

Galaksit ja kosmologia – harjoitus 6 syksy 2023

Ratkaisut on palautettava ma 4.12. klo 12.00 mennessä kurssin Moodle-sivulle.

- Havaitsemme galaksijoukkoa, jossa kuuma galaksienvälinen kaasun säteilee röntgenalueella. Röntgenspektristä havaitaan, että tyypillisen röntgenfotonin energia on noin $E = k_B T = 0.5 \text{ keV}$.
 - Mikä on joukon galaksienvälisen kaasun lämpötila?
 - Galaksien radiaalinen nopeusdispersio joukossa on $\sigma \sim 350 \text{ km s}^{-1}$. Osoita että tällä nopeudella liikkuvan vetyatomien kineettinen energia vastaa suurinpiirtein yksi-ulotteista yksiatomisen kaasun liike-energiaa lämpötilassa $T \sim 7 \cdot 10^6 \text{ K}$.
- Oletetaan, että Coma-galaksijoukossa liikkuu galaksi keskimääräisen radiaalisen nopeusdispersion $\sigma_r \sim 977 \text{ km s}^{-1}$ suuruisella vakionopeudella. Laske, kuinka kauan galaksilta kuluu aikaa joukon reunalta reunalle liikkumiseen, jos oletetaan joukon halkaisijaksi $R \sim 6 \text{ Mpc}$. Laske saamasi tuloksen perusteella arvio galaksijoukon relaxaatioajalle t_{relax} kun tyypillinen galaksien lukumäärä joukossa on $N \sim 10^3$, ja vertaa tätä lukua Hubblen aikaan $t_H = 1/H_0$. Pohdi ovatko galaksit Coma-galaksijoukossa dynaamisesti relaksoituneita? Ovatko aikaskaaloja laskettaessa tehdyt yksinkertaisuudet realistisia galaksijoukolle?
- Olettaen (virheellisesti), että galaksien nykyiset luminositeetit eivät muutu ja että säteilyn energia ei vähene punasiirtymän funktiona, laske kuinka kauan kestäisi maailmankaikkeuden galakseilla säteillä sama energiamäärä, kuin mikä tällä hetkellä löytyy kosmisesta taustasäteilystä (muistele säteilyn energiatiheyden käsitettä esim. 3. laskuharjoituksista). Käytä maailmankaikkeuden kokonaisluminositeetille arvoa $L_{\text{Universe}} \approx 1.4 \cdot 10^8 h L_{\odot} \text{ Mpc}^{-3}$. Arvioi tuloksen perusteella voisiko kosmisen mikroaaltotaustan energia olla edes teoriassa peräisin tähdistä?
- Deuteriumin tuotanto pääsi käyntiin varhaisessa maailmankaikkeudessa kun lämpötila oli laskenut arvoon $k_B T \lesssim 70 \text{ keV}$. Osoita, että tämä tapahtui noin 350 sekuntia alkuräjähdyksen jälkeen ja osoita lisäksi, että noin 24% vapaista neutroneista oli hajonnut tähän ajanhetkeen mennessä, kun neutronien puoliintumisaika on $\tau = (879.4 \pm 0.6) \text{ s}$.
 - Laske miten nukleosynteesin ennustama heliumin (${}^4\text{He} = 2\text{p} + 2\text{n}$) määrä eroaisi nykyisestä arvosta, mikäli neutronien hajoamis aika olisi ollut i) $\tau = 700 \text{ s}$ tai ii) $\tau = 1100 \text{ s}$ arvon $\tau = (879.4 \pm 0.6) \text{ s}$ sijaan.
- Maailmankaikkeuden kehitys hyvin kaukaisessa tulevaisuudessa.
 - Lähtien liikkeelle Friedmannin yhtälöistä muodosta yleinen lauseke mittakaavatekijän a :n kehitykselle ajan funktiona laakeassa täysin pimeän energian dominoimassa maailmankaikkeudessa, $\Omega_{\Lambda,0} = 1$, $\Omega_{m,0} = 0$, $h = 0.674$
 - Planckin havaintojen mukaan $\Omega_{\Lambda,0} = 0.685$, $\Omega_{m,0} = 0.315$, $h = 0.674$ ja maailmankaikkeus on laakea. Johda vastaava yleinen lauseke mittakaavatekijä a :n kehitykselle ajan funktiona tässä mallissa. (Vihje: samantyylinen lasku tehtiin 3. laskuharjoituksissa.)
 - Vertaa saatuja lausekkeitä ja laske maailmankaikkeuden mittakaavatekijä a tulevaisuuden ajanhetkille $t = 100$ ja $t = 1000$ miljardia vuotta alkuräjähdyksen

jälkeen molemmissa malleissa a ja b. Lopuksi vertaa saatuja lausekkeitä kosmis-
ta inflaatiota kuvaaviin lausekkeisiin. Muistuttaako maailmankaikkeuden alun
kehitys maailmankaikkeuden loppua?