



# **Galaksit ja kosmologia**

## **FYS2052, 5 op, syksy 2023**

E207 Physicum

**Luento 12: Varhainen maailmankaikkeus**

**27/11/2023**



# Tällä luennolla käsitellään

---

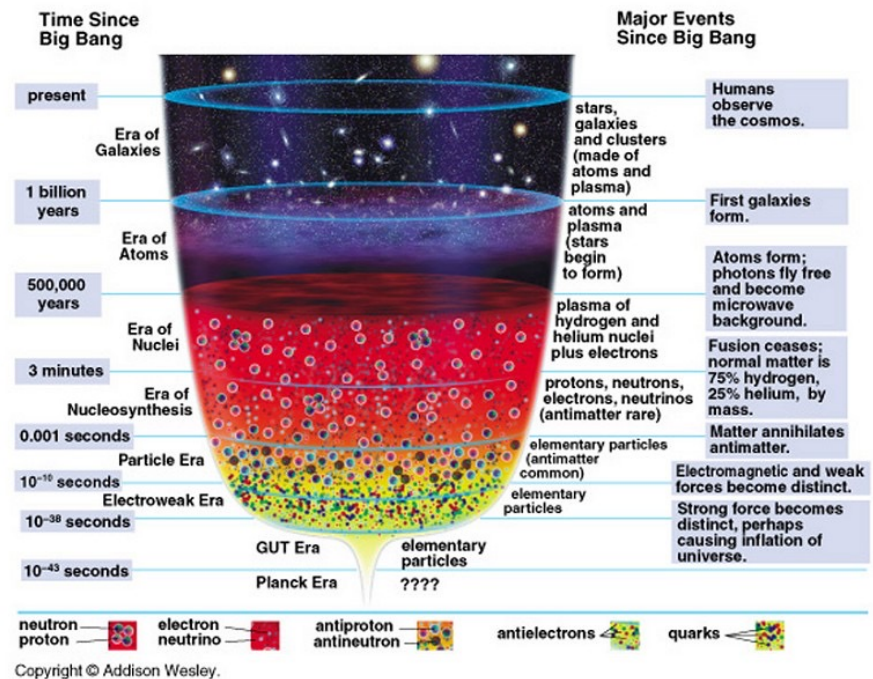
1. Varhaisen maailmankaikkeuden aikajana ja tärkeimmät tapahtumat.
2. Kosmologisen standardimallin nykyiset ongelmat.
3. Inflaatioteoria ja sen merkitys.
4. Kosminen nukleosynteesi ja maailmankaikkeuden baryonien määrä.
5. Kosmisen mikroaaltotaustasäteilyn synty ja merkitys kosmologialle.
6. Vastaa soveltuvin osin: **CBMB**: sivut 413-434

**S&G**: luku 1.5



# 12.1 Varhaisen maailmankaikkeuden aikajana I

- Nykyisin ymmärrämme melko hyvin hiukkasfysiikkaa energioilla  $\leq 1$  GeV ( $T \approx 10^{13}$  K), joka vastaa aikaa noin  $\approx 10^{-6}$  sekuntia alkuräjähdyksen jälkeen. Mitä varhaisempiin aikoihin mennään, sitä epävarmemmaksi asiat menevät.
- Varhaisin hetki, mistä voi ylipäättänsä sanoa yhtään mitään on Planckin aika:  $t_p = (hG/2\pi c^5)^{1/2} \approx 5.4 \times 10^{-44}$  s, joka on samalla pienin mahdollinen aikayksikkö. Fysiikan ymmärtäminen tällöin vaatisi kvanttigravitaatioteorian.





# Varhaisen maailmankaikkeuden aikajana II

- Yhtenäisteorian-epookilla (GUT) ( $t \approx 10^{-43} - 10^{-36}$  s,  $T = 10^{15}$  GeV =  $10^{27}$  K) perusvoimat (sähkömagneettinen, vahva ja heikko ydinvoima) painovoimaa lukuun ottamatta ovat yhdistyneet yhdeksi voimaksi.
- Inflaatio-epookin aikana ( $t \approx 10^{-32}$  s) maailmankaikkeuden koko kasvoi eksponentiaalisesti hyvin lyhyessä ajassa noin  $a \approx e^{60}$  kertaiseksi hypoteettisen inflaton-kentän ansiosta.
- Sähköheikko-epookin aikana ( $t \approx 10^{-32} - 10^{-12}$  s,  $T > 100$  GeV) enää elektromagneettinen ja heikko ydinvoima olivat yhdistyneenä.
- Näihin aikoihin vielä tuntemattoman prosessin kautta tapahtui baryogeneesi, eli baryonit ja antibaryonit annihiloituivat niin että jokaista  $10^9$  anti-baryonia kohti jäi jäljelle  $10^9 + 1$  baryonia.



# Varhaisen maailmankaikkeuden aikajana III

- Kvarkki-hadroni faasimuutos tapahtui hetkellä  $t \approx 10^{-5}$  s,  $T \approx 3 \times 10^{12}$  K, kvarkit sitoutuvat hadroneihin (esim. protoneihin ja neutroneihin).
- Noin sekunnin vanhassa maailmankaikkeudessa ( $t \approx 1$  s,  $T \approx 5 \times 10^9$  K) elektroni ja positroni parien annihilaatio alkaa ja samalla neutriinot kytkeytyvät irti plasmasta. Lisäksi neutronien ja protonien väliset reaktiot eivät ole enää tasapainossa ja niiden välinen suhde ”jäätty” (eng. freeze out).
- Muutaman minuutin ikäisessä maailmankaikkeudessa lämpötila on laskenut  $T \approx 10^9$  K ja nukleosynteesi voi alkaa, lopputuloksena on noin 75% protoneja (vetyä) ja 25%  $\text{He}^{++}$  ytimiä.
- Kun  $T \approx 3000$  K,  $t \approx 380\,000$  vuotta elektronit rekombinoituvat atomiytimien kanssa, säteily joka vasta nyt pääsee vapaasti liikkeelle havaitaan tänä päivänä kosmisena mikroaaltotaustasäteilynä.



