

Planck-satelliitti ja kaiken alku

Hannu Kurki-Suonio
Helsingin yliopiston fysiikan laitos

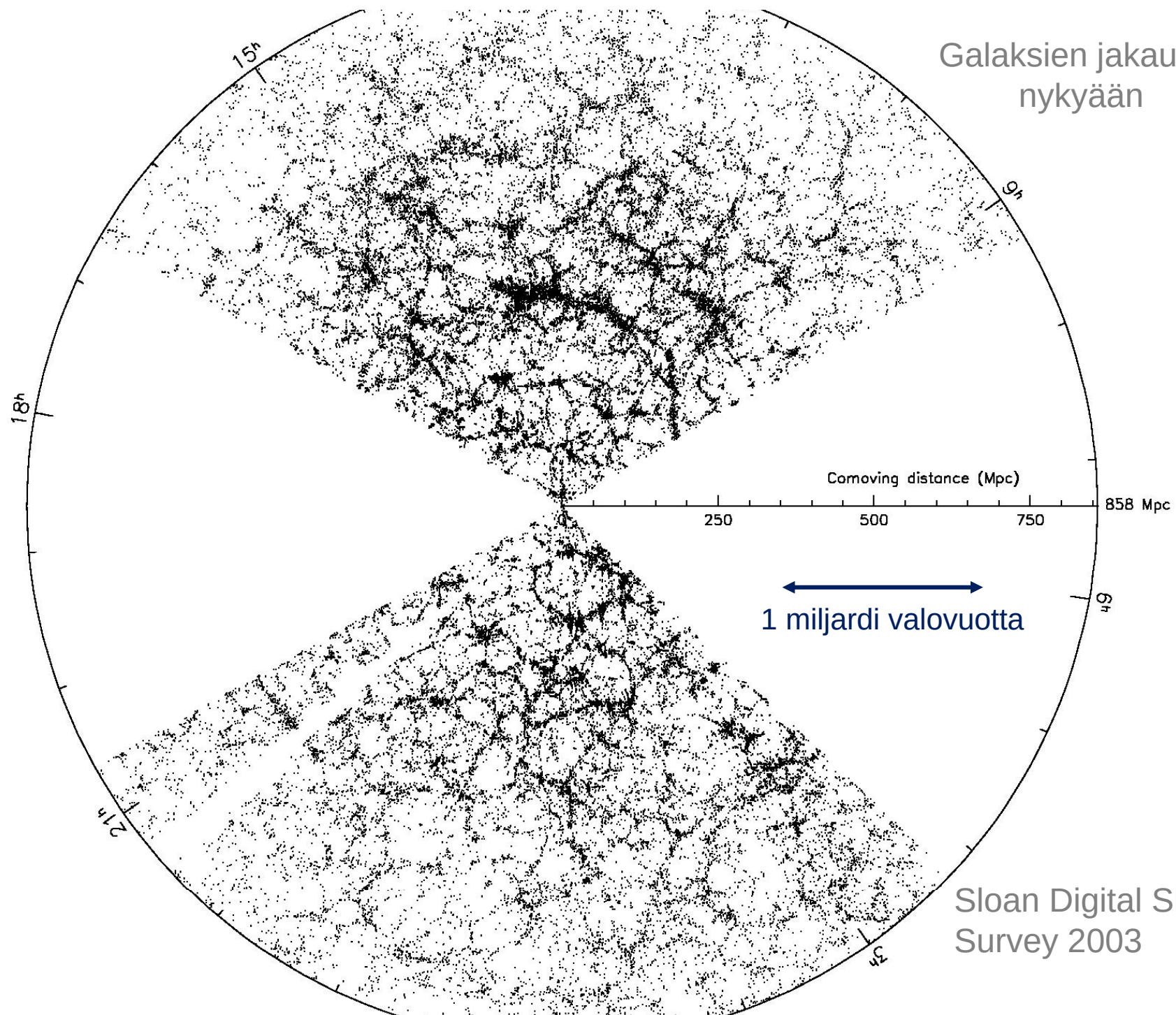
13.10.2009

Aine on kerääntynyt galakseiksi

Hubble Ultra Deep Field (NASA, ESA,
S. Beckwith (StScI) and the HUDF Team)

Galaksit
koostuvat tähdistä ja
tähtiä kiertävistä
planeetoista





Maailmankaikkeus laajenee

- kaukaiset galaksit etääntyvät meistä
- koska avaruus galaksien välissä laajenee
- yksittäinen galaksi ei laajene

Kauan sitten aine oli tiheään pakkautunut

- Ei ollut galakseja, tähtiä
- Universumi oli hyvin tasa-aineinen, kuuma, tiheä ja laajeni nopeasti
- Aine oli ionisoitunutta kaasua eli plasmaa
- Kutsutaan **alkuräjähdykseksi**
- Siitä on kulunut noin 14 miljardia vuotta
- **Mitä oli ennen alkuräjähdystä?**

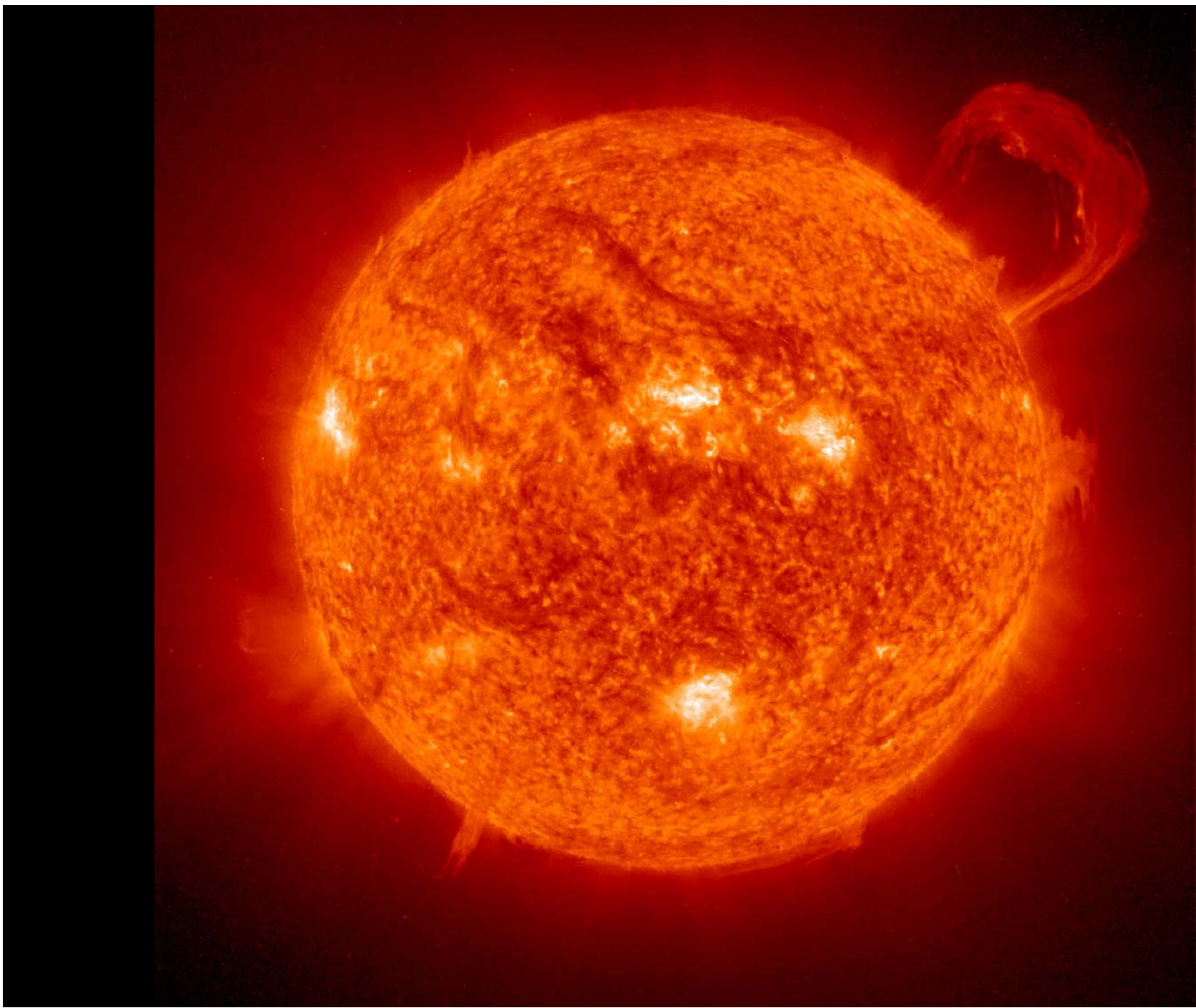
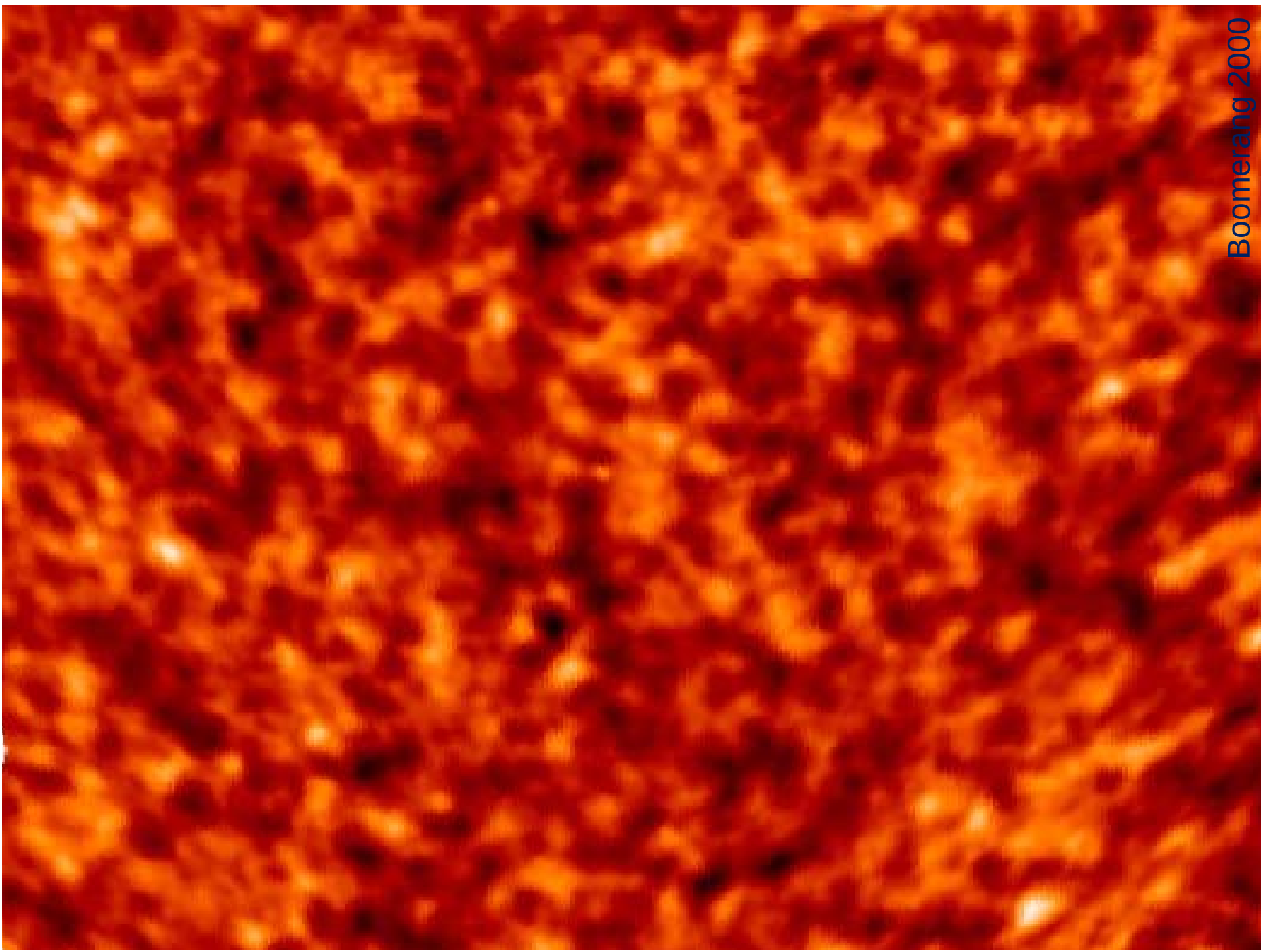


Image courtesy of SOHO/Extreme Ultraviolet Imaging Telescope (EIT) consortium.
SOHO is a project of international cooperation between ESA and NASA.



