

Vastaa valintasi mukaan korkeintaan kolmeen (3) tehtävään! Voit vastata suomeksi, ruotsiksi