## 12.2 Standardimallin ongelmia I

1. Horisonttiongelman: Laajenevassa maailmankaikkeudessa on olemassa niin kutsuttu hiukkashorisontti, jonka sisäpuolelta ainoastaan voimme saada tietoja. Tämän horisontin koko on:

$$\chi_h(z) = 6000h^{-1}\text{Mpc}(1+z)^{-1/2}$$

Punasiirtymällä  $z \approx 1100$  missä havaitsemme kosmisen taustasäteilyn (CMB) tämä vastaa  $\sim 180h^{-1}\text{Mpc}$  sädettä, eli noin  $1.8^\circ$  taivaalla. Miksi CMB:llä on niin tarkkaan sama lämpötila kaikissa suunnissa?

2. Laakeusongelman: Miksi maailmankaikkeuden geometria on laakea, eli  $\Omega = 1$ ? Voidaan osoittaa, että maailmankaikkeuden tiheys kehittyy alla olevan kaavan mukaisesti: Pienillä  $a$  (suurilla)  $z$   $\Omega$ :n täytyi olla hyvin lähellä ykköstä.

$$\Omega(a)^{-1} - 1 = -\frac{3Kc^2}{8\pi G\rho a^2}$$



## Standardimallin ongelmia II

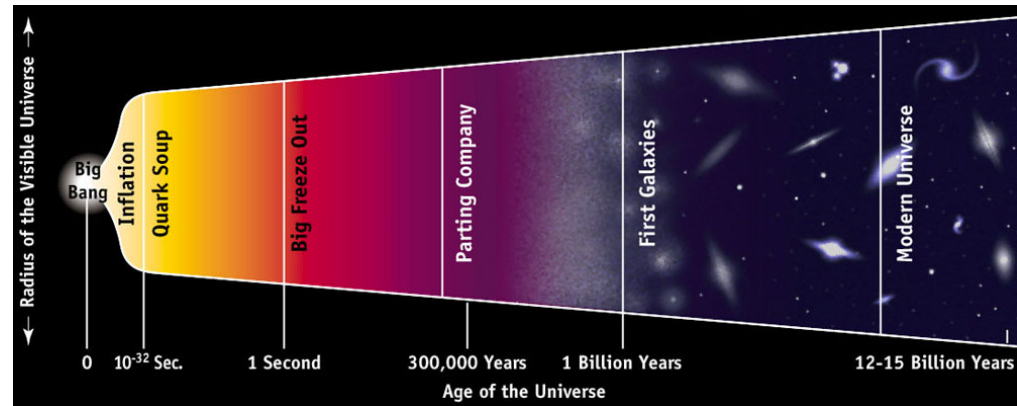
---

3. Monopoliongelma: Maailmankaikkeuden varhaisilla hetkillä tapahtuu useita faasimuunnoksia, kun voimien väliset symmetriat murtuivat ja voimat eriytyivät. Hiukkasfysiikan teorioiden mukaan näissä muunnoksissa syntyy helposti topologisia defektejä, kuten magneettisia monopoleja, jotka ennustusten mukaan dominoisivat massa tiheyttä:  $\Omega_0 \approx 5 \times 10^{11}$ , joka selvästikään ei pidä paikkansa!
4. Rakenteen synnyn ongelma: Maailmankaikkeudessa on galakseja ja rakennetta, joka osoittaa sen että tiheysjakauma ei ollut alkuaikoina täysin tasainen. Miten pienet tiheyshäiriöt syntyivät varhaisessa maailmankaikkeudessa, joista kaikki ympärillämme olevat galaksit ja rakenteet kehittyivät?



## 12.3 Inflaatioteoria

- Inflaatioteorian mukaan maailmankaikkeus laajeni eksponentiaalisesti ajanhetkellä  $t \sim 10^{-36} - 10^{-32}$  s, jonka välisenä aikana maailmankaikkeuden koko kasvoi noin tekijällä  $a \sim e^{60}$ .



- Inflaation saa aikaiseksi negatiivinen tyhjiöpaine joka on mahdollisesti seurausta faasimuunnoksissa (GUT- $\rightarrow$ EW) syntyvästä ”väärän” tyhjiökentän, niin kutsutun inflaton-kentän energiatiheydestä. Inflaatio edellyttää:

$$\rho + 3P/c^2 < 0 \Rightarrow a \propto e^{Ht}, \quad H = \sqrt{8\pi G \rho_{\text{vac}}/3}$$





# Ratkaisut standardimallin ongelmiin

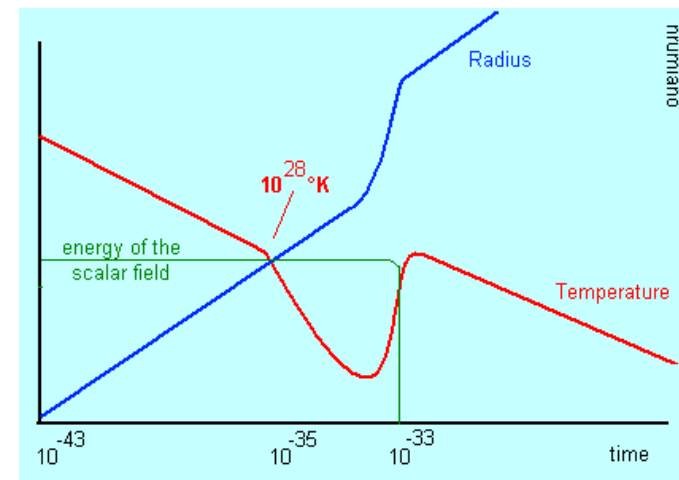
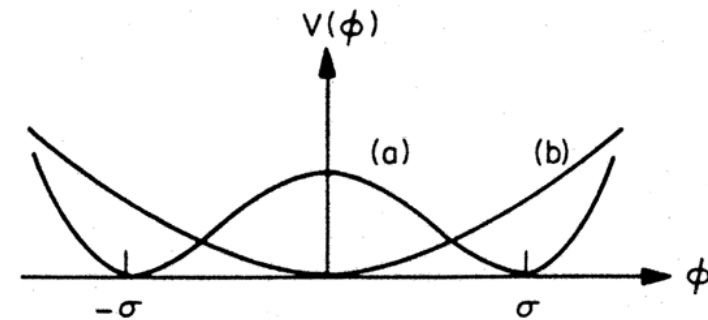
---