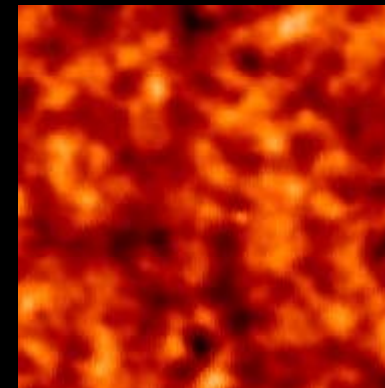
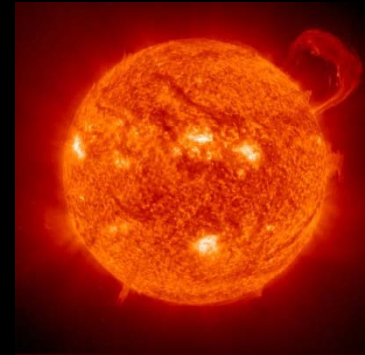
Boomerang 2000

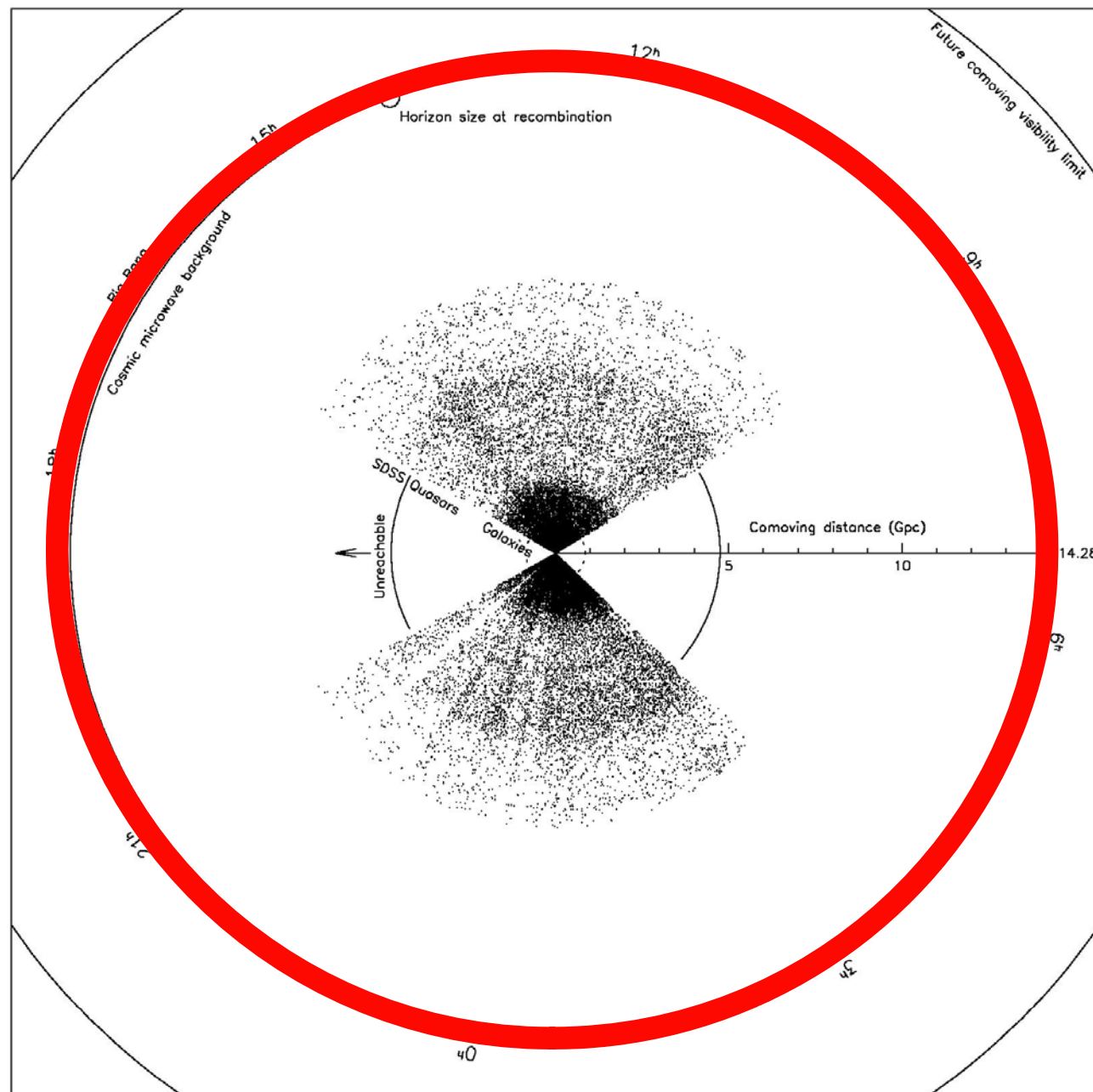
3) Avaruuden laajetessa aine jäähtyi ja kerääntyi galakseiksi

- Painovoiman vaikutuksesta ainetihentymät voimistuivat
- Niistä tuli tähtiä ja galakseja
- Ensimmäiset noin 500 miljoonaa vuotta alkuräjähdyksen jälkeen
- Mikä synnytti alkuperäiset ainetihentymät?

Katsomme menneisyyteen

- Valon nopeus $300\,000\text{ km/s} = 1\text{valovuosi/vuosi}$
- Katsoessamme kauas, katsomme ajassa taaksepäin
- Aurinko: 8 minuuttia
- Andromedan galaksi: 2 miljoonaa vuotta
- Kaukaisimmat galaksit: miljardeja vuosia
- Alkuplasmaasta tulevan valon näemme kosmisena taustasäteilynä (ei näy paljain silmin)
- Ensimmäiset 400 000 vuotta alkuplasma oli läpinäkymätöntä

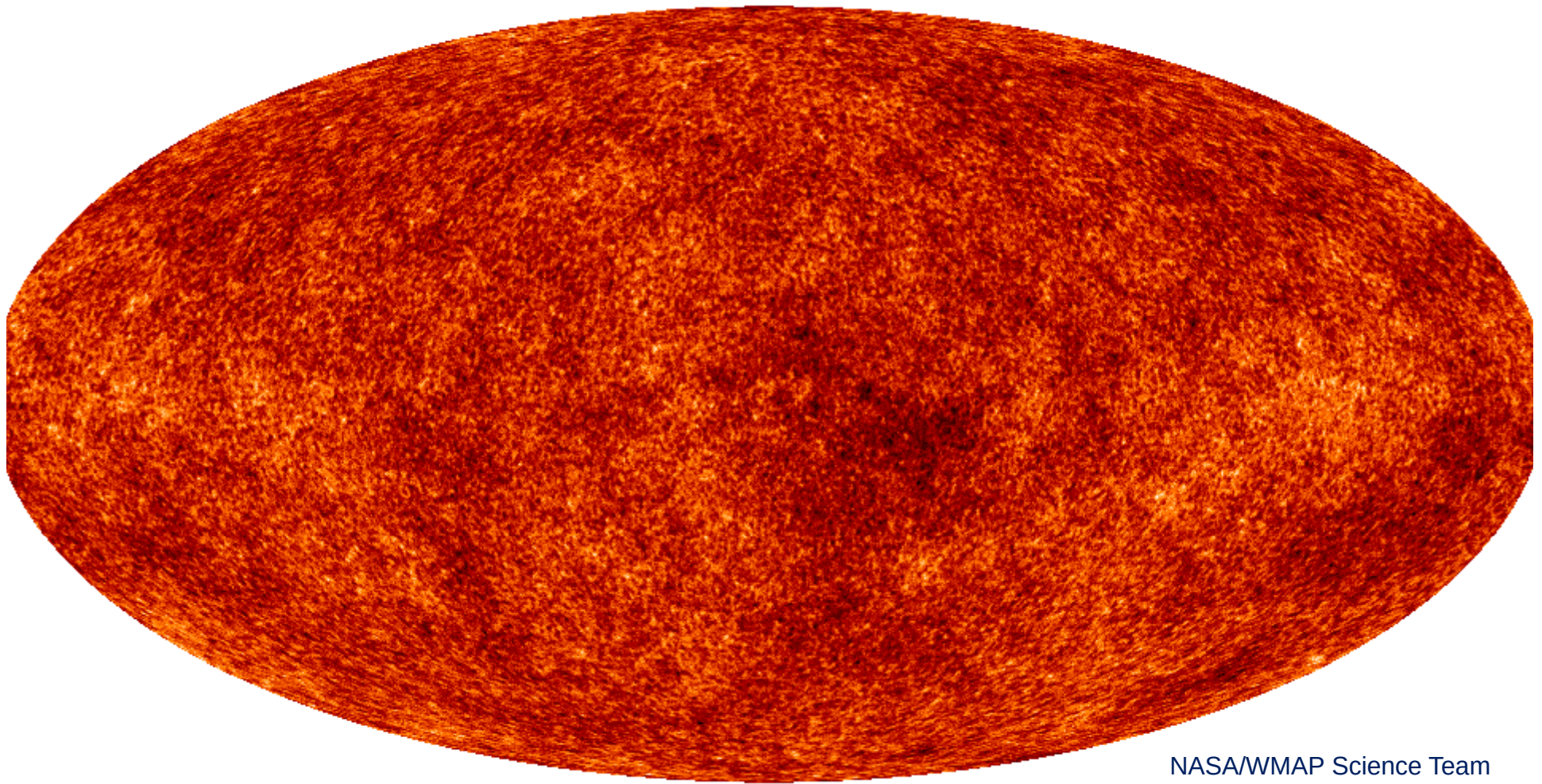




Kosminen taustasäteily

- Alkuplasmasta hetkellä $t = 400\,000$ v lähtenyt lämpösäteilyä
- Lähtiessään näkyvää (punaista) valoa
- Aallonpituus n. $1/1000$ mm
- Maailmankaikkeus laajentunut 1100-kertaiseksi
- Aallonpituus n. 1 mm (mikroaaltoja)
- Näyttää maailmankaikkeuden (kaukaiset osat) sellaisena kuin ne olivat hetkellä $t = 400\,000$ v
- Katselemme alkuräjähdystä

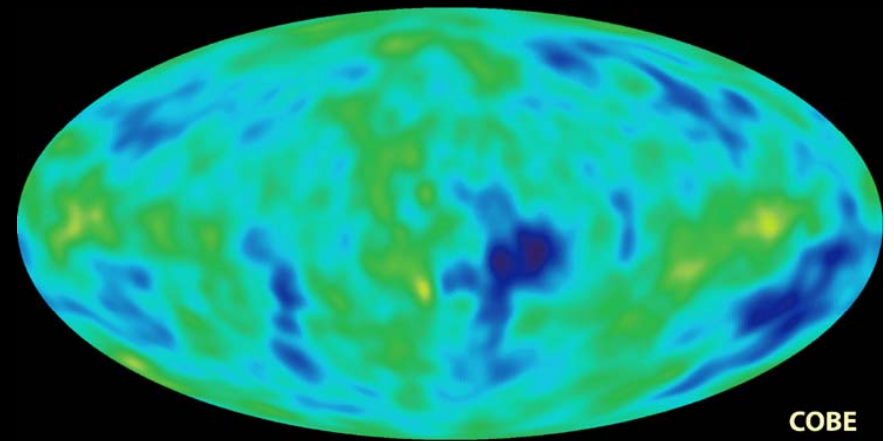
Kosminen taustasäteily näyttää meille 400 000:n vuoden ikäisen maailmankaikkeuden



