



Galaksit ja kosmologia

FYS2052, 5 op, syksy 2023

E207 Physicum

Luento 12: Varhainen maailmankaikkeus

27/11/2023



Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita I

- **Kalvo 3:** Mitä lähemmäksi alkuhetkeä mennään, sitä suuremmiksi energiat kasvavat. Alkuräjähdyksen alkuhetkiä voidaan täten tutkia hiukkaskiihdyttimillä -> hiukkaskosmologia.
- **Kalvo 3:** Planckin aika on lyhyin mahdollinen aikayksikkö, eli se aika joka valolla kestää kulkea Planckin pituus.

$$l_P = \sqrt{\frac{hG}{2\pi c^3}} \Rightarrow t_P = \frac{l_P}{c} = \sqrt{\frac{hG}{2\pi c^5}} \approx 5.4 \times 10^{-44} \text{ s}$$



Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita II

- **Kalvo 4:** Teorioiden mukaan kaikki voimat olivat aluksi yksi ja sama voima, painovoima eriytyy ensimmäiseksi, yhtenäisteorian epookilla (Grand Unified Theory) jäljelle jäävät vahva ja heikko ydinvoima, sekä sähkömagneettinen voima.
- **Kalvo 4:** Inflaatiovaihe on keskeinen osa kosmologista standardimallia, mutta vielä ei tarkalleen ymmärretä mikä sai sen aikaiseksi, erilaisia malleja on runsaasti.
- **Kalvo 4:** Vielä tuntematon prosessi aiheutti baryogeneesin, eli valtaosa baryoneista annihiloitui anti-baryonien kanssa. Baryoni/fotoni suhde on noin $\sim 10^{-9}$.



Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita III

- **Kalvo 5:** Kaukaisin kohde mitä voidaan nähdä elektromagneettisen säteilyn avulla on kosminen mikroaaltotausta-säteily (maailmankaikkeuden ikä $t \sim 380\,000$ vuotta). Neutriinoja voitaisiin teoriassa havaita $t \sim 1$ sekunnin ikäisestä maailmankaikkeudesta ja gravitaatioaaltoja mahdollisesti jopa inflaatiovaiheesta $t \sim 10^{-32}$ s.
- **Kalvo 6:** Maailmankaikkeudessa on olemassa hiukkas-horisontti, jonka sisältä voimme saada informaatiota (kts. Luento 6):

$$\int_0^{r_H} dr = \chi(r_H) = \int_0^{t_0} \frac{cdt}{a(t)} = \int_0^{a_0} \frac{da}{a} \left[\frac{8\pi G \rho(a) a^2}{3c^2} - K \right]^{-1/2}$$



Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita IV

- **Kalvo 6:** Hiukkashorisonnin koko punasiirtymällä $z \sim 1100$ noin 1.8° taivaalla. Miksi kosmisen mikroaaltotaustasäteilyn lämpötila on kaikkialla sama $\Delta T \sim 10^{-5}$ K asteen tarkkuudella?
- **Kalvo 6:** Laakeusongelma. Maailmankaikkeus on laakea tai ainakin hyvin lähellä laakeutta. Laajenevassa maailmankaikkeudessa ρa^2 -tekijä on pienentynyt tekijällä $\sim 10^{60}$ Planck-ajan jälkeen, jolloin $(\Omega - 1)^{-1}$ on vastaavasti täytynyt suurentua tekijällä $\sim 10^{60}$, koska yhtälön oikealla puolella on vain vakioita.

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



Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita V

- **Kalvo 7:** Inflaatiomaali ennustaa, että kvanttifluktuaatiot inflaton-kentässä aiheuttivat tiheysvaihteluita tiheyskenttään, jotka toimivat myöhemmin siemeninä galaksien synnylle.
- **Kalvo 8:** Inflaatiovaiheessa maailmankaikkeuden laajeneminen oli voimakkaasti kiihtyvää, tämä edellyttää negatiivista painetta, katso FRW1 yhtälö luennoilta 5.

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + 3\frac{P}{c^2} \right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

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



Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita VI

- **Kalvo 10:** Inflaation päätyttyä maailmankaikkeuden tilavuus oli kasvanut noin tekijällä $\sim 10^{78}$ ja sen säde oli noin ~ 10 cm – 100 m, riippuen siitä milloin inflaatio tarkalleen päättyi.
- **Kalvo 10:** Voimakas laajeneminen laski maailmankaikkeuden lämpötilan hyvin alas, joten inflaton-kentän piti muuttua säteilyksi ja kuuma alkuräjähdyks pääsi taas vauhtiin, huom. jotkin tutkijat kutsuvat tätä hetkeä kuumaksi alkuräjähdykseksi.
- **Kalvo 11:** Parity tarkoittaa hiukkasfysiikassa, että muutetaan yhden spatiaalisen koordinaatin merkkiä, esim. $x \rightarrow -x$.



Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita VII

- **Kalvo 12:** Nukleosynteesi on alkuräjähdysteorian vahvimpia todisteita, muuten olisi erittäin vaikeata selittää miksi kaikkialla maailmankaikkeudessa on noin ~75% vetyä ja ~25% heliumia, kaikkia muita aineita on suhteessa hyvin vähän.
- **Kalvo 13:** Maailmankaikkeuden laajentuessa lämpötila laskee ja kun $t \sim 1s$, eli kun lämpötila on noin $k_B T \leq 0.8 \text{ MeV}$ neutroni-protoni ja neutriinoreaktiot eivät pysy enää käynnissä ja neutroni-protoni suhde ”jäätty” pysyvään arvoon:

$$n/p = e^{-Q/k_B T} \Rightarrow n/p = e^{-1.293 \text{ MeV} / 0.8 \text{ MeV}} \approx 0.1986 \approx 1/5$$



Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita VIII

- **Kalvo 14:** Vapaat neutronit hajoavat, ja ne voivat pysyä stabiileina vain atomiytimissä. Maailmankaikkeuden laajenemisnopeus yhdessä neutronien hajoamisen puoliintumisajan kanssa ennustaa vedyn ja heliumin määrän maailmankaikkeudessa.
- **Kalvo 15:** Suhde $n/p \sim 1/7$ tuottaa seuraavan määrän vetyä ja heliumia. Oletetaan, että meillä on 14 hiukkasta ($2n+12p$), oletetaan, että neutronit muodostavat helium-ytimiä, eli lopputuloksena on 1 He- ($2p+2n$) ja 10 H-ydintä (10 p). Eli massasuhteeksi saamme H: $10/14 \sim 72\%$ ja He: $4/14 \sim 28\%$. Tarkemmat laskut antavat H: $\sim 75\%$ ja He: $\sim 25\%$.



Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita IX

- **Kalvo 17:** Maailmankaikkeus laajeni ja viilentyi, mutta aluksi ei voinut tapahtua paljoakaan, koska aine ja säteily olivat tiukasti kytkettynä toisiinsa Thomson sironnan kautta.
- **Kalvo 17:** Lopulta kun maailmankaikkeuden ikä oli noin $t \sim 380\,000$ vuotta, lämpötila $T \sim 3000\text{ K}$ elektronit rekombinoituivat elektronien kanssa (huom. termi on vähän harhaanjohtava tässä, koska kyseessä oli ensimmäinen kombinaatio). Lisäksi huomatkkaa, että fotonien suuren lukumäärän takia, lämpötilan piti laskea niinkin alas kuin $T \sim 3000\text{ K}$, koska fotonijakauman energeettisessä hännässä oli riittävästi korkean energian fotoneita.



Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita X

- **Kalvo 18:** Kosminen mikroaaltotaustasäteily kuvaa maailmankaikkeuden lämpötila- ja tiheysvaihteluita kun $z \sim 1100$. Oleellisesti näemme baryoni-fotoni plasmassa olleita ääniaaltoja, eli aineen yli- ja alitihentymiä.
- **Kalvo 19:** Dipolikomponentti johtuu aurinkokunnan liikkeestä CMB:n suhteen.
- **Kalvo 20:** Galaksit kehittyivät pienistä tiheyshäiriöistä jotka ovat havaittavissa CMB:ssä kokoluokka $\delta \sim 10^{-5}$ (baryoniset häiriöt) mutta tärkeämmät tiheyshäiriöt pimeässä aineessa $\delta \sim 10^{-3}$ eivät ole suoraan havaittavissa (lisää tästä ensi viikon luennolla).



Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita XI

- **Kalvo 22:** Kosmisen mikroaaltotaustasäteilyn tehospektri on yksittäisistä kosmologista havainnoista kaikkein tärkein. Etenkin ensimmäisen fluktuaatio-piikin havaittu koko taivaalla on erittäin tärkeä maailmankaikkeuden koon mittauksessa.
- **Kalvo 22:** Voimme laskea mikä tämän ääniaallon fysikaalinen koko tulisi olla ja havainnoista saamme sen kulmakoon taivaalla, josta voidaan laskea kulmaläpimitta-etäisyys, jonka avulla saadaan maailmankaikkeuden geometria.
- **Kalvo 23:** CMB-analyysi on varsin monimutkaista, koska etualan komponentteja on paljon ja ne pitää kaikki huomioida.