1. Ylivalonopeudella tapahtuma tilavuuden kasvu tekijällä  $(e^{60})^3 \approx 10^{78}$  (paljon paljon pienemmästä kuin atomi noin greippihedelmän kokoiseksi). Ylivalonnopeudella tapahtuva laajeneminen ratkaisee horisonttiongelman, koska koko havaittava maailmankaikkeus tuli hyvin pieneltä alueelta.
2. Nopea laajentuminen ratkaisee myös laakeusongelman, koska mahdollisesti epätasainen maailmankaikkeus tasoittuu kun siitä suurennetaan yksi tietty kohta hyvin voimakkaasti.
3. Monopoliongelma ratkeaa, koska monopolien tiheys harvenee tekijällä  $\approx 10^{78}$  inflaatiovaiheessa.
4. Kvanttifluktuaatiot inflaton-kentässä saavat aikaiseksi Gaussisesti jakautuneita tiheysfluktuaatioita, jotka toimivat galaksien synnyn siemeninä.



# Inflaation päättyminen

- Jotta voisimme ratkaista standardi-teorian ongelmat inflaation täytyy jatkua riittävän kauan, niin että maailmankaikkeus laajenee noin tekijällä  $a \approx e^{60}$ .
- Inflaation aikana inflaton-kentän arvo pienenee hallitusti (slow-roll), kun lämpötila laskee riittävän alas, kentän rakenne muuttuu ja kentän arvo liikkuu nopeasti kohti minimejä  $\pm\sigma$  ja inflaatio päättyy.
- Inflaatio päättyy hieman eri aikoihin eri alueilla kvanttifluktuaatioiden takia ja tämä johtaa tiheysvaihteluihin, joista maailmankaikkeuden rakenne myöhemmin muodostuu.
- Inflaation loppupuolella inflaton-kenttä muuttuu säteilyksi, joka lämmittää maailmankaikkeuden jälleen kuumaksi ja normaali kuuma Big-Bang laajentuminen jatkuu.





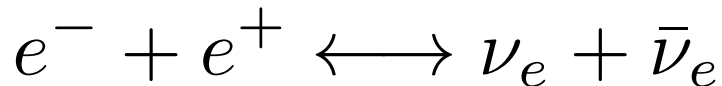
# Baryogeneesi

- Maailmankaikkeus koostuu baryoneista ja havaitsemme että baryoni-fotoni suhde on noin  $n_B/n_\gamma \approx 10^{-9}$ . Varhaisessa maailmankaikkeudessa oli yhtä paljon baryoneja ja anti-baryoneja, mutta annihiloituminen ei ollut täysin symmetristä ja tuloksena jokaista  $10^9$  antibaryonia kohden oli  $10^9+1$  baryonia.
- Baryonien ja anti-baryonien välinen epäsymmetria on mahdollinen mikäli kolme Sakharovin ehtoa täyttyvät:
  1. Baryoni-luku ei säily jossain reaktiossa:  $\Delta B \neq 0$ .
  2. CP-symmetria ei ole voimassa (C=Charge ja P=parity)
  3. Järjestelmän tulee lisäksi olla epätasapainossa.
- Tarkkaa varmistettua mallia sille miten baryogeneesi tapahtui ei ole olemassa, mutta prosessi liittyi mahdollisesti yhtenäisteorian symmetrian murtumiseen.

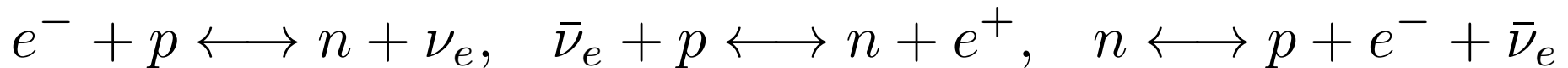


## 12.4 Nukleosynteesi

- Maailmankaikkeuden laajentuessa ja lämpötilan laskiessa reaktiot jotka pitävät eri hiukkaset keskenään tasapainossa lakkaavat toimimasta hiukkasten massojen mukaisessa järjestyksessä.
- Elektronien lepomassa on 511 keV ja kun lämpötila oli vielä yli  $T \geq 10^{10}$  K seuraavat reaktiot olivat tasapainossa:



- Missä  $\nu_e$  on elektronin neutriino ja  $\bar{\nu}_e$  on elektronin antineutriino. Elektroninen, positronien ja neutriinojen suuri määrä piti neutronien ja protonien väliset reaktiot käynnissä:





## Nukleosynteesi II

---

- Tasapainossa voimme laskea neutronien ja protonien lukumäärien välisen suhteen. Neutroneja on jonkun verran vähemmän, koska niillä on protoneja suuremmat massat:

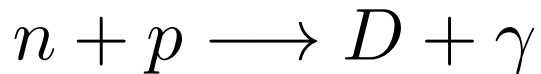
$$n/p = e^{-Q/k_B T}, \quad Q = (m_n - m_p)c^2 = 1.293 \text{ MeV}$$