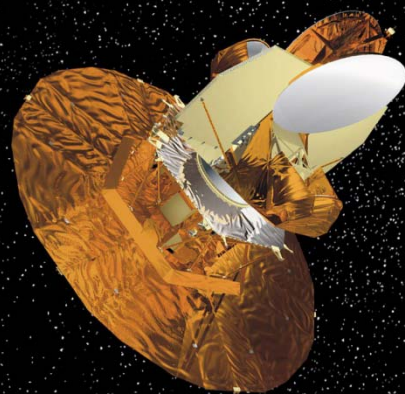
NASA/WMAP Science Team



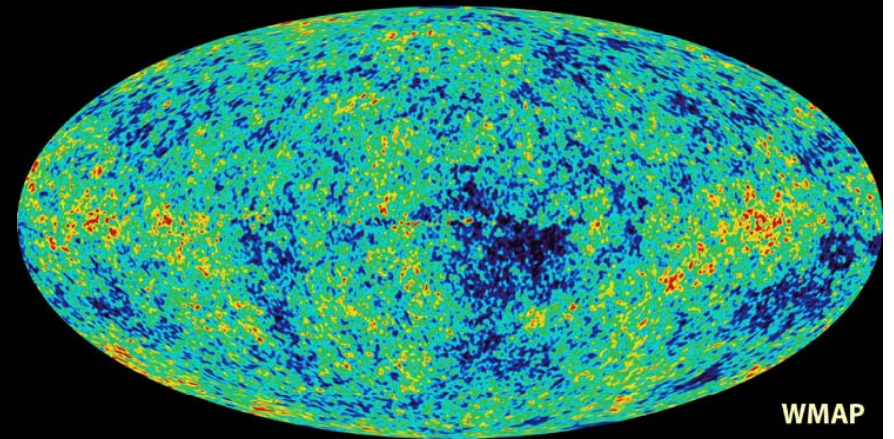
COBE 1989



COBE



WMAP 2001



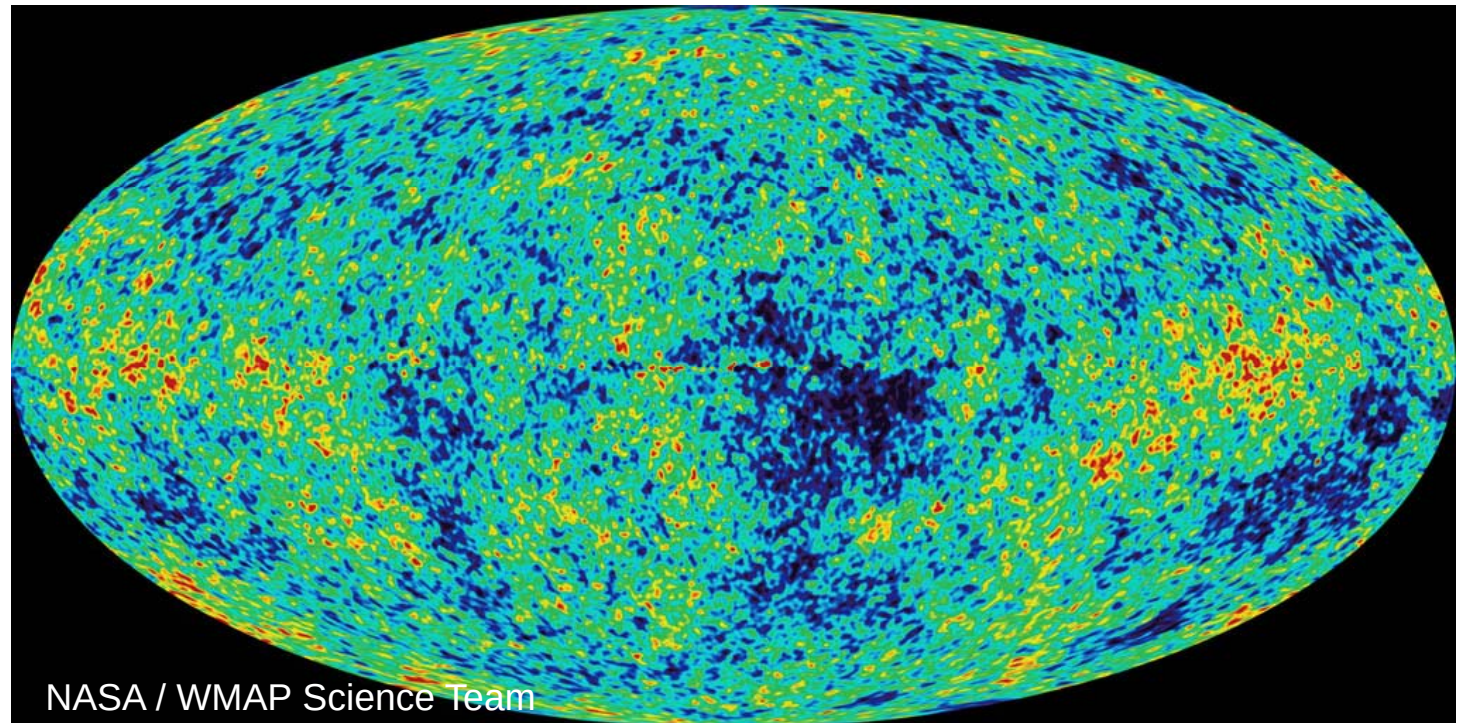
WMAP

NASA/WMAP
Science Team
2003

Alkuräjähdyksessä
aine oli hyvin
tasaisesti
jakautunut:
vain 1 / 10 000
tiheysvaihteluita

Näemme varhaisen maailmankaikkeuden
($t = 380\,000$ vuotta) kosmisena
taustasäteilynä

$$T = 2.728 \text{ K}$$



Menneisyytemme valokartio

aika



avaruus



olet tässä nyt ($t = 14$ mrd v)



galakseja

kaukaisimmat havaitut galaksit



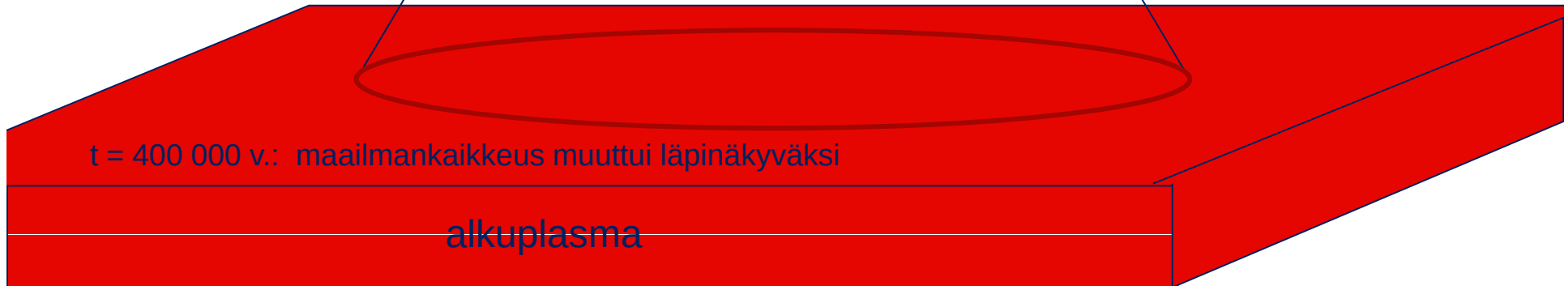
ensimmäiset galaksit

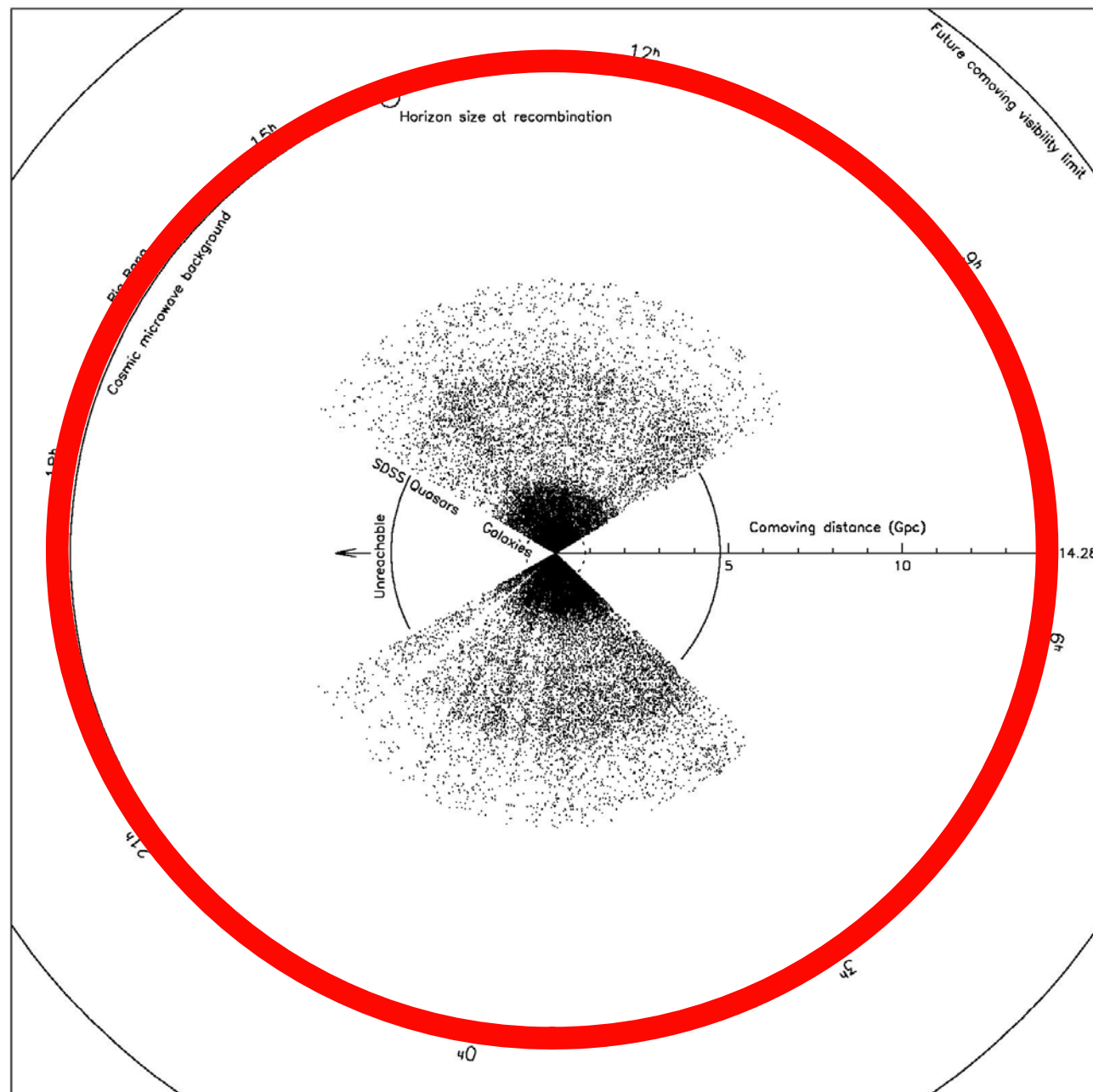


pimeä aika

$t = 400\,000$ v.: maailmankaikkeus muuttui läpinäkyväksi

alkuplasma



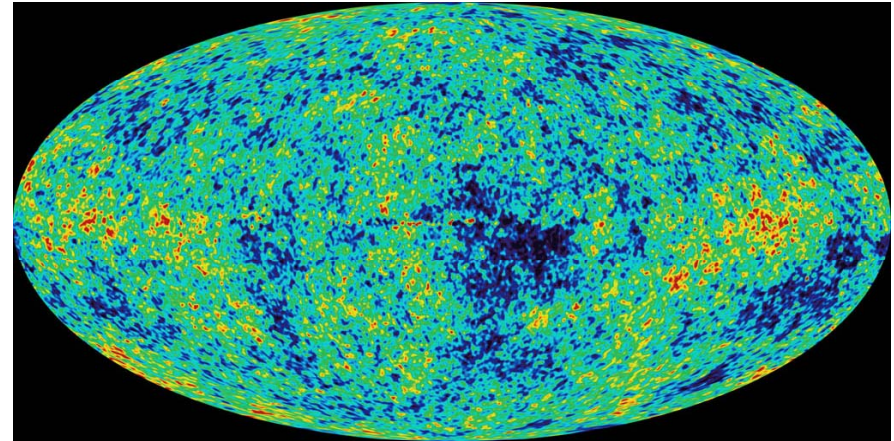


Miten maailmankaikkeus alkoi?

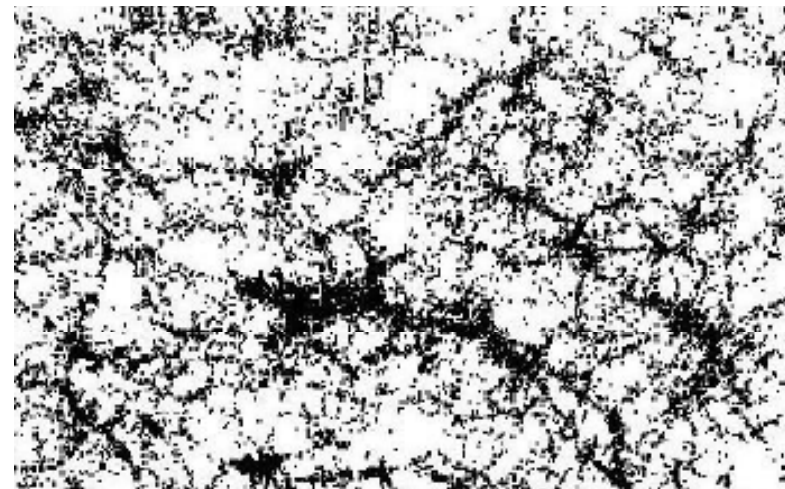
- Havaintojen ja tunnettujen fysiikan lakien avulla voimme tunkeutua ajassa taaksepäin
- Tiedämme, että varhaisen maailmankaikkeuden täytti kuuma plasma, ja avaruus laajeni silloin hyvin nopeasti. Käytämme tästä vaiheesta nimeä “alkuräjähdyks”.
Tämä vaihe on kuvattu kuvassa.
- Monien havaintojen ja eräiden fysiikan lakien luonnollisten ekstrapolaatioiden kanssa on yhteensopiva ajatus, että tätä ennen oli vielä nopeampi, kiihtyvän laajenemisen vaihe, jolloin avaruus laajeni valtavan suurella tekijällä. Avaruus olisi tällöin ollut kylmä ja tyhjä, lukuunottamatta hyvin suurta “tyhjiön energiatiheyttä”, joka mahdollisesti liittyi johonkin tuntemattomaan kenttään. Tätä vaihetta kutsutaan “inflaatioksi”.
- Siitä, mitä oli sitä ennen, ei ole mitään tietoa (ei lopullista vastausta)
- Kun inflaatio päättyi, tyhjiöenergia olisi muuttunut hiukkasiksi ja säteilyksi = alkuplasma

Rakenteen alkuperä:

Mistä olivat peräisin ne
pienet tiheysvaihtelut,
jotka näemme kosmisessa
taustasäteilyssä?

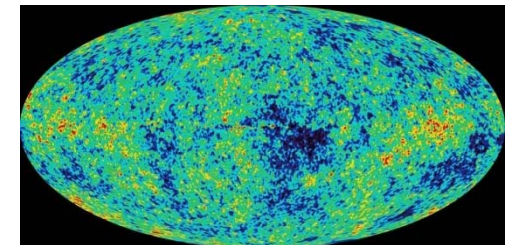


Nämä tiheysvaihtelut
voimistuivat painovoiman
vaikutuksesta galakseiksi,
tähdiksi ja planeetoiksi.



Alkuperäisten tiheysvaihteluiden synty?

