

Palautus ke 6.12. klo 22:00 mennessä, ks. tarkemmat ohjeet Moodlesta.

- Piirrä vähintään yksi alimman kertaluvun Feynmanin diagramma kullekin seuraavista prosesseista ja nimeä kyseessä oleva vuorovaikutus:
  - $\mu^- + \mu^+ \rightarrow \gamma + \gamma$
  - $\nu_\mu + e^- \rightarrow \mu^- + \nu_e$
- Piirrä vähintään yksi alimman kertaluvun Feynmanin diagramma kullekin seuraavista heikon vuorovaikutuksen prosesseista:
  - $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$
  - $\nu_\mu + p \rightarrow \nu_\mu + p$
  - $\tau^- \rightarrow \nu_\tau + e^- + \bar{\nu}_e$
- Piirrä prosessille  $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$  alimman kertaluvun Feynmanin diagrammat, joissa välittäjähiukkasena on  $Z^0$  tai  $W^\pm$  (yksi diagramma kumpaakin lajia riittää). Ovatko vastaavat diagrammat olemassa myös prosessille  $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$ ?
- Yhdestä  $d$ -kvarkista ja yhdestä  $\bar{u}$ -kvarkista koostuvan varatun pionin  $\pi^- = d\bar{u}$  todennäköisin hajoamiskanava on  $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ . Piirrä prosessille vähintään yksi alimman kertaluvun Feynmanin diagramma.
- Ensi viikon luennoilla opitaan, että varhaisen maailmankaikkeuden ikä  $t$  sekunneissa kytkeytyy maailmankaikkeuden lämpötilaan  $T$  relaatiolla

$$t \approx \frac{2.4}{\sqrt{g_*(T)}} \left( \frac{T}{\text{MeV}} \right)^{-2} \text{ s},$$

missä  $g_*(T)$  on vapausasteiden määrää mittaava tunnettu funktio. Kvarkit sitoutuvat hadronisiksi yhdisteiksi QCD-transitiossa, joka tapahtuu lämpötilassa  $T_{\text{QCD}} \sim 150$  MeV (korkeammissa lämpötiloissa ei esiinny hadroneita, vaan kvarkkien ja gluonien muodostamaa plasmaa).

- Arvioi maailmankaikkeuden ikää QCD-transition hetkellä, kun  $g_*(T_{\text{QCD}}) = 17.25$ .
- Protonit ja neutronit muodostavat atomiytimiä nukleosynteesiksi (BBN = Big Bang Nucleosynthesis) kutsutussa prosessissa, joka tapahtuu lämpötilassa  $T_{\text{BBN}} \sim 0.1$  MeV. Arvioi maailmankaikkeuden ikää nukleosynteesin tapahtuessa, kun  $g_*(T_{\text{BBN}}) = 3.363$ .
- Maailmankaikkeuden laajenee, jolloin kaikki pituusskaalat venyvät verrannollisena ns. skaalatekijään  $a(t)$ , jolle pätee  $a(t) \propto T^{-1}$ . Tämä tarkoittaa, että jos levossa olevien kappaleiden A ja B välinen etäisyys jollakin referenssihetkellä  $t_0$  on  $d_0$ , niiden välinen etäisyys hetkellä  $t$  voidaan kirjoittaa muodossa  $d(t) = a(t)d_0$ , jossa  $a(t_0) = 1$ . Arvioi tämän perusteella, kuinka paljon maailmankaikkeus on laajentunut (eli etäisyydet kasvaneet) QCD- transition ja nukleosynteesin välillä.