulaatio:

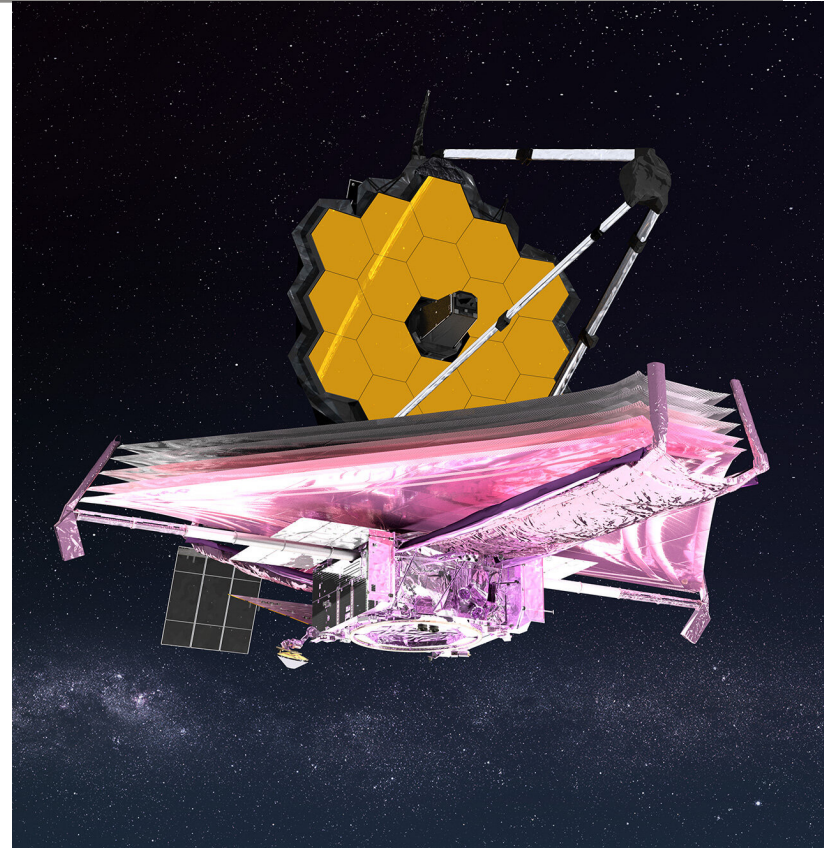


100 Mpc=326 miljoonaa valovuotta



4. James Webb (JWST) avaruus- kaukoputki

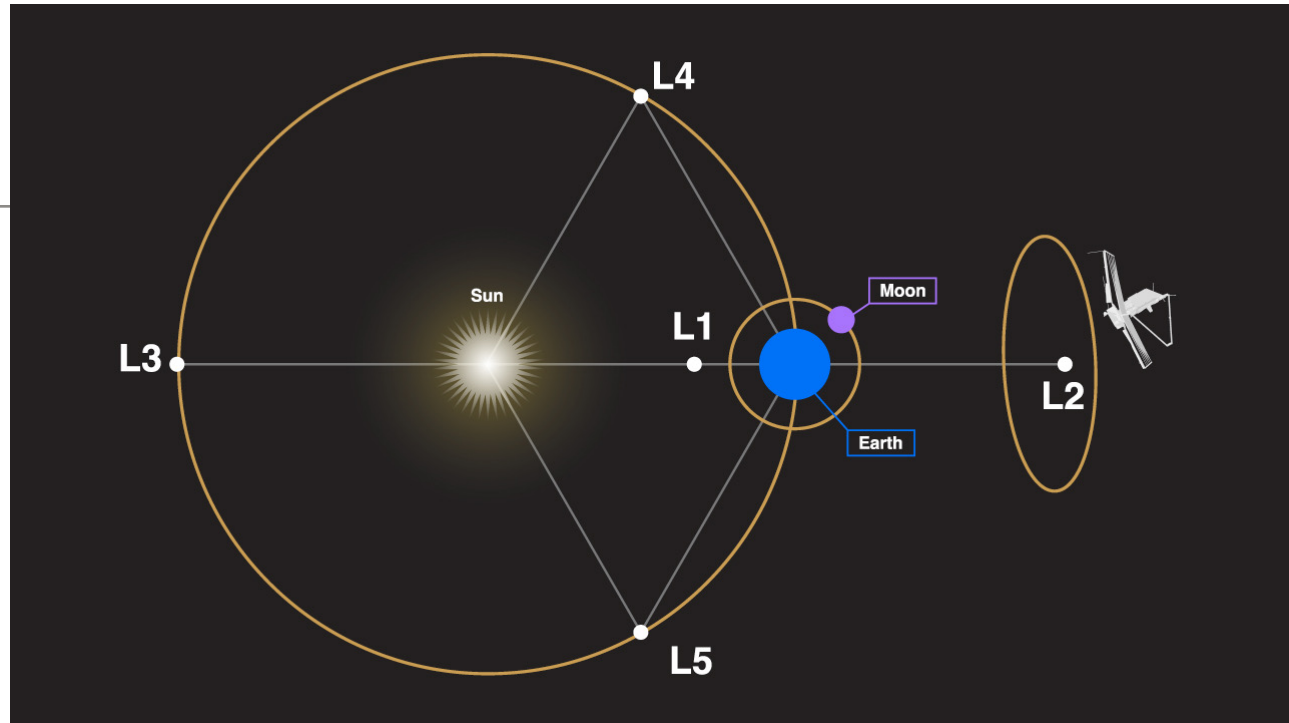
- Joulupäivänä 2021 avaruuteen laukaistu James Webb avaruuskaukoputki (JWST) on täysin mullistamassa tähtitieteen.
- JWST:n pääpeili on halkaisijaltaan 6.5 metrinen (6x suurempi pinta-ala kuin Hubblella) ja se koostuu 18 pienemmästä, kuusikulmaisesta ja kullalla päällystetystä berylliumpeilistä, joita ohjataan pienillä moottoreilla pääpeilin kaarevuuden säätämiseksi.
- Teleskooppi suojaa Auringon, Maan ja Kuun lämpösäteilyltä tenniskentän kokoinen viisinkertainen aurinkosuoja.