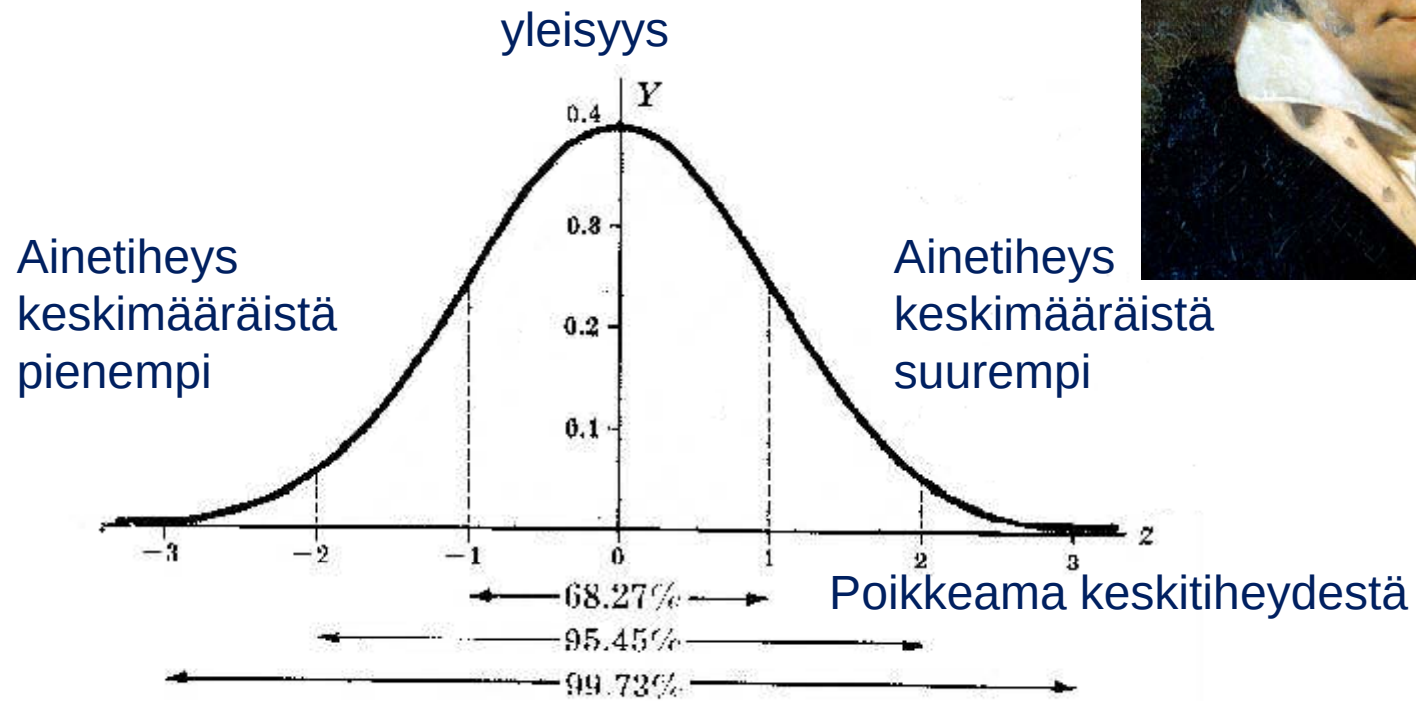
- Emme tiedä, mutta suosituin hypoteesi on:
- **Inflaation aikaiset kvanttifluktuaatiot**
 - laajeneminen: mikroskooppisista → tähtitieteellisiin mittoihin
 - satunnaisprosessi
 - Inflaation jälkeen rakenne pysyi pitkään muuttumattomana
- Kosminen taustasäteily näyttää rakenteen lähellä alkuperäistä inflaation tuottamaa muotoa



Alkuperäinen rakenne

- Satunnainen – vain tilastollisia ominaisuuksia
- Havaintojen mukaan **lähellä** yksinkertaisinta mahdollista satunnaista rakennetta:
 - Samanlainen kaikilla mittakaavoilla
 - Sama kaikilla aineen ja energian muodoille:
 - Tavallinen aine (atomit)
 - Pimeä aine
 - Säteily
 - “gaussinen” = “mahdollisimman satunnainen”

Gaussisuus



yksikkö = 1 / 10 000

- Inflaatio tuottaa **lähellä** tätä olevan rakenteen
- Mikä aiheutti inflaation?
 - Hyvin korkeiden energioiden fysiikkaa
 - Ei saavuteta hiukkaskiihdyttimillä
 - Yksityiskohdat auki: monia inflaatioteorioita
 - Kukin inflaatioteoria ennustaa joitakin **pieniä poikkeamia** tästä yksinkertaisimmasta rakenteesta
 - Etsimme näitä poikkeamia valitaksemme oikean teorian

WMAP-satelliitin tulokset viittaavat jo yhteen tällaiseen poikkeamaan:

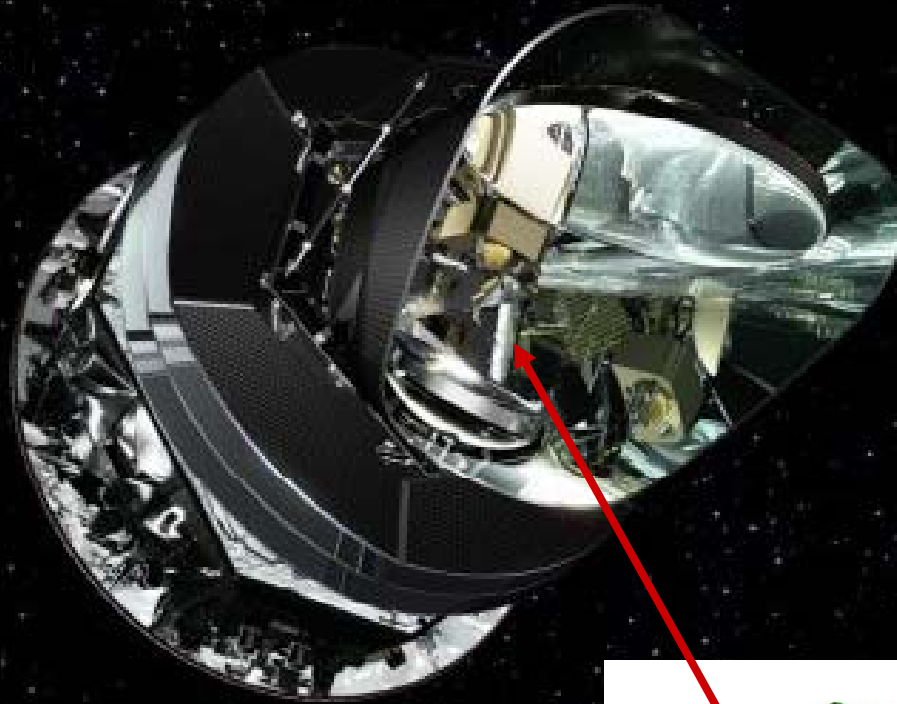
- Alkuperäiset tiheysvaihtelut hieman heikompia suuremmilla etäisyyskaaloilla
- Spektri-indeksi $n = 0.96$ (± 0.015)
- 2,7 (e) kertaa suuremmalla etäisyyskaalalla tiheysvaihtelut ovat voimakkuudeltaan vain 96% pienemmän skaalan tiheysvaihteluista

Haluamme tutkia tarkemmin:

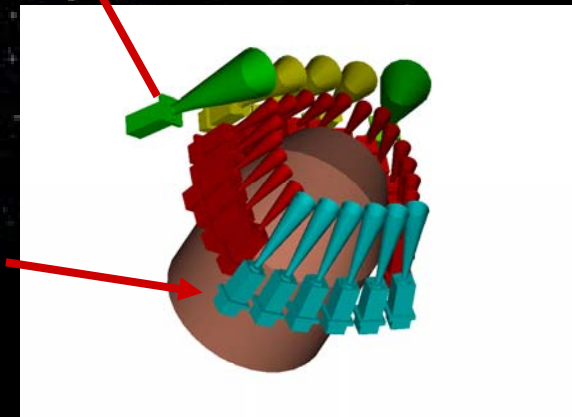
- Mitata n tarkemmin
- Löytää muita poikkeamia
- Inflaatio olisi tuottanut myös gravitaatioaaltoja, jotka vaikuttavat kosmisen taustasäteilyn polarisaatioon

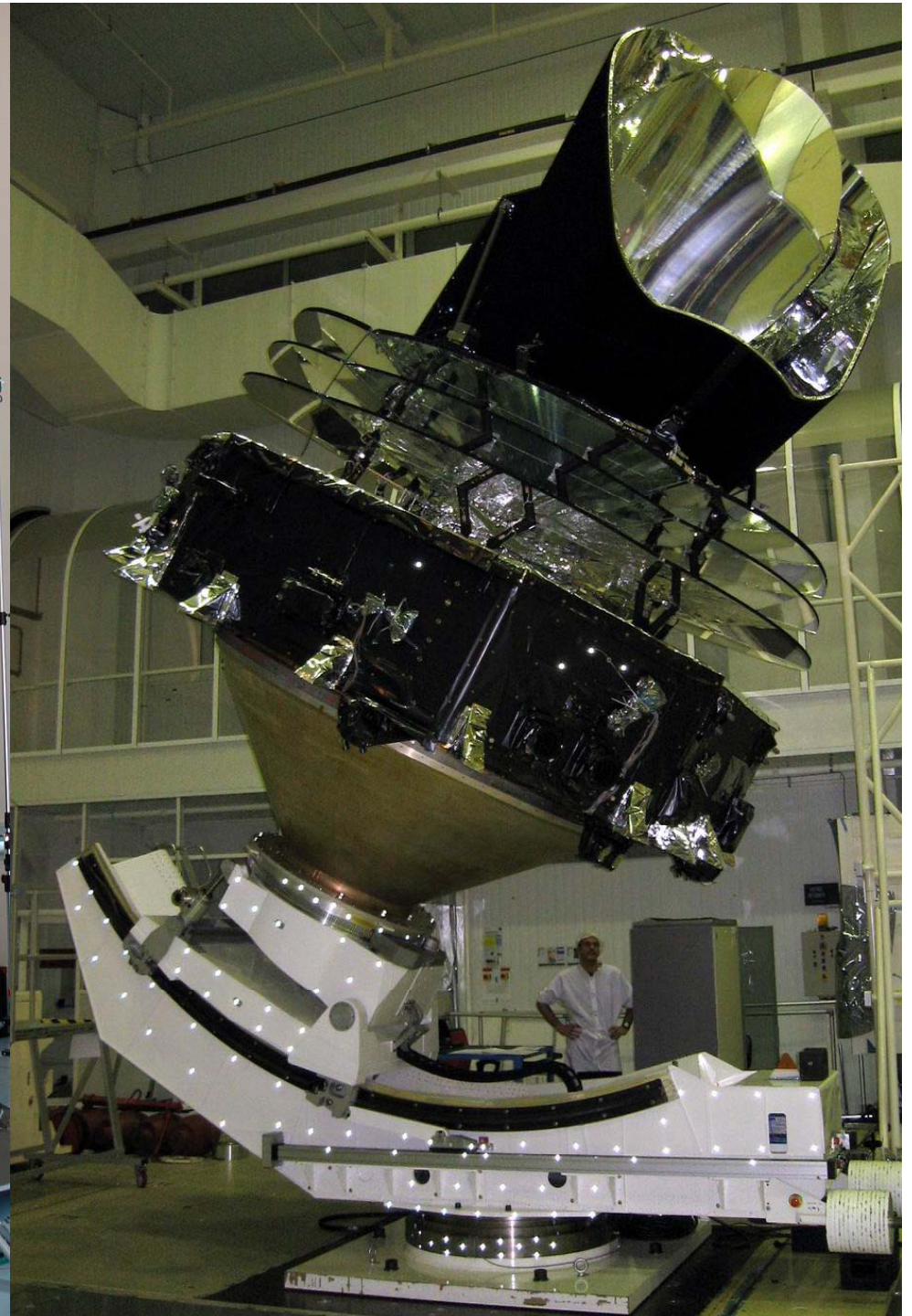
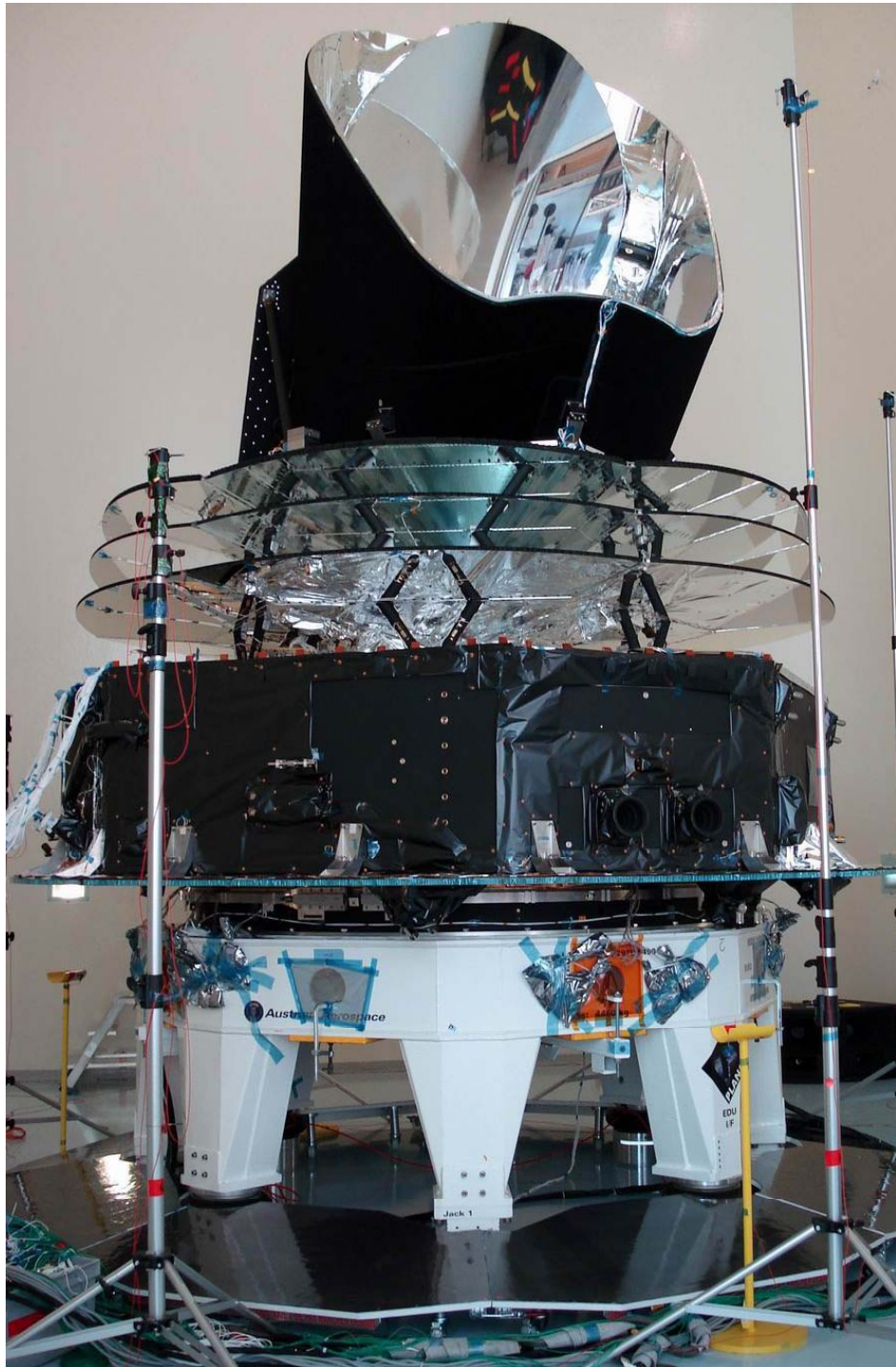
Planck-satelliitti 2009