- Kun elektroni-positroni pareja oli vielä paljon, myös neutriinoiden lukumäärä oli suuri ja n/p-reaktiot olivat tasapainossa. Noin 1 sekunnin ikäisessä maailmankaikkeudessa aineen lämpötila oli jäähtynyt arvoon  $k_B T \leq 0.8 \text{ MeV}$  ja lämpötila oli liian alhainen pitämään neutroni-protoni ja neutriinoreaktiot käynnissä.
- Neutroni-protoni suhde jäätty arvoon:  $n/p \approx 1/5$



## Nukleosynteesi III

- Neutronit ovat stabiileja vain atomiytimissä, vapaa neutroni hajoaa protoniksi, elektroniksi ja antineutriinoksi puoliintumisajassa  $\tau=887\pm 2$  s.
- Vain hyvin harva neutroni olisi jäänyt jäljelle maailmankaikkeuteen, mikäli ne eivät olisi muodostaneet deuterium-ytimiä (eli vetyä, jossa on  $1p+1n$ ) reaktiossa:



- Elektroni-positroni parien kadottua ( $T \leq 3 \times 10^9$  K) maailmankaikkeuden energiatiheys oli lähes pelkästään mustan kappaleen säteilyä. Säteilyn dominoimassa maailmankaikkeudessa  $a \propto t^{1/2}$  ja  $T \propto a^{-1}$ , tarkemmin (kts. myös luento 6):

$$t = \left( \frac{3c^2}{32\pi G a_B T^4} \right)^{1/2} \approx 230 \text{ s} \left( \frac{10^9 \text{ K}}{T} \right)^2$$



## Nukleosynteesi IV

- Deuteriumin tuotanto pääsi kunnolla vauhtiin kun  $T \leq 10^9$  K, tähän mennessä noin neljäsosa vapaista neutroneista oli hajonnut ja jäljellä oleva neutroni-protoni suhde oli noin  $n/p \approx 1/7$ .
- Deuterium muodostaa helposti  $^4\text{Helium}$ -ytimiä ( $2p+2n$ ). Käytännössä kaikki neutronit muodostivat Helium-ytimiä ja jäljelle jääneet protonit Vety-ytimiä,  $n/p \approx 1/7$  suhteesta seuraa että noin 25% maailmankaikkeuden massasta on heliumia ja noin 75% vetyä.
- Lisäksi jäljelle jäi pieniä määriä deuteriumia,  $^3\text{Heliumia}$  ja myös hyvin pieniä määriä litiumia.
- Raskaampia alkuaineita ei synnyt alkuräjähdyksessä, koska maailmankaikkeuden lämpötila ja tiheys laskevat hyvin nopeasti. ”Kolmen ensimmäisen minuutin” jälkeen nukleosynteesi päättyy.



# Nukleosynteesin havainnot

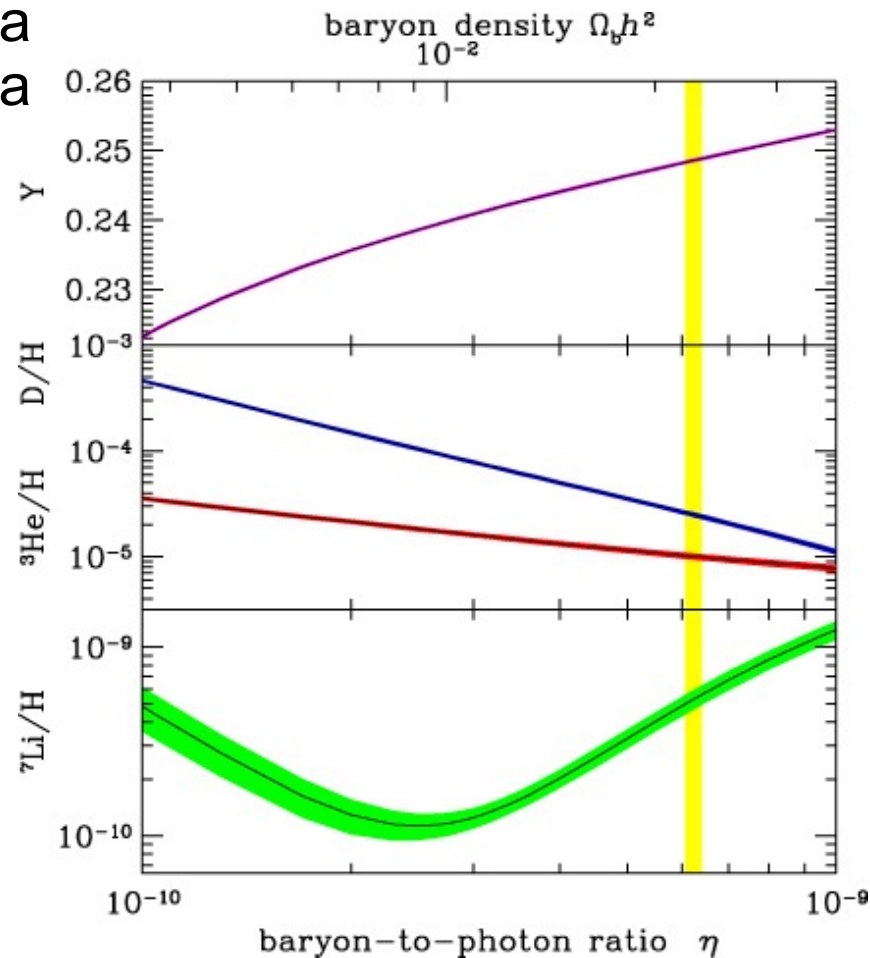
- Havaitsemalla heliumin, deuteriumin ja litiumin määriä maailmankaikkeudessa voidaan arvioida hyvin tarkkaan maailmankaikkeuden baryonien kosmista tiheyttä ja myös baryoni-fotoni suhdetta.