Credit: NASA/ESA



James Webbin käyttöönotto



Credit: NASA/ESA

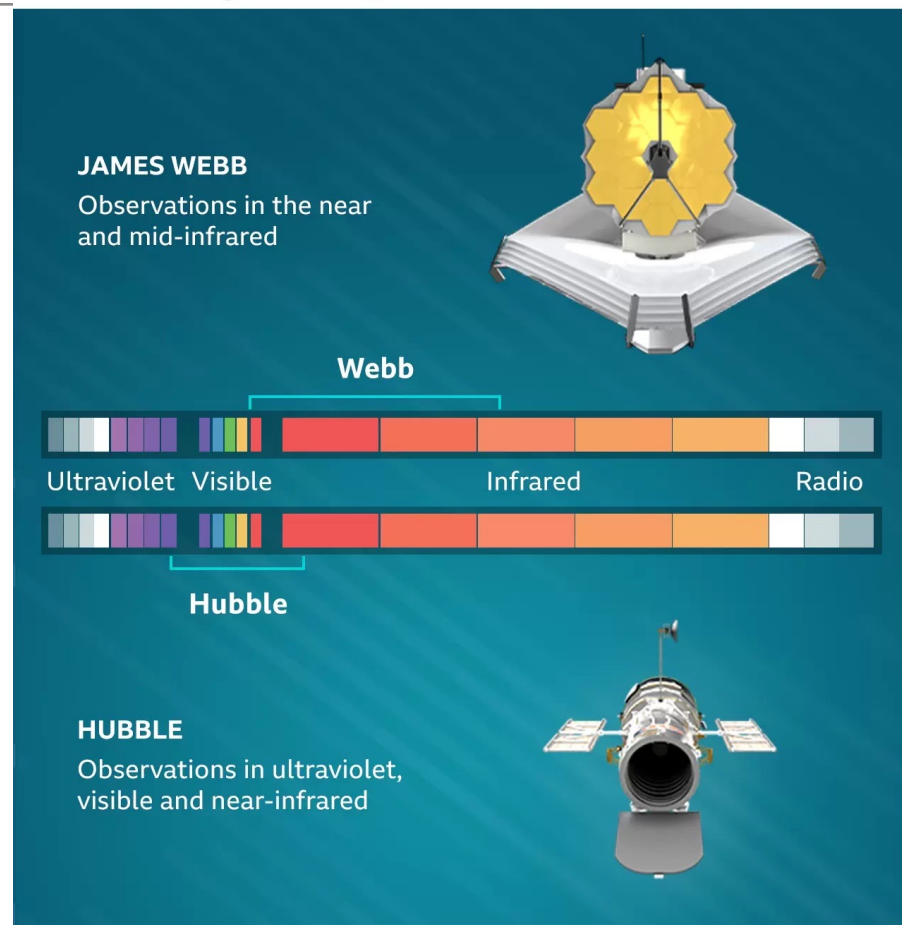
- James Webb oli pakattu pieneen tilaan mahtuakseen laukaisurakettiin. Kaukoputken aurinkosuojan ja peilien avaamiseen, sekä **peilien ja havaintoinstrumenttien kalibrointiin meni yhteensä noin 6 kuukautta.**
- Teleskooppi kiertää Aurinkoa Lagrangen L2-pisteessä **1.5 miljoonan kilometrin päässä Maasta**, eikä sitä voida siten huoltaa kuten Hubblea. Kaukoputken arvioitu **toiminta-aika on vähintään 10 vuotta.** Käyttöiän yläraja määräytyy polttoaineen, jäähdytysnesteen ja laitteiden vikaantumisen mukaan.