- Euroopan avaruusjärjestön (ESA) satelliitti
- Laukaisu avaruuteen toukokuussa 2009
- Mittaa kosmista taustasäteilyä
- 3 kertaa tarkempi kuin WMAP

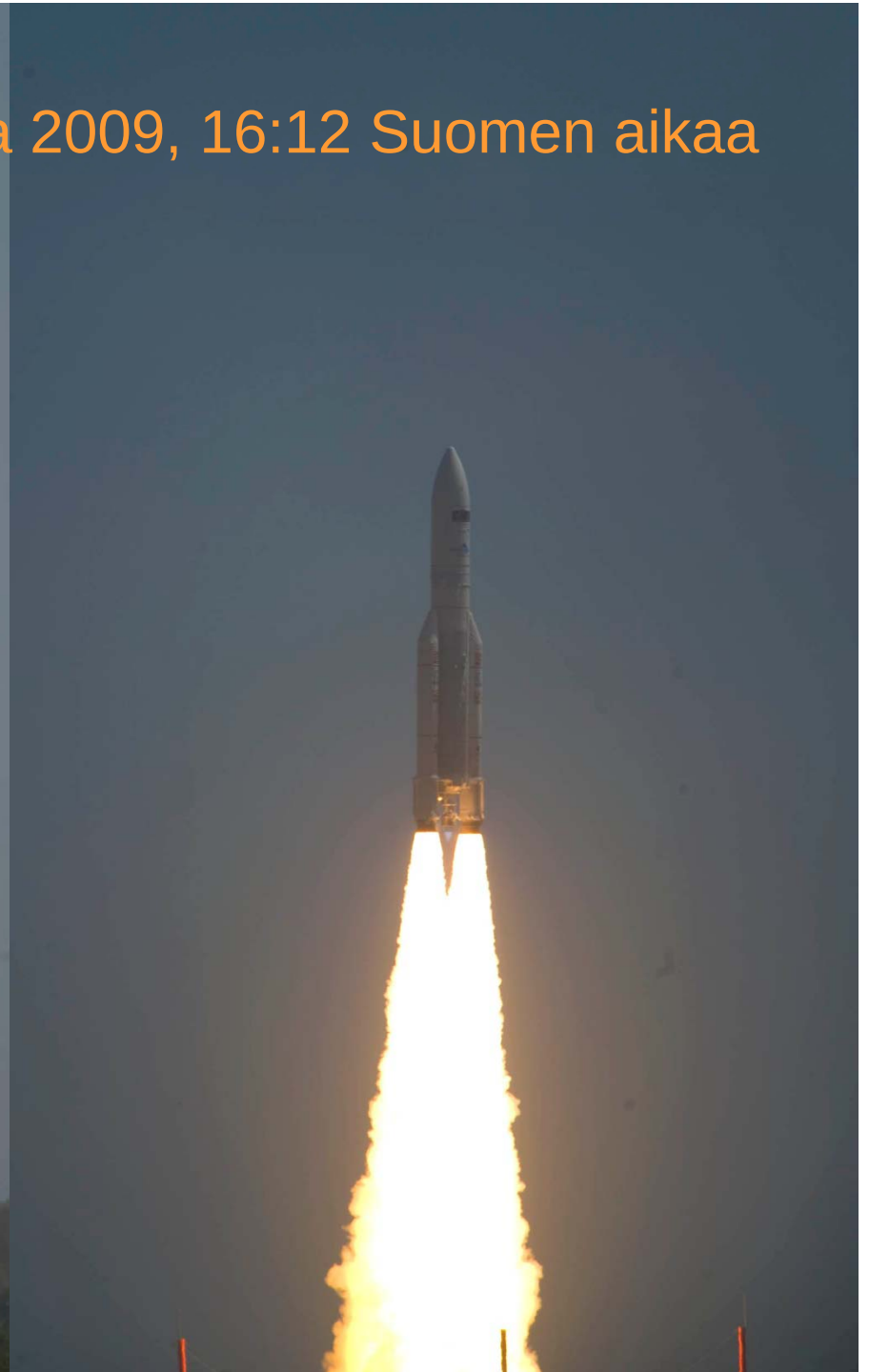


70 GHz vastaanottimet
(aallonpituus 4 mm)
tehty Suomessa





14 toukokuuta 2009, 16:12 Suomen aikaa

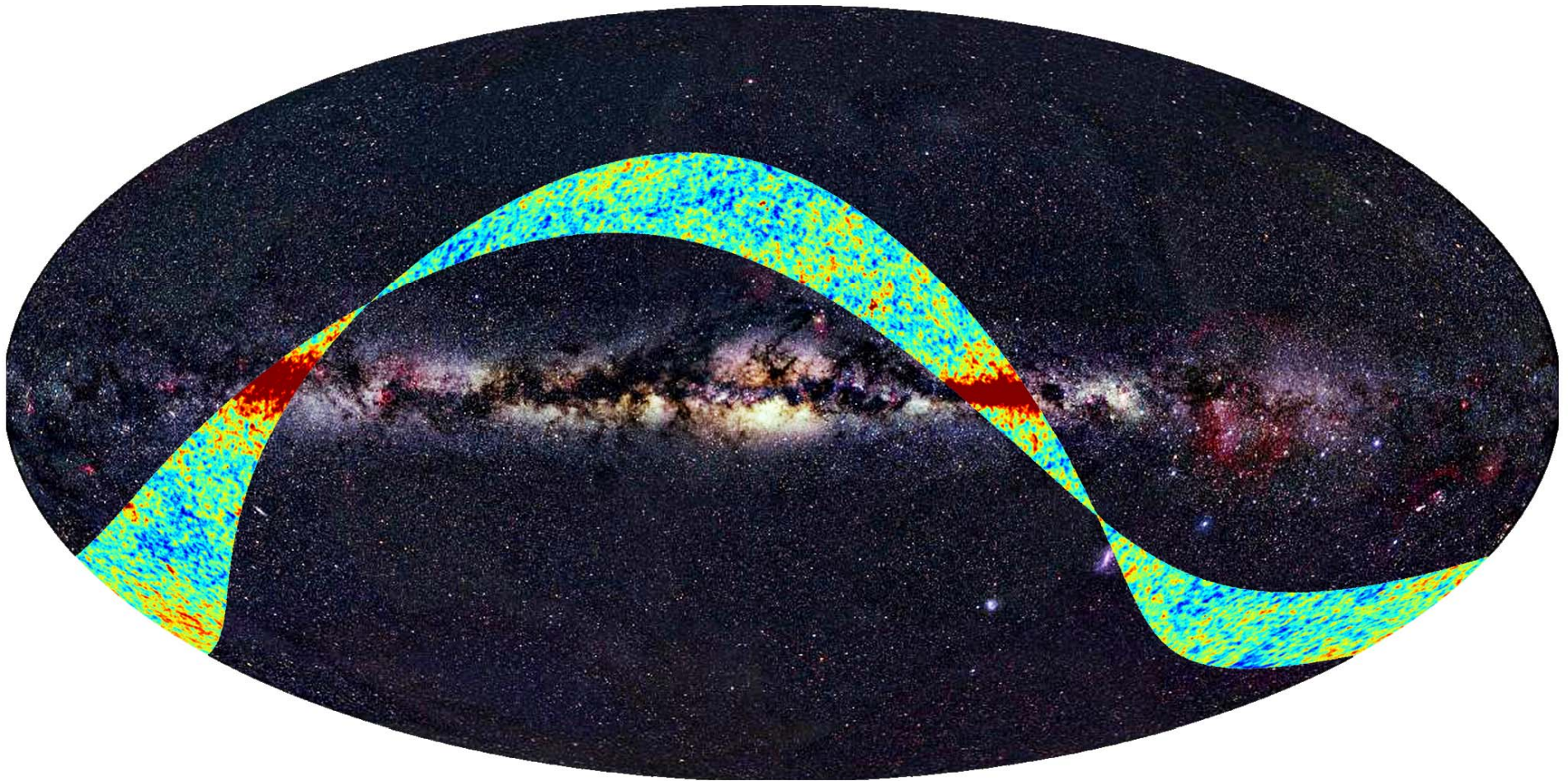


- Planck kiertää maa-aurinko -systeemin toista Lagrangen pistettä (L2)
- L2 on 1,5 miljoonan km päässä maasta
- Radan säde on 400 000 km
- Planck asettui radalleen 2.7.2009
- Instrumentit on jäähdytetty 20 K ja 0.1 K lämpötilaan

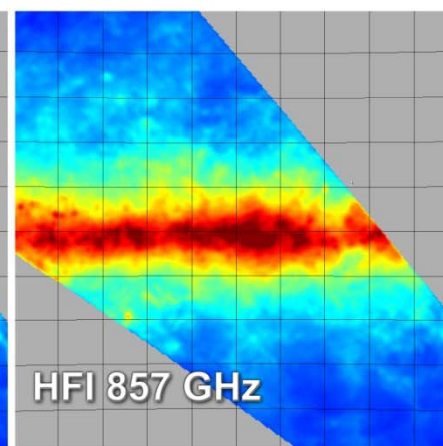
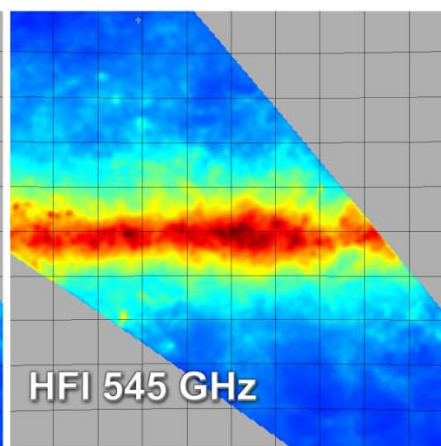
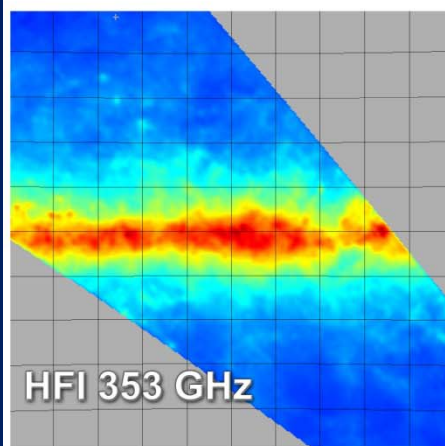
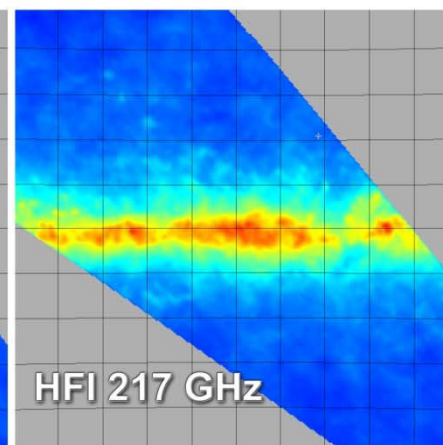
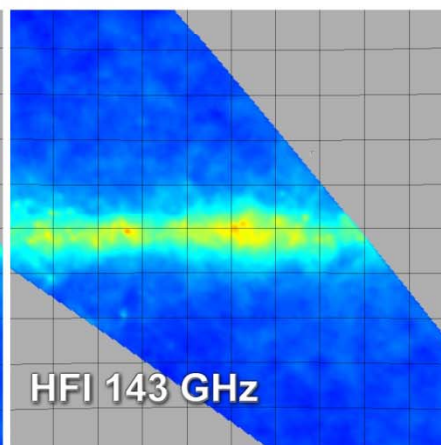
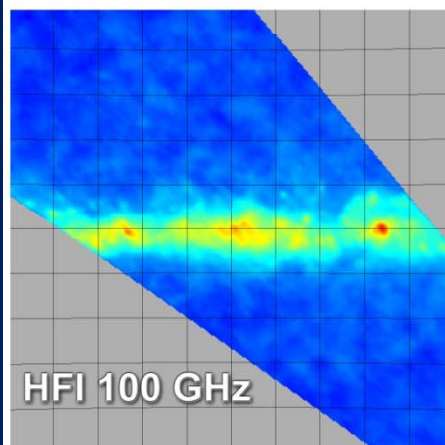
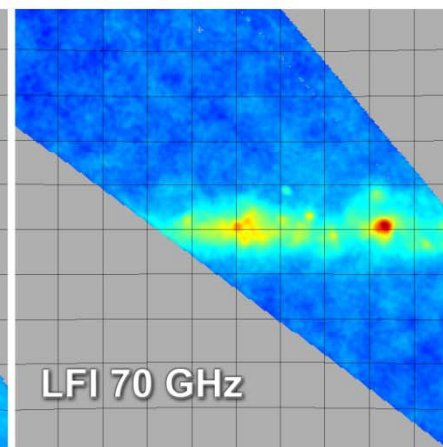
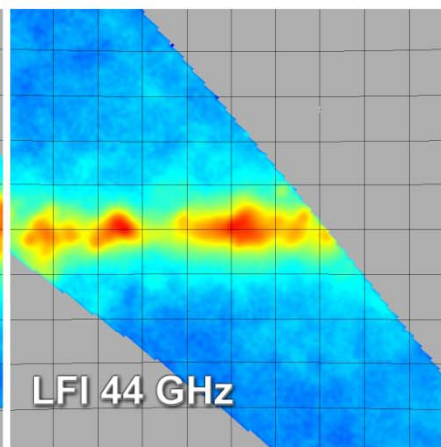
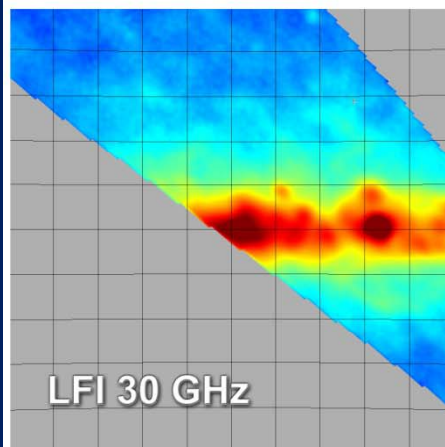