- Tämän hetken paras arvio:

$$\Omega_b h^2 = 0.026$$

$$\eta = 6 \times 10^{-10}$$

- Nukleosynteesi on modernin kosmologian kulmakiviä ja suurimpia menestystarinoita.





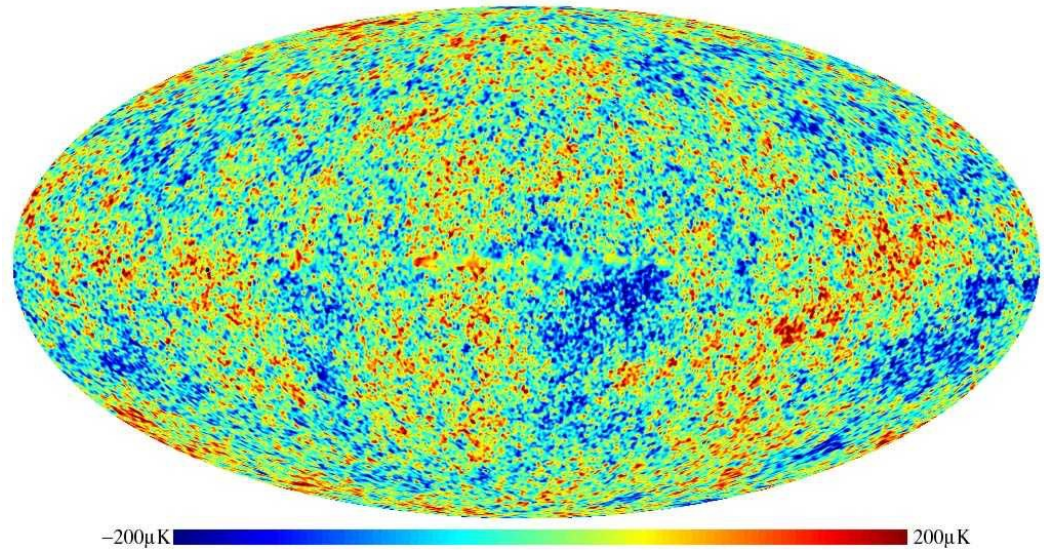
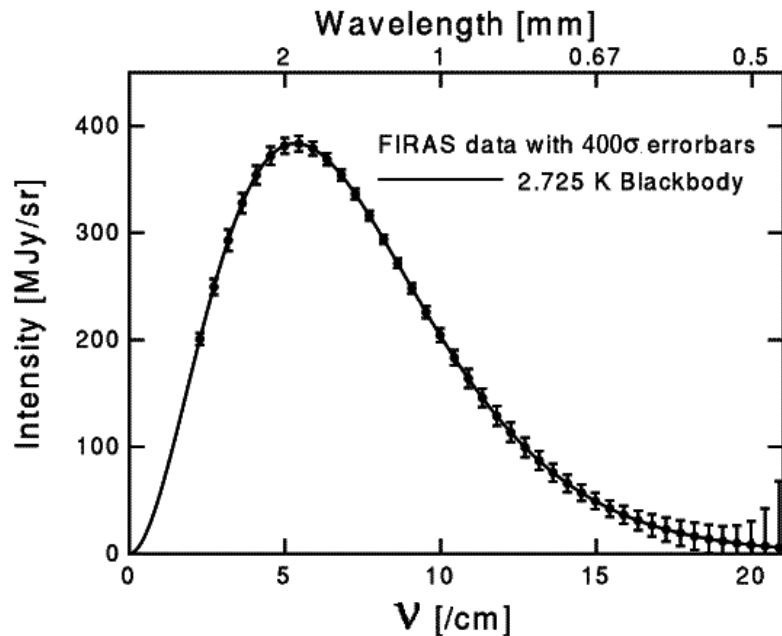


## 12.5 Rekombinaatio ja CMB:n synty

- Seuraavien muutamien satojen tuhansien vuosien aikana maailmankaikkeudessa ei tapahtunut juuri mitään. Taustasäteily oli riittävän energieettistä pitääkseen aineen ionisoituneena. Maailmankaikkeuden rakenne ei voinut muodostua koska säteily oli kytkettynä aineeseen Thomson-sironnan kautta (yksityiskohdat ensi viikon luennolla 13).
- Säteilyn energiatiheys laskee  $\propto a^{-4}$  ja aineen  $\propto a^{-3}$ . Noin punasiirtymällä  $z \approx 3000$  säteilyn ja aineen energiatiheydet olivat yhtä suuria, jonka jälkeen alkoi pitkä aineen valtakausi.
- Lämpötilan yhä laskiessa saavuttiin punasiirtymälle  $z \approx 1100$  noin 380,000 vuotta alkuräjähdyksen jälkeen. Tällöin lämpötila oli noin  $T = 3000$  K ja atomit rekombinoituivat elektronien kanssa, nyt säteily oli vapaa kulkemaan ja tuloksena syntyi kosminen taustasäteily.