James Webbin havaintoinstrumentit

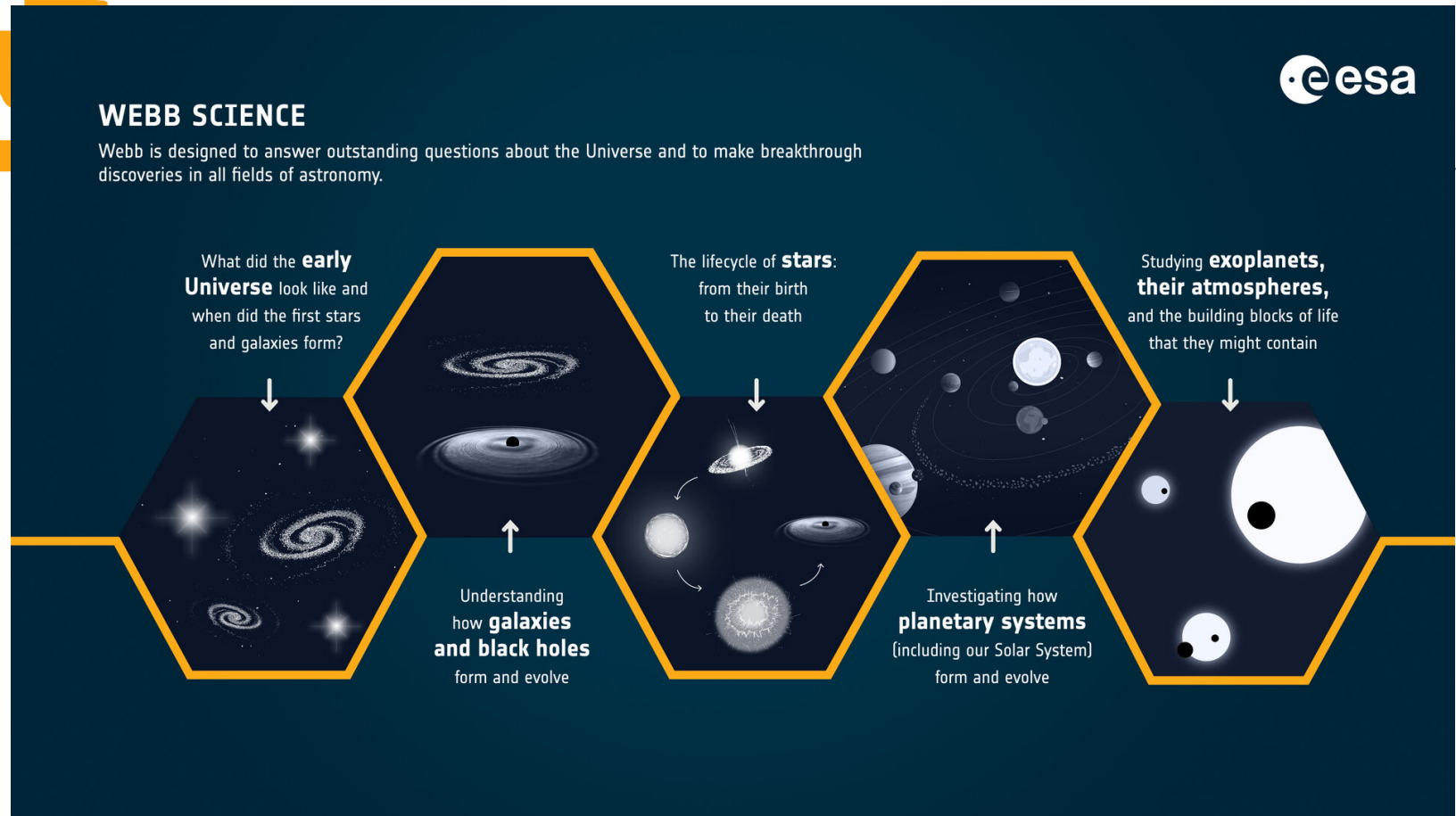
- JWST optimoitu infrapuna-alueen havaintoja varten, toisin kuin Hubble.
1. **NIRCAM:** Pääkamera, joka on herkkä aallonpituuksille 0.6-5 μm .
 2. **NIRSPEC:** Spektrografi, havaintoja aallonpituuksille 0.6-5 μm .
 3. **MIRI:** Yhdistetty kamera ja spektrografi aallonpituuksille 5-28 μm . Aktiivinen jäähdytys.
 4. **FGS/NIRISS:** Käytetään kaukoputken suuntaamiseen.