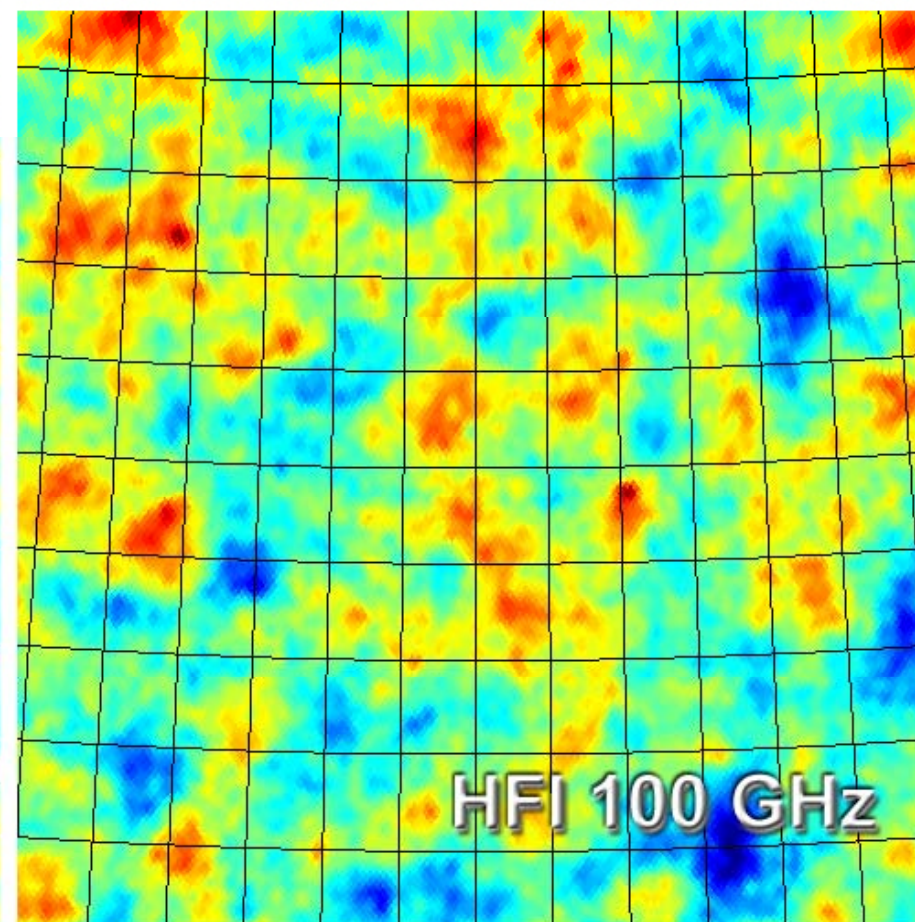
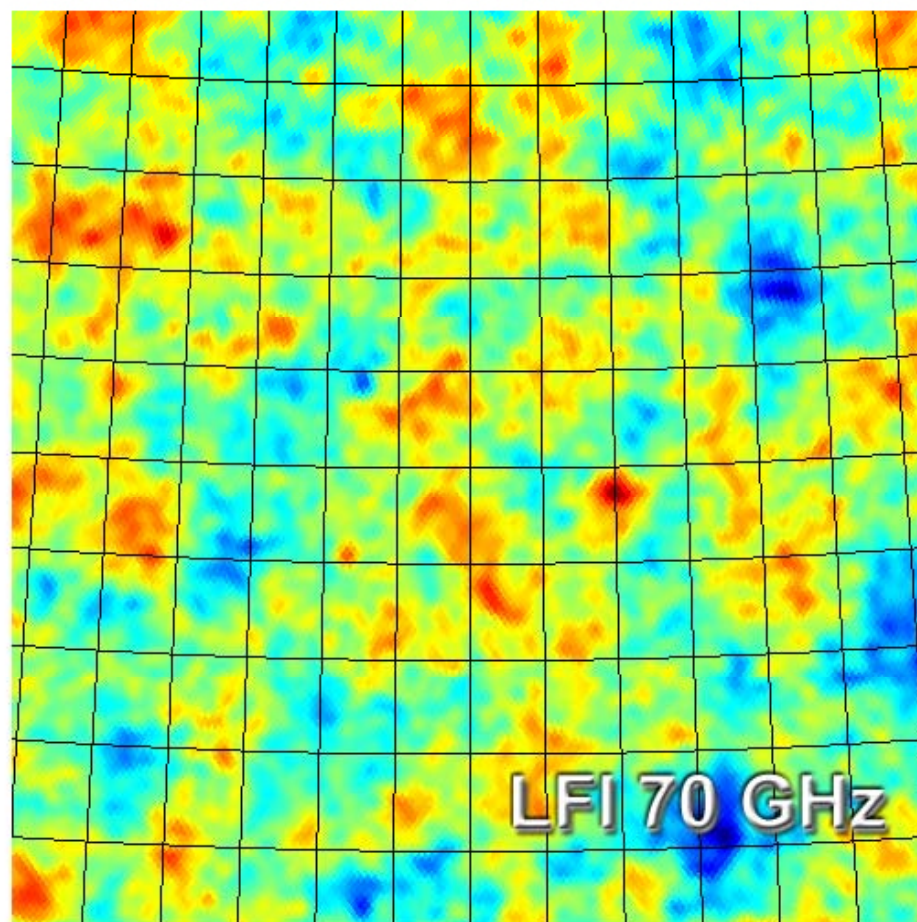
Ensimmäiset 2 viikkoa Planckin havaintoja

(13-27. elokuuta)



Credit: ESA, LFI & HFI Consortia (Planck), Background image: Axel Mellinger





THE END

Tulokset vuonna 2012

Planck satellite

- European Space Agency (ESA)
- Launch May 14th, 2009
- Measures cosmic microwave background
- 3 times the accuracy of WMAP
- 70 GHz radiometers made in Finland



Planck maps the sky at 9 microwave frequencies:

Low Frequency Instrument (LFI): 30, 44, 70 GHz
High Frequency Instrument (HFI): 100, 143, 217,
353, 545, 857 GHz

Radiometers made in Finland:
Ylinen Electronics together
with MilliLab (VTT & TKK)
and Metsähovi Radio
Observatory (TKK)