# Kosminen mikroaaltotaustasäteily (CMB)

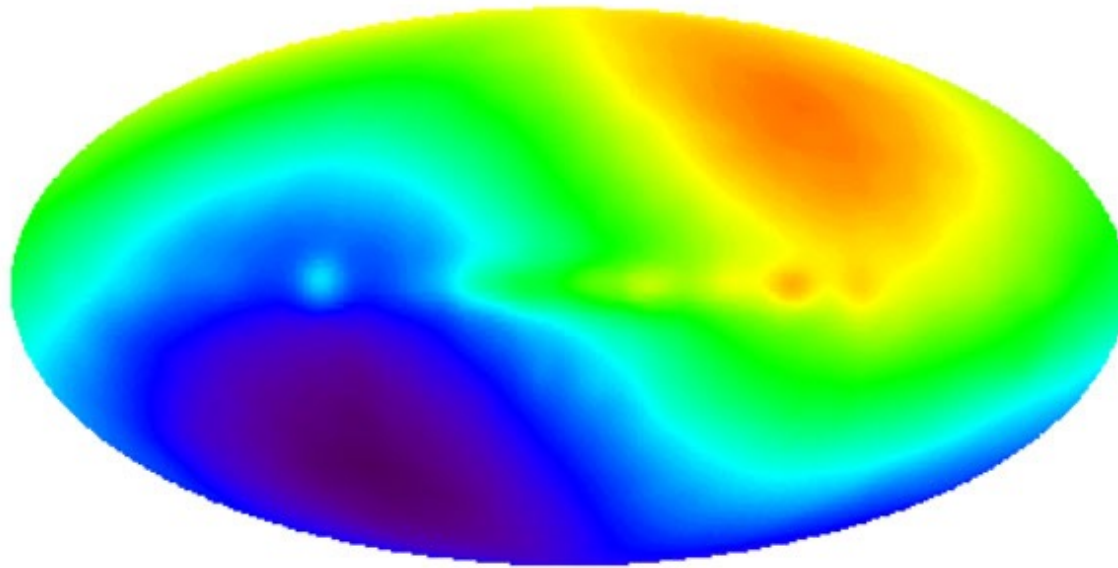


- Kosminen mikroaaltotaustasäteily on alkuräjähdyksen jälkihehku. Säteily noudattaa äärimmäisen tarkkaan mustan kappaleen säteilyn spektriä ja sen tämän hetkinen lämpötila on  $T=2.728\pm 0.002\text{K}$  (punasiirtynyt tekijällä  $z\sim 1100$  mikroaaltoalueelle).

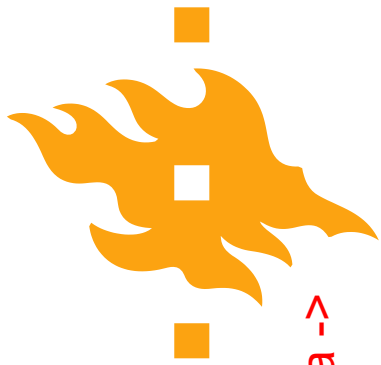


# Dipolikomponentti

---



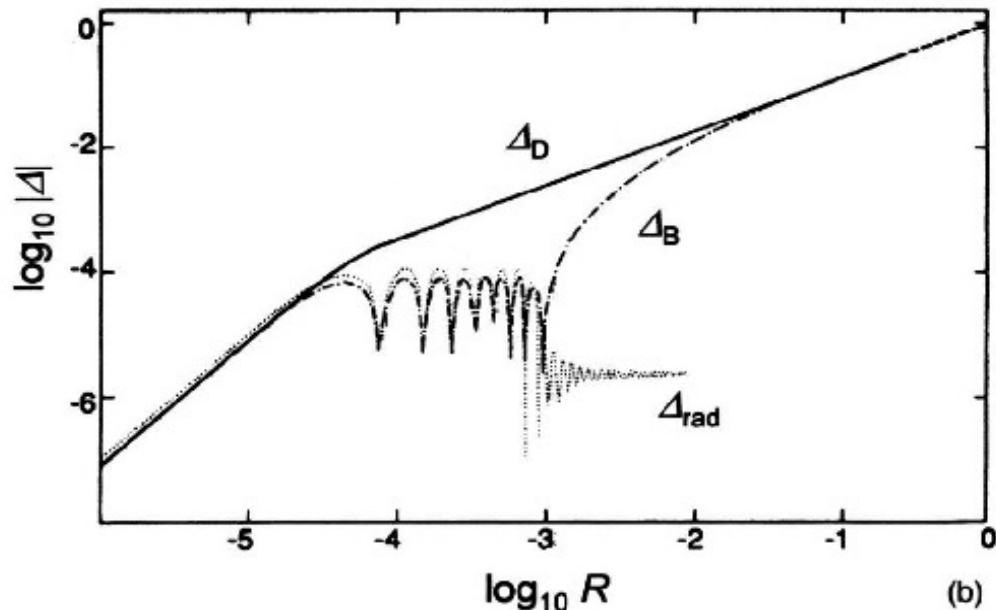
- Suurin fluktuaatio taustasäteilyssä on kokoluokkaa  $\delta=10^{-3}$ . Tämä dipolikomponentti johtuu aurinkokunnan ja meidän galaksin liikkeestä CMB:n suhteen nopeudella  $\approx 630 \text{ kms}^{-1}$ . Liikkeen suuntainen osa taivaasta on hieman kuumempi ja vastakkainen puoli kylmempi.



Tiheyshäiriöiden koko kasvaa ->

# Pienten häiriöiden synty CMB:ssä

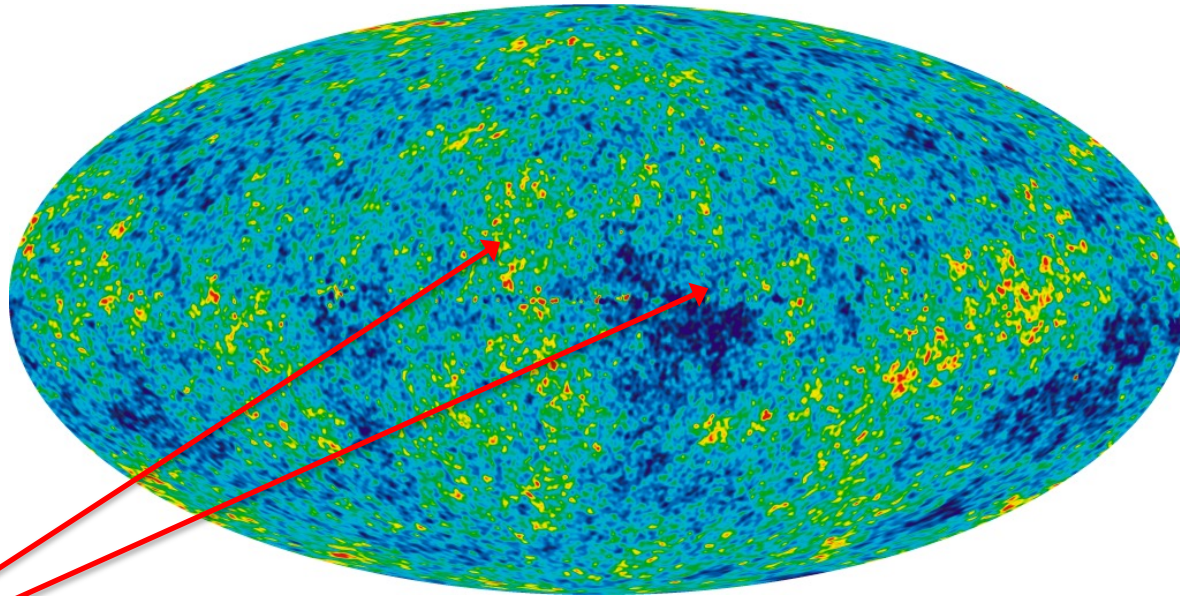
Maailmankaikkeuden koko kasvaa ->



- Taustasäteilystä löytyy lisäksi pieniä kosmisia häiriöitä,  $\delta=10^{-5}$ . Nämä syntyvät fluktuaatioista plasmassa (ääniaaltoja) ja täten havaitut lämpötilavaihtelut kertovat suoraan kuinka suuria tiheysvaihtelut olivat.



# Galaksien synnyn alkuehdot



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

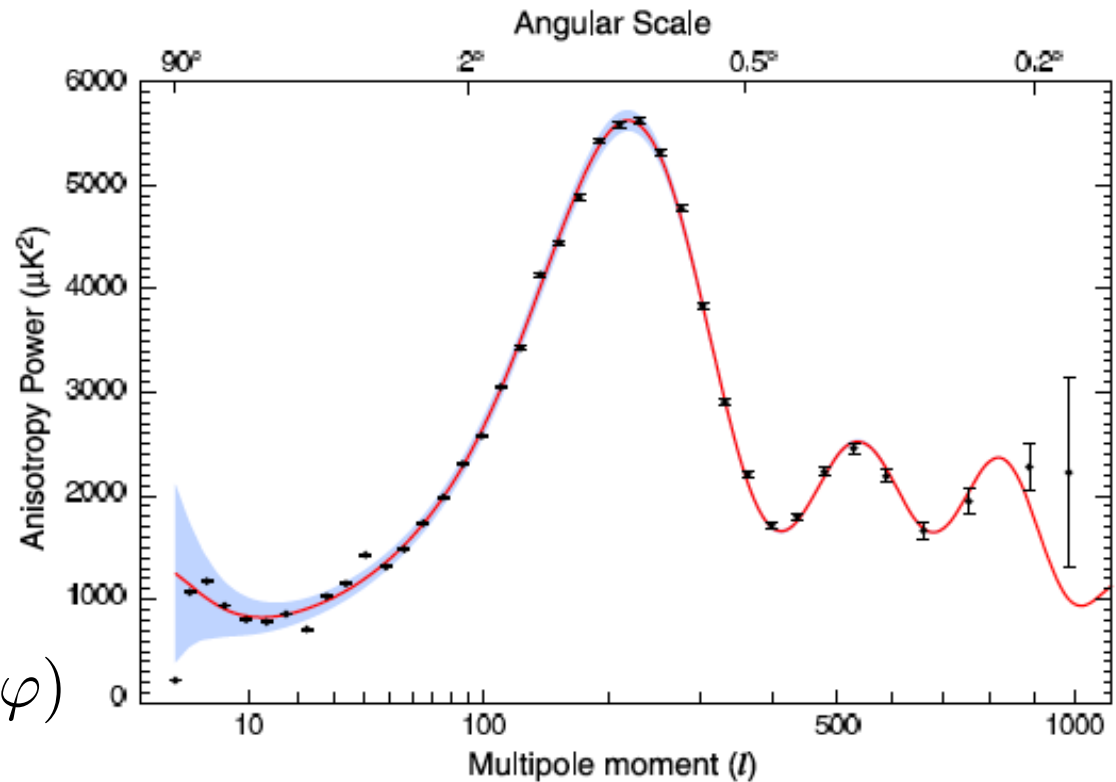
Tänään galakseilla:  $\delta \sim 10^6$   
ja galaksijoukoilla:  $\delta \sim 10^3$



# Taustasäteilyn tehospektri

- Taustasäteilystä häiriöitä voidaan kuvata tehospektrillä, joka kertoo kuinka suuria fluktuaatioita esiintyy eri skaaloilla. Suurimmat fluktuaatiot ovat  $1^\circ$ -skaalalla:

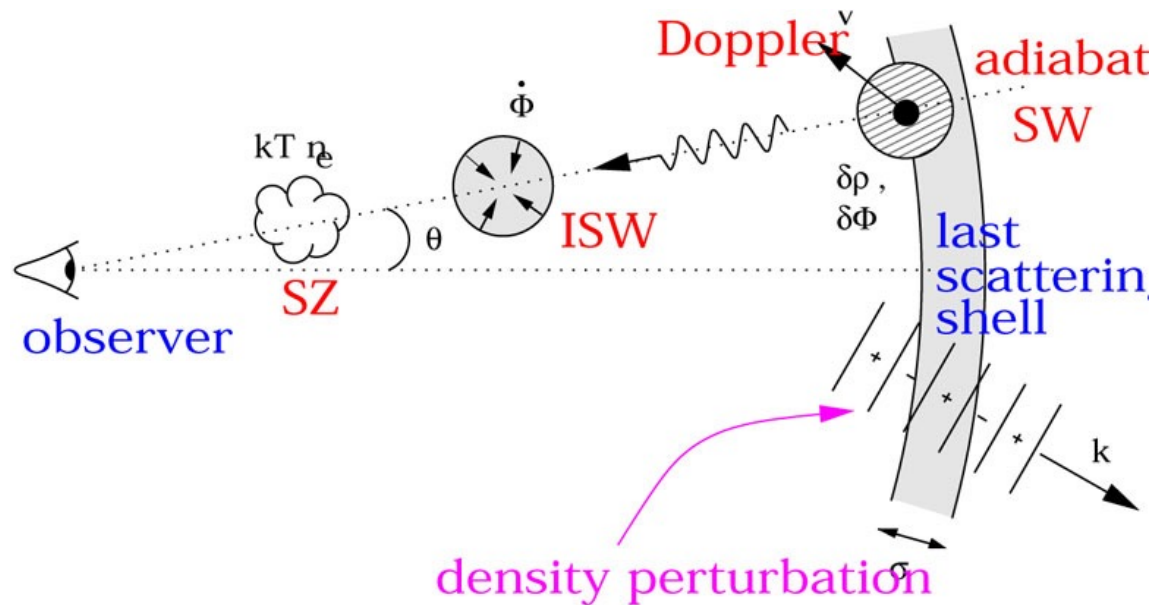
$$\frac{\Delta T}{T} = \sum_{l,m} a_{l,m} Y_{l,m}(\vartheta, \varphi)$$





# Taustasäteilyn korjaustekijät

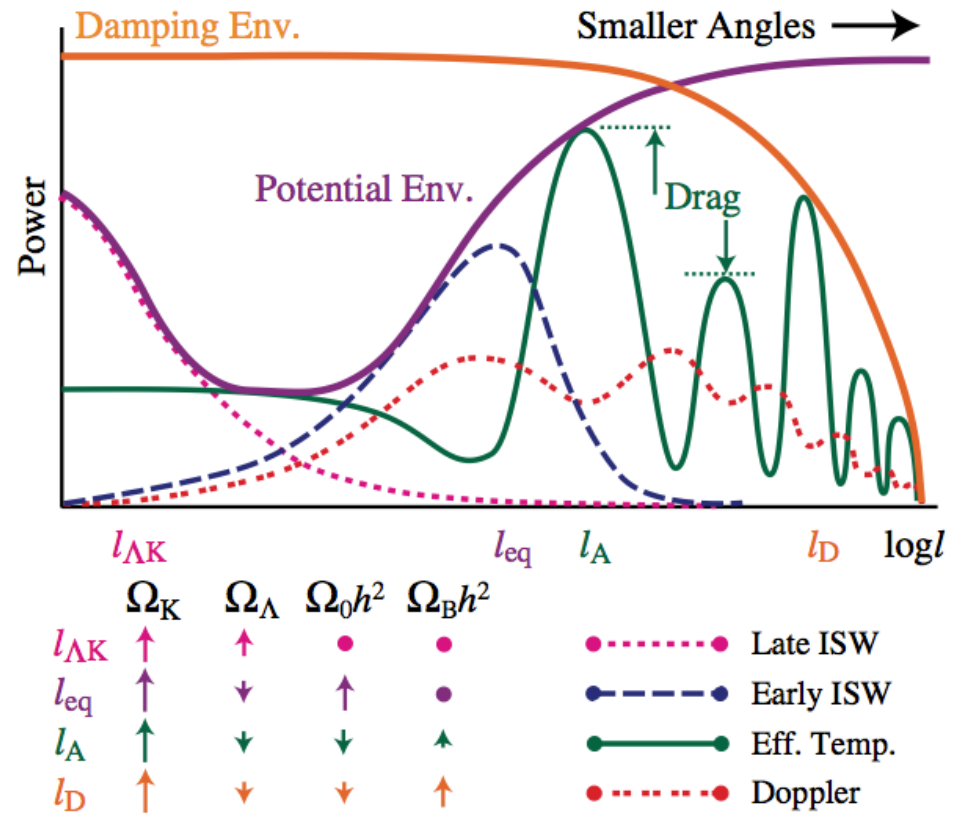
- Punasiirtymältä  $z \approx 1100$  lähtevä säteily kulkee läpi koko maailman-kaikkeuden matkallaan meidän luokse.
- Havainnoissa täytyy ottaa huomioon useita korjaustekijöitä, kuten gravitaatiopunasiirtymiä, sirontoja, gravitaatio-linssiilmiöitä jne. ja ne vaikuttavat kaikki lopputulokseen.





# Taustasäteily ja kosmologia

- Tutkimalla taustasäteilyä saamme paljon tietoa maailmankaikkeuden rakenteesta ja kosmologisista parametreista.
- Esimerkiksi ensimmäisen huipun paikka kertoo maailmankaikkeuden kokonaisgeometrian (laakea). Toisen huipun korkeus kertoo paljonko maailmankaikkeudessa on ainetta, jne.







# Mitä opimme?

---

1. Maailmankaikkeus syntyi kuumassa alkuräjähdyksessä ja sen aikaisia vaiheita tutkitaan parhaiten hiukkaskiihdyttimillä.
2. Standardimallilla on useita ongelmia, joita inflaatioteorian eksponentiaalinen nopea laajeneminen voi selittää.
3. Big-bang nukleosynteesi ennustaa että maailmankaikkeudessa tulisi olla noin  $\approx 75\%$  vetyä ja  $\approx 25\%$  heliumia.
4. Kun lämpötila laski riittävän alas atomit ja elektronit rekombinoituivat, säteily pääsi täten vapaaksi ja kosminen mikroaaltotaustasäteily syntyi.
5. Tutkimalla mikroaaltotaustasäteilyä voimme määritellä kosmologisen mallin parametreja.