Telescopes cover different parts of the electromagnetic spectrum



Source: Esa

James Webbin tutkimuskohteet

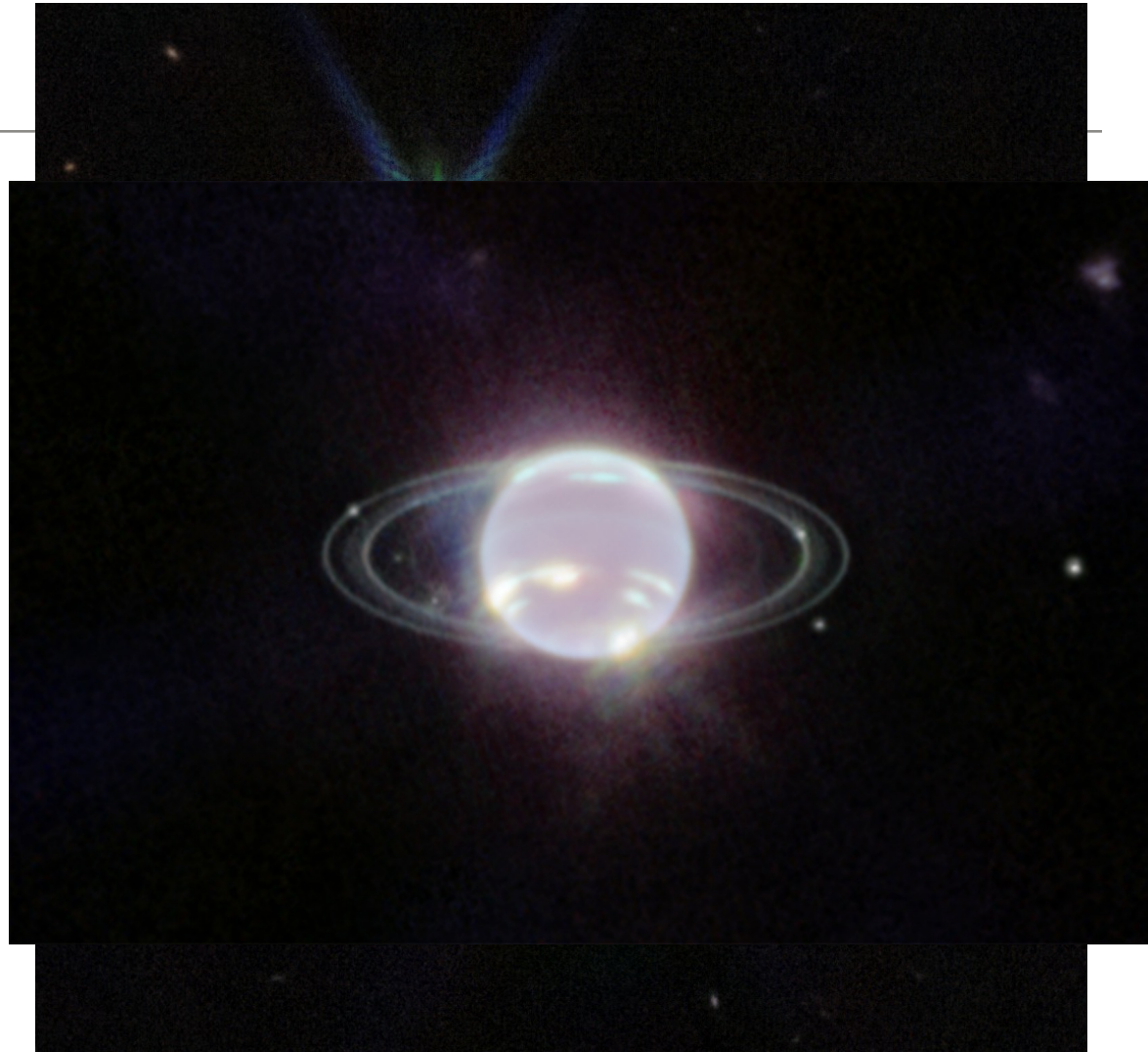


- Infrapunahavaintojen kohteina ovat etenkin maailmankaikkeuden ensimmäiset galaksit ja mustat aukot, syntyvät pölyn peittämät tähdet, sekä eksoplaneetat.

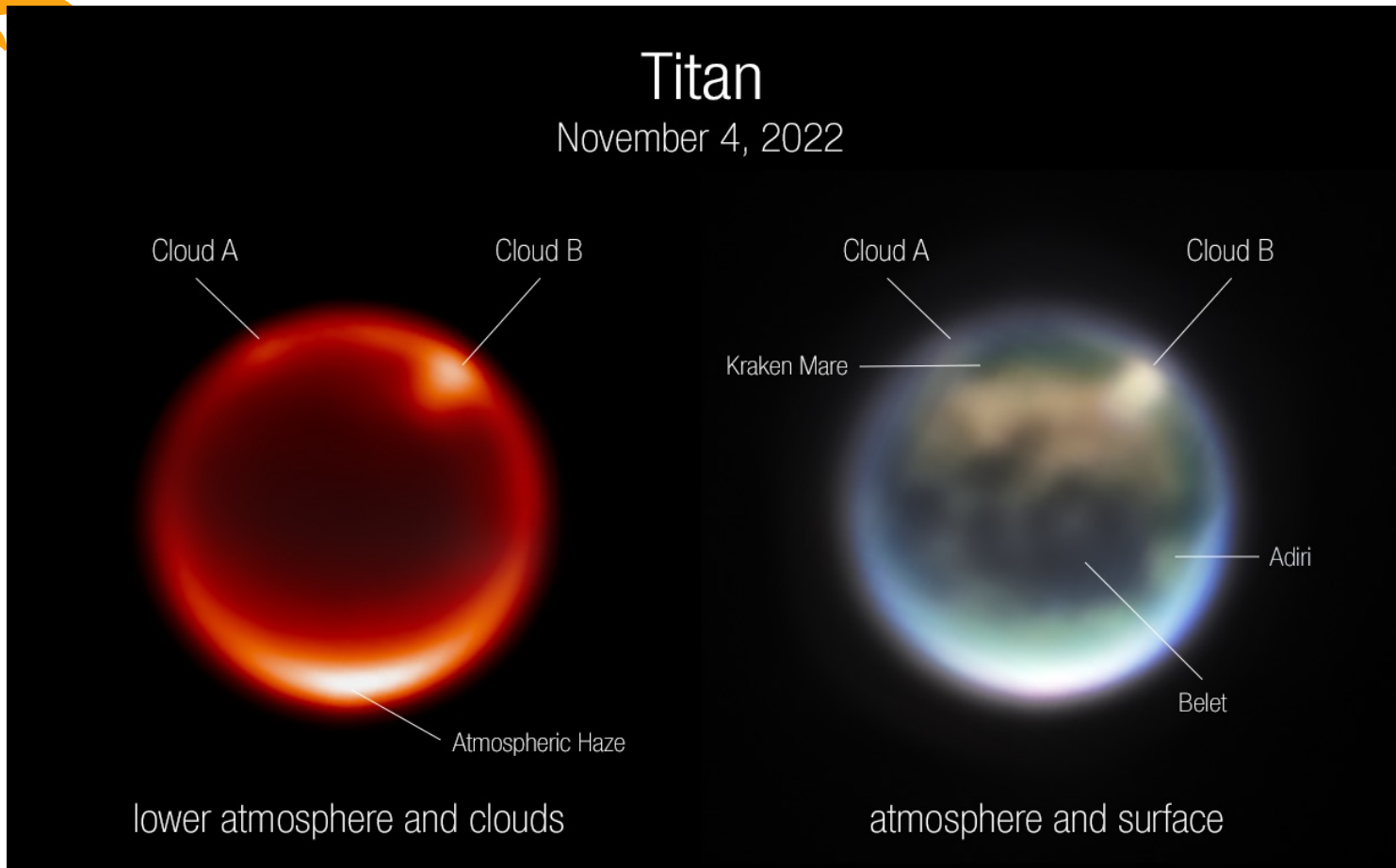


5. James Webbin (JWST) ensimmäiset kuvat: Aurinkokunta I

- **Nähtäville** Jupiterin kuut **NIRCAM**:in **Reunassa**. Nähtävillä on suurin tarkkuudella erityisen kirkas **Nestä** kestä 30 kymmentä **kirkkaat** **pistat** **neistä** **ama** **aberratio** **iskä** **on** **sy** **myös** **Nejät** **pukse** **siniseen väriin.**)



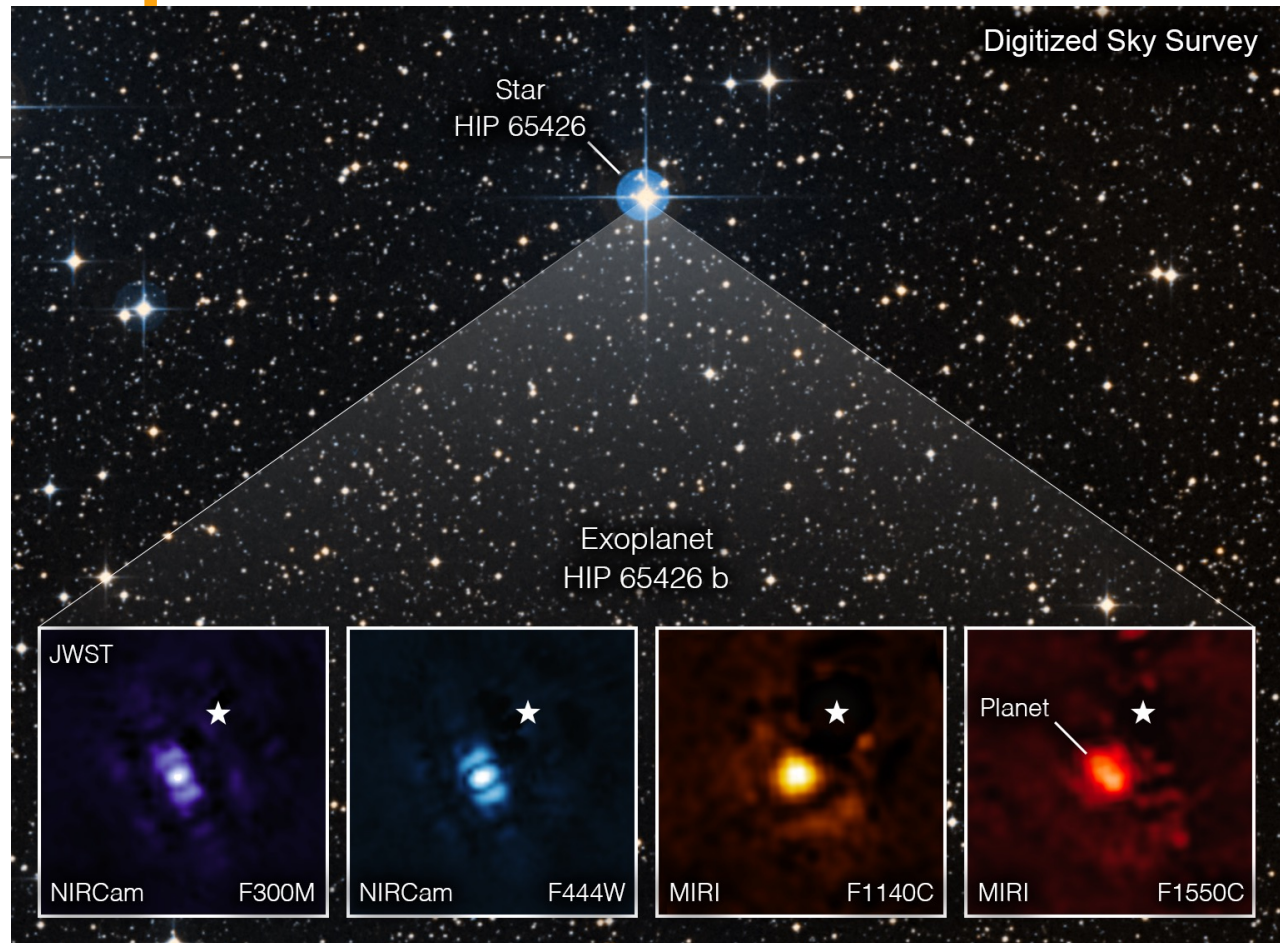
James Webbin ensimmäiset kuvat: Aurinkokunta II



- **Pilviä Titanin** (Saturnuksen kuun) ilmakehässä NIRCAM:in kuvassa. **Kraken Mare** on Titanin suurin **metaanijärvi**.



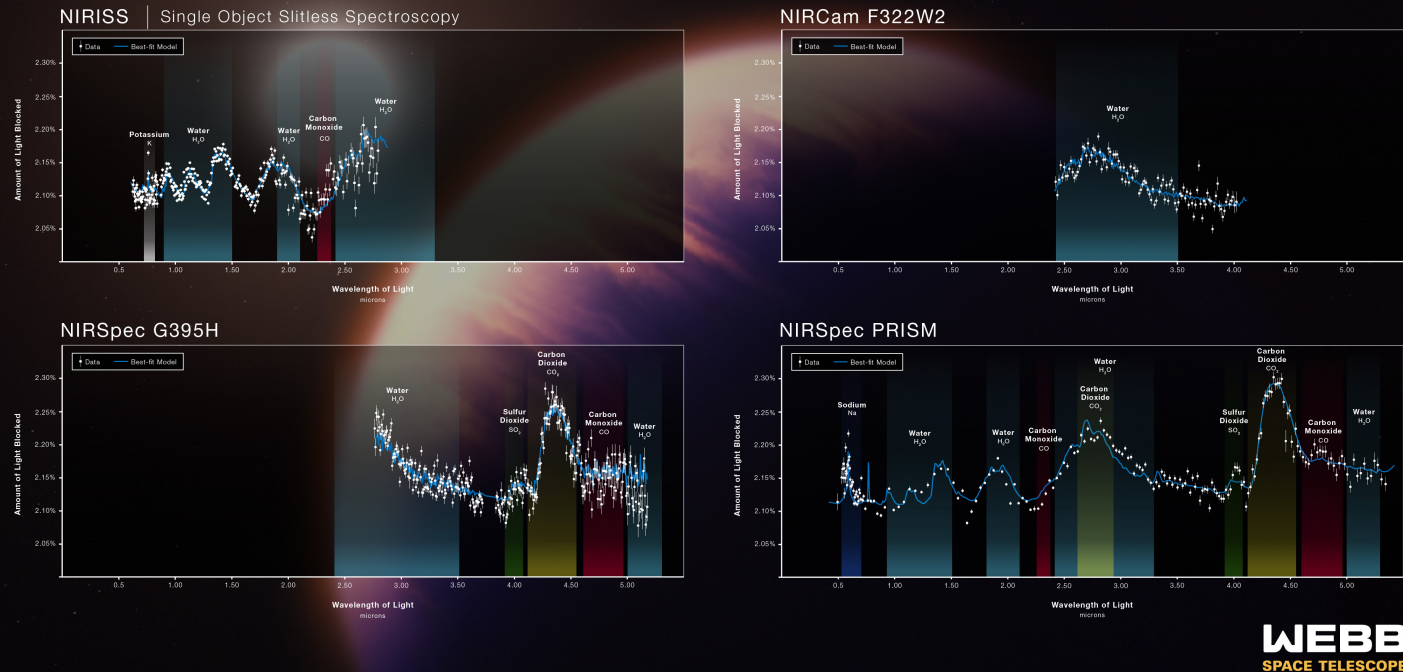
James Webbin ensimmäiset kuvat: Eksoplaneetat I



- **HIP 65426 b super Jupiter-eksoplaneetta** JWST:n kuvaamana.
Massa: $\sim 7.1 M_{\text{jup}}$, Rata: ~ 87 AU, Etäisyys: ~ 385 valovuotta.

James Webbin ensimmäiset kuvat: Eksoplaneetat II

HOT GAS GIANT EXOPLANET WASP-39 b ATMOSPHERE COMPOSITION



- JWST:n spektrihavaintojen avulla tämän planeetan ilmakehästä on löytetty vettä (H₂O), hiilidioksidia (CO₂), hiilimonoksidia (CO) kalsiumia (K), rikkiidioksidia (SO₂) sekä Natriumia (Na).
- Taiteilijan näkemys WASP-39b planeetasta. Kyseessä on kuuma Jupiter. Massa: ~0.28 M_{Jup}. Rata: ~0.05 AU. Etäisyys: ~700 valovuotta.



James Webbin ensimmäiset kuvat: Tähtienvälinen aine I

- **Syntyvä tähti** pimeässä L1527 IRS pilvessä noin 450 valovuoden etäisyydellä.
- Tähden tämän hetkinen massa noin 0.2 Auringon massaa, mutta **tähden massa kasvaa edelleen** (~1 Auringon massaa).
- Tähteen virtaa kaasua sivuilta, ja osa kaasusta karkaa napojen suuntaan kaasun ulosvirtauksissa.





James Webbin ensimmäiset kuvat: Tähtienvälinen aine II

- Kuuluisa tähtien syntyalue ('Pillars of creation') Kotkan sumussa (M16) noin 6500 valovuoden etäisyydellä.
- Kyseessä on NIRCAM/MIRI yhdistelmäkuva, jossa nähdään pölyn läpi suoraan tähtien syntyalueille. Tähtiä syntyy pylväiden päissä.





James Webbin ensimmäiset kuvat: Tähtienvälinen aine III



- Planetaarinen sumu (Eteläinen rengassumu). Tällainen sumu jää jäljelle Auringon kaltaisen tähden kuollessa. Huomaa valkoinen kääpiö sumun keskellä (himmeämpi piste oikeassa kuvassa). Etäisyys noin 2000 valovuotta.



James Webbin ensimmäiset kuvat: Galaksit I

- Kärrynpyörägalaksi
NIRCAM/MIRI
yhdistelmäkuvassa.
- Galaksiin törmäsi
pienempi seuralaisgalaksi
(ei näy kuvassa) noin 200
miljoonaa vuotta sitten.
Törmäys aiheutti
voimakkaan tähtiryöpyn
(eng. starburst).
- Etäisyys noin 500
miljoonaa valovuotta.





James Webbin ensimmäiset kuvat: Galaksit II

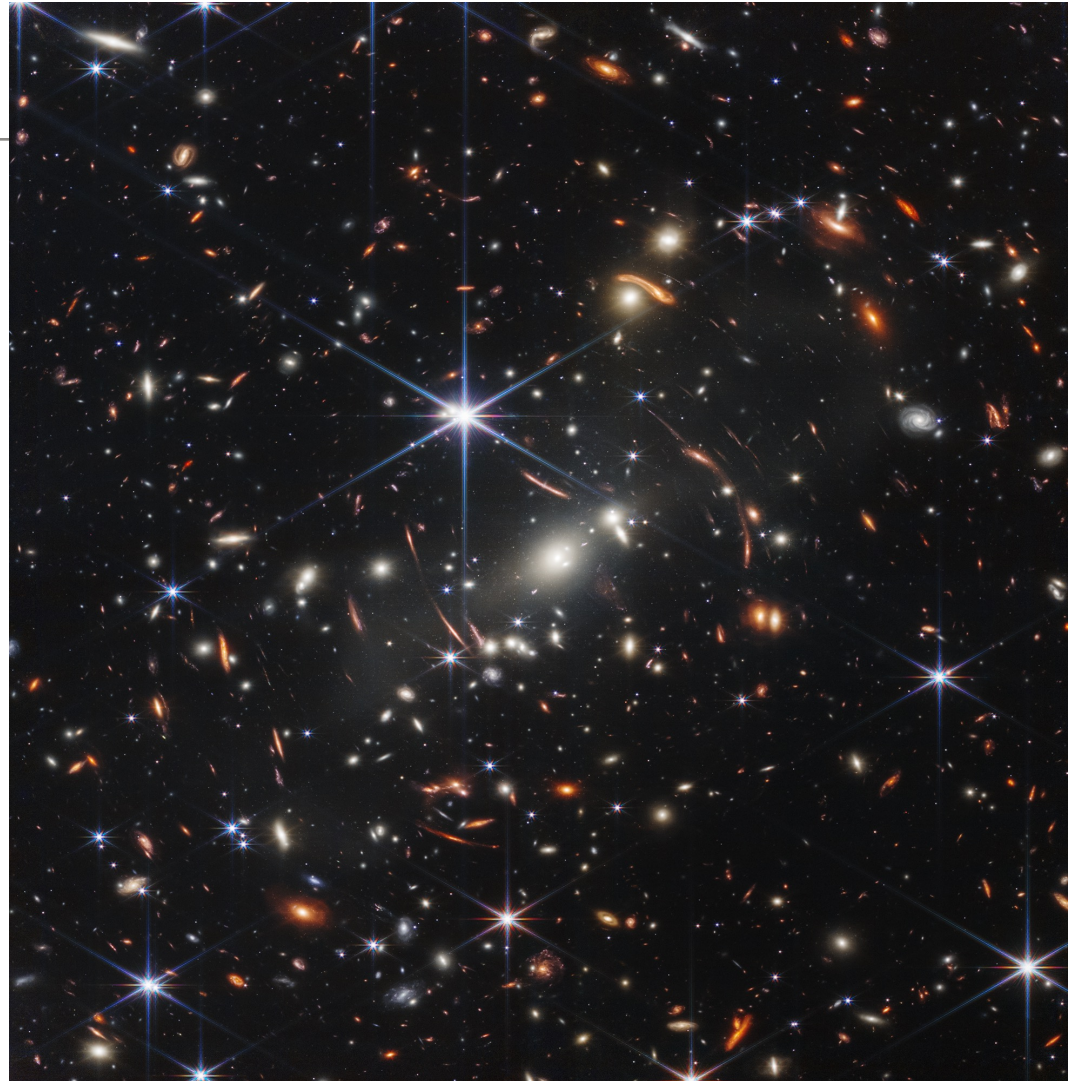
- Stephan's quintet on kompakti galaksijoukko, jossa on viisi galaksia.
- Vasemmanpuoleinen galaksi on etualan kohden, etäisyys vain 40 miljoonaa valovuotta, muuta galaksit ovat noin 300 miljoonan valovuoden päässä ja aidossa vuorovaikutuksessa.
- JWST:n NIRCAM/MIRI yhdistelmäkuvassa nähdään kaasushokkeja ja voimakasta tähtiensyntä.





James Webbin ensimmäiset kuvat: Galaksit III

- **SMACS 0723 galaksijoukko.** JWST:n ensimmäinen syvän taivaan NIRCAM kuva.
- Galaksijoukon galaksit ovat noin 4 miljardin valovuoden etäisyydellä ja ne toimivat **gravitaatiolinsseinä vielä kaukaisimmille alkugalakseille** (kuvan punaiset viirut).
- **Havaintojen mukaan tähtien ja galaksien synty käynnistyi hyvin aikaisin ja eteni yllättävän nopeasti.**





Mitä opimme?

1. **Planeetta:** Kappale, joka on riittävän massiivinen ollakseen pyöreä. Ei tuota fuusioenergiaa. Kiertää keskustähteä radallaan, jonka painovoimakenttää dominoi.
2. **Tähti:** Massiivinen plasmapallo hydrostaattisessa tasapainossa (painovoima $\leftrightarrow$ kaasun paine), joka tuottaa energiaa fuusioreaktiossa
3. **Galaksi:** Suuri tähdistä, kaasusta ja pölystä muodostunut järjestelmä joka sijaitsee pimeän aineen halossa. **Galaksien synty vaatii pimeää ainetta!**
4. **James Webb (JWST) avaruuskaukoputki:** JWST:n pääpeili on halkaisijaltaan 6.5 metrinen (suurin avaruuteen laukaistu peili). JWST optimoitu infrapuna-alueen havaintoja varten, toisin kuin Hubble. (JWST) on täysin mullistamassa koko tähtitieteen.
5. **JWST:n ensimmäiset kuvat:** JWST on kuvannut monipuolisesti planeettoja/eksoplaneettoja, tähtiä, tähtisumuja ja galakseja. JWST voi kuvata esim. kylmiä (planeettoja), pölyisiä (syntyviä tähtiä) sekä kaukaisia (galakseja) kohteita ennennäkemättömän tarkasti.