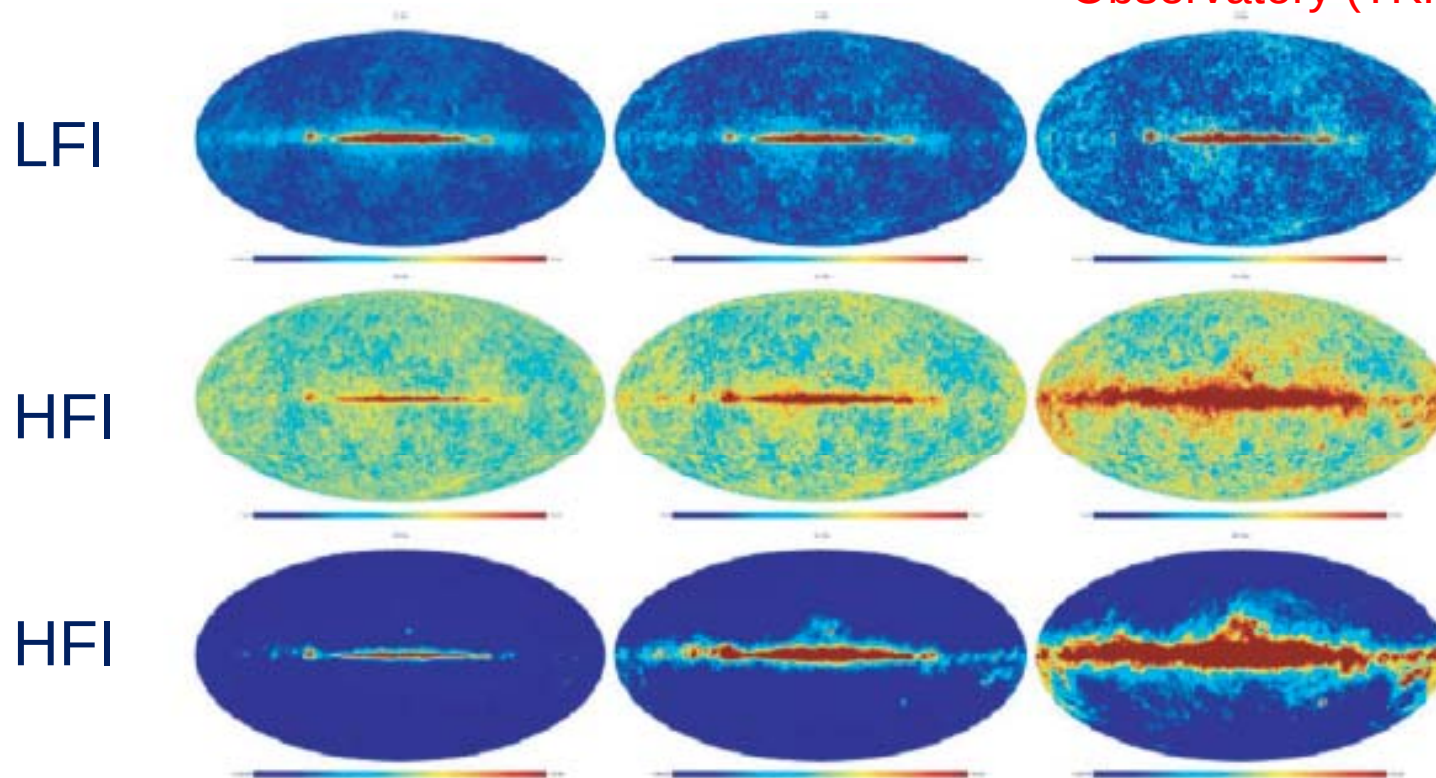
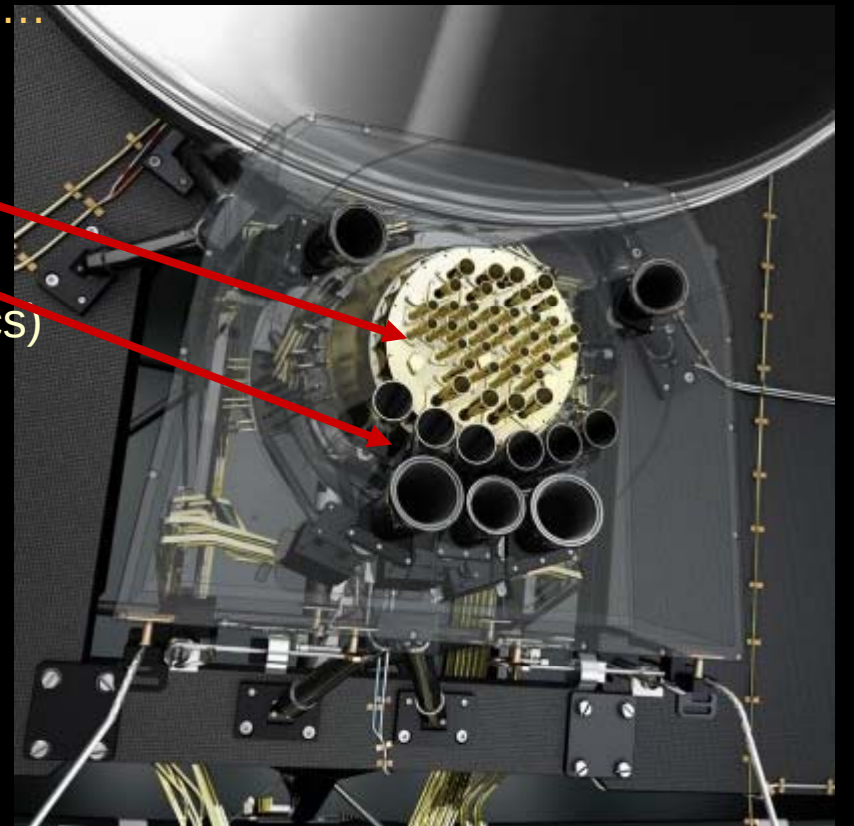
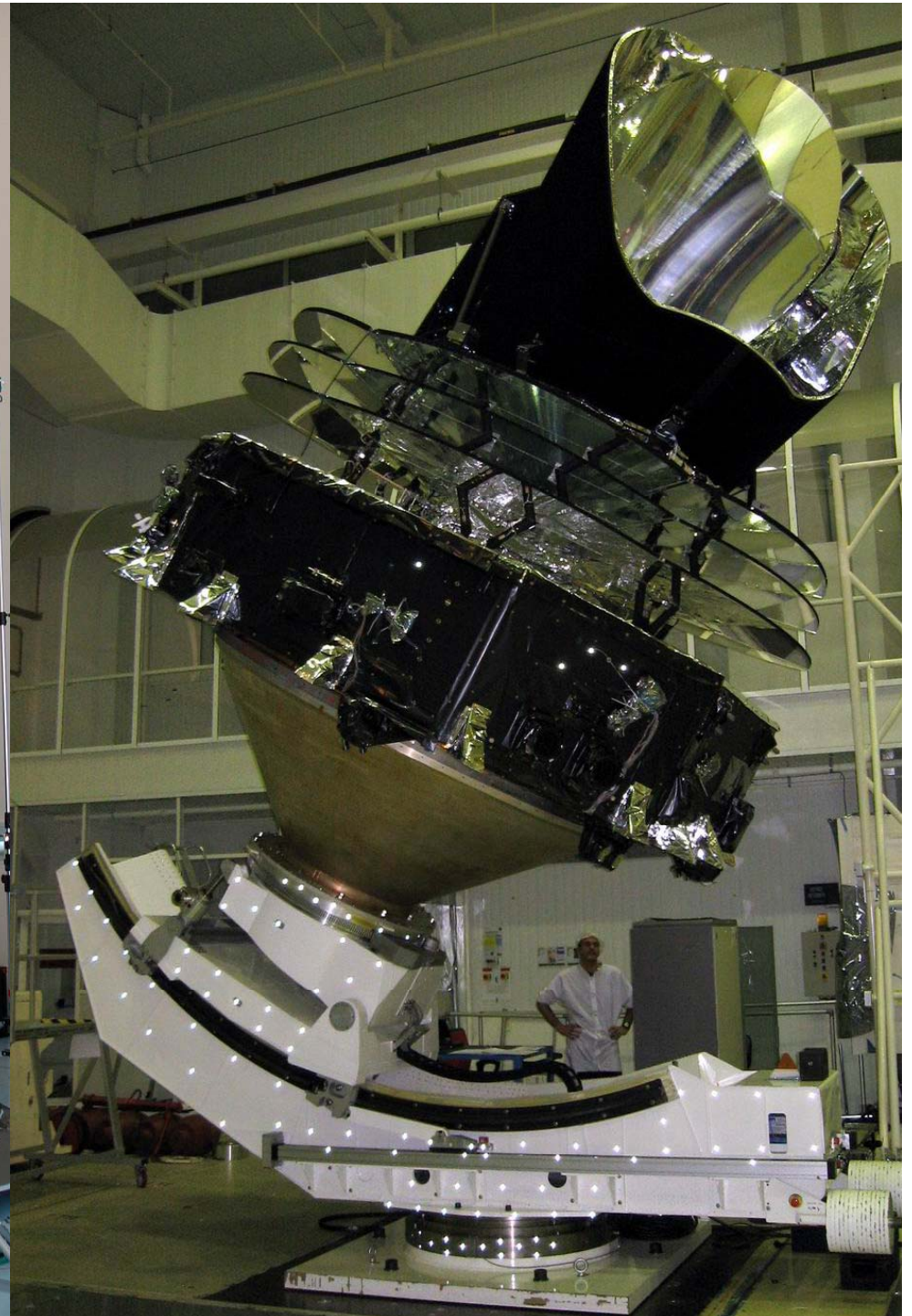
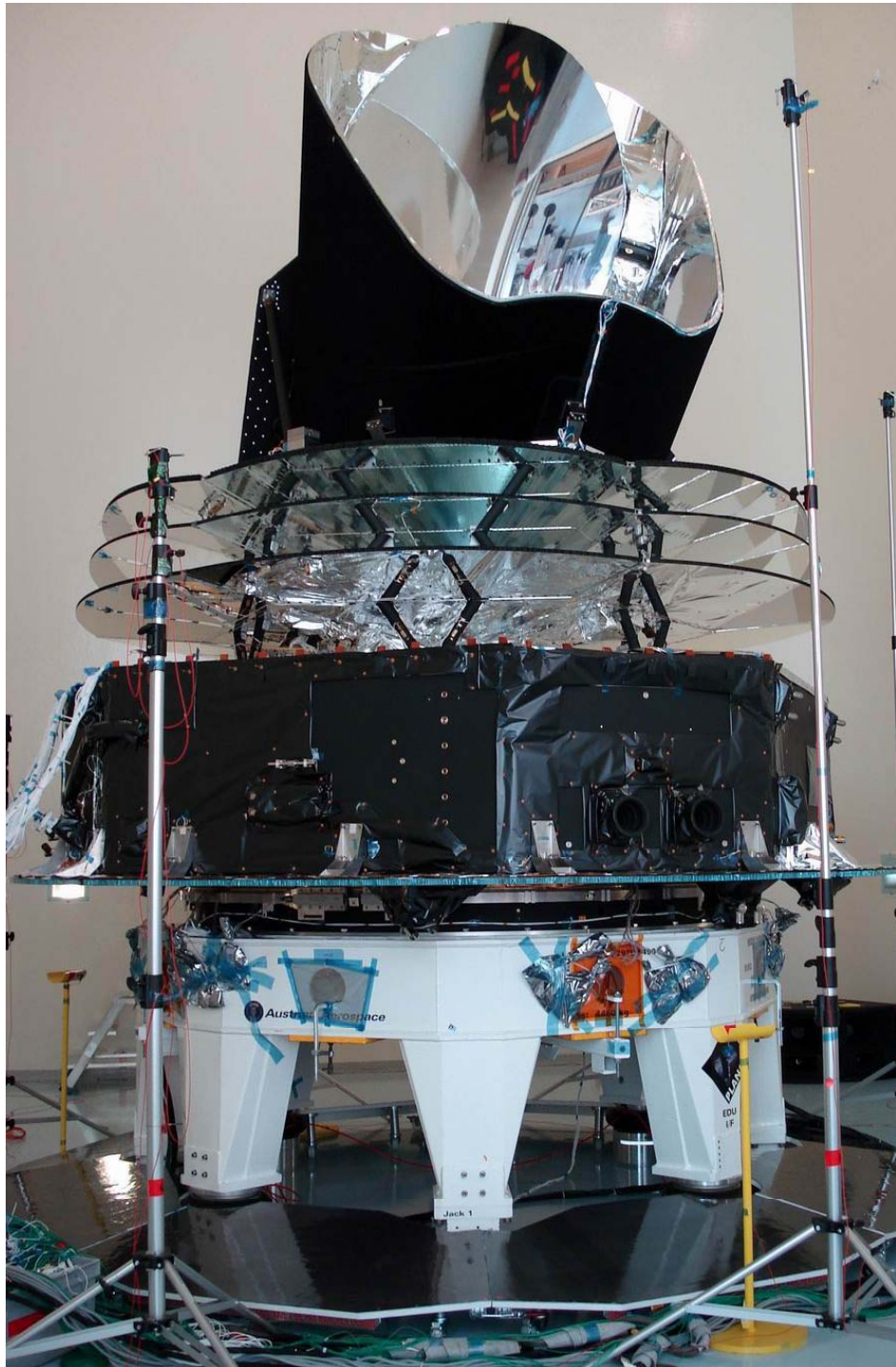


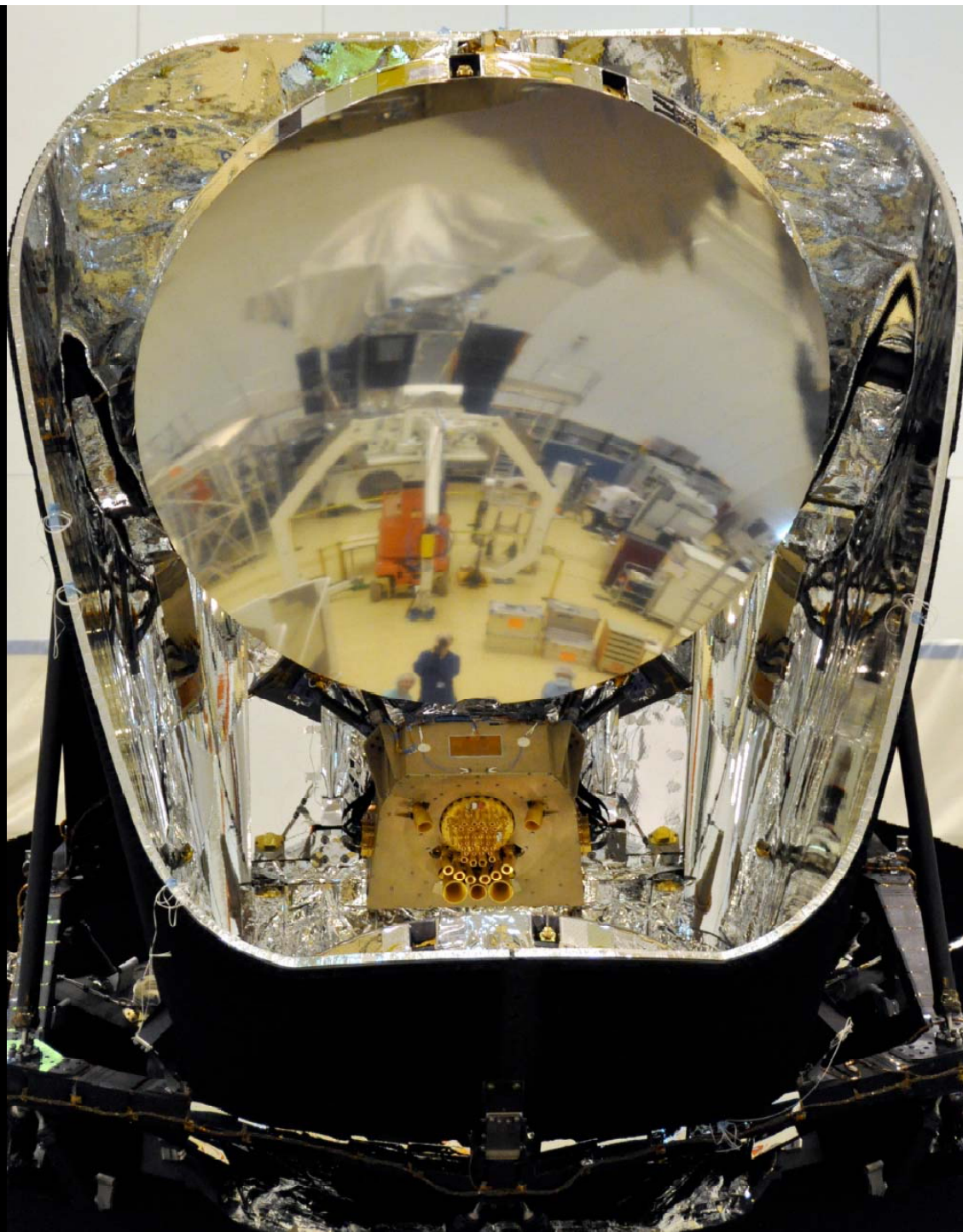
FIG 5.1.— False colour images of the simulated sky in the nine frequency channels of *Planck*, after subtraction of the monopole and dipole CMB components. From top left to bottom right: 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545, and 857 GHz channels.

Planck

- ESA satellite, launch from Kourou, French Guyana, with Ariane 5, together with the Herschel infrared telescope
- NASA participates
- About 10 European countries:
 - France, Italy, England, Spain, Germany,
 - Finland, Denmark, Switzerland, Norway, ...
- USA and Canada
- High Frequency Instrument (HFI)
- Low Frequency Instrument (LFI)
- Finnish Science Participation:
 - Univ. of Helsinki (cosmology, astrophysics)
 - TKK (astrophysics)
 - Univ. of Turku (astrophysics)

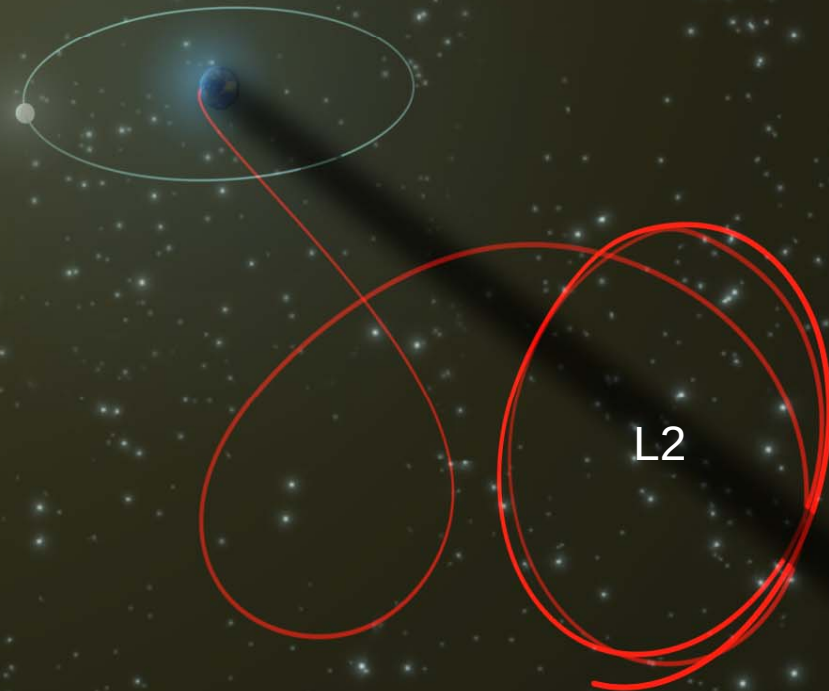






Orbit maneuvers

- Velocity at separation 10 km/s
- Injection orbit: perigee 270 km altitude, apogee 1.2 million km
- First signal acquisition (New Norcia) 15:49:00 CEST
- TCM 1a 15 May 20:01:05 CEST (14.35 m/s)
- TCM 1b 17 May was not needed
- By 21:00 CEST on 19 May, Herschel and Planck were located 617 287 km and 607 767 km from the Earth. The satellites were separated by 9917.35 km.
- TCM 2 5 June mid-course correction
- L2 is 1.5 million km from Earth
- TCM 3 2 July 19:00 CEST orbit insertion (to reduce radius of orbit)
- Lissajous orbit around L2
- Orbit radius 400 000 km



Menneisyyden valokartio

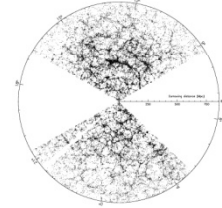
aika



avaruus



Tässä ja nyt ($t = 13,7$ mrd v.)



galakseja

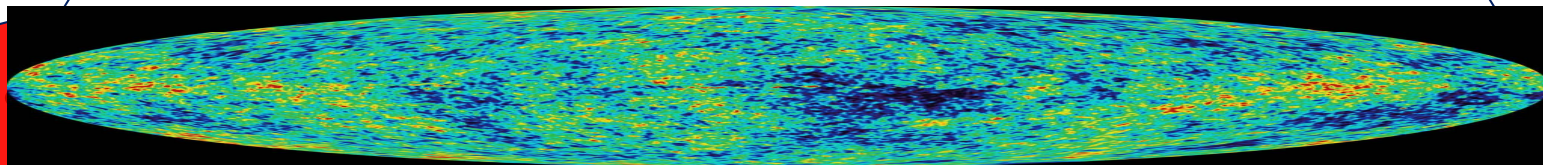
Kaukaisimmat havaitut
galaksit

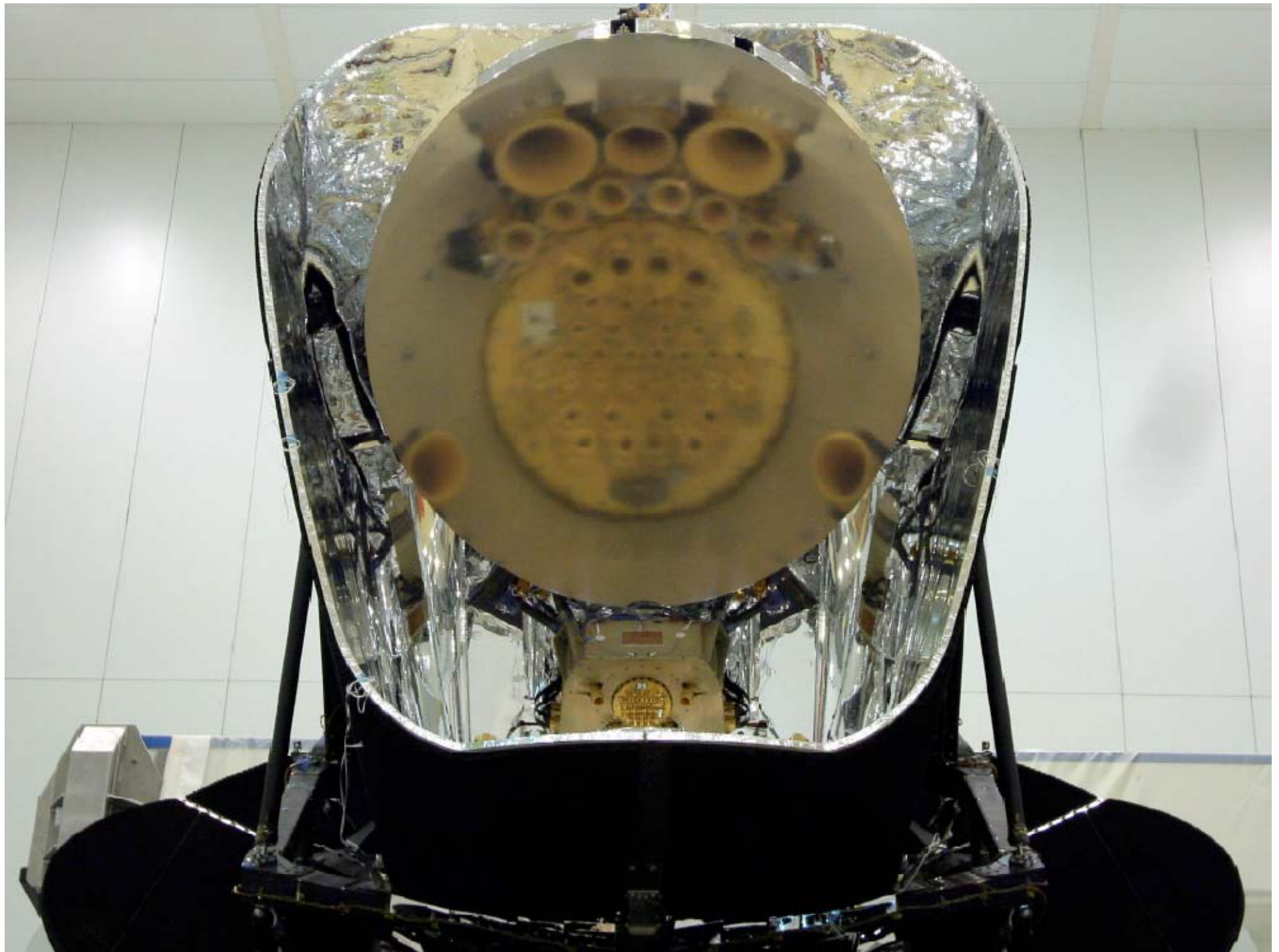
Ensimmäiset galaksit

Pimeä aika
(ei tähtiä, galakseja)

$t = 380\,000$ v: avaruus muuttui läpinäkyväksi

alku-
plasma





Menneisyytemme valokartio

aika



avaruus



olet tässä nyt ($t = 14$ mrd v)

galakseja

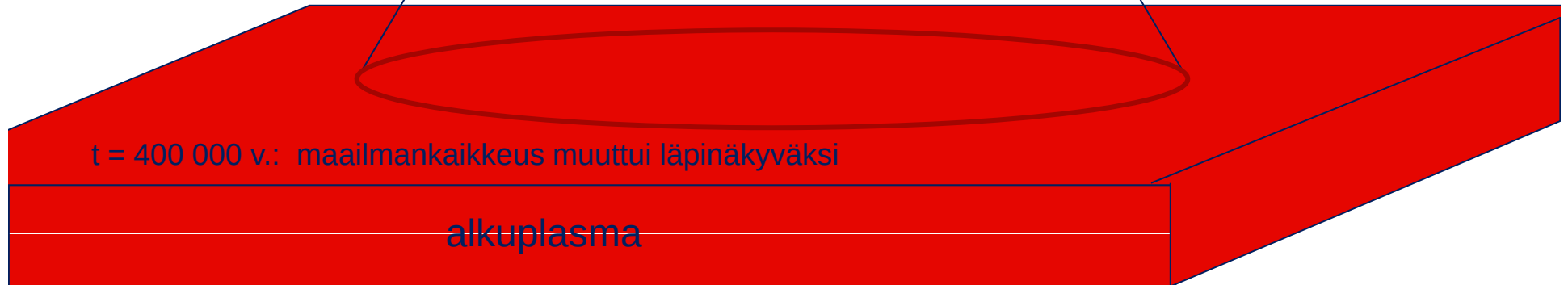
kaukaisimmat havaitut galaksit

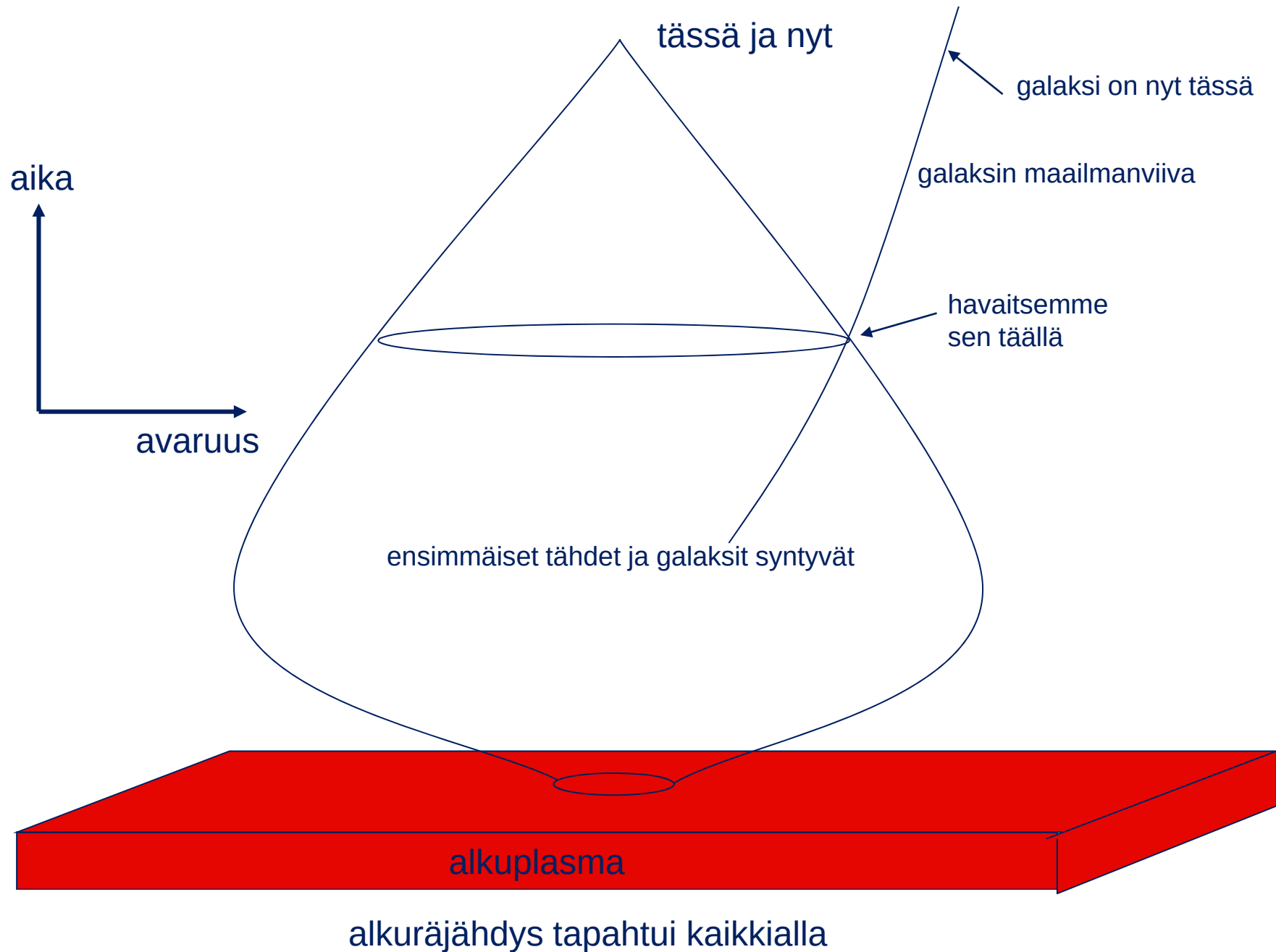
ensimmäiset galaksit

pimeä aika

$t = 400\,000$ v.: maailmankaikkeus muuttui läpinäkyväksi

alkuplasma





Past and Future CMB Satellites

- COBE, launch 1989
- WMAP, launch 2001
- Planck, launch 2009

After Planck, CMB temperature variation measured about as well as meaningful, but CMB polarization, which is much weaker, needs to be measured better

- Two proposals:
 - CMBPol (to NASA)
 - BPol (to ESA)
- Detector technology has reached the photon noise limit
- To reduce noise further: average measurements over longer time or a larger number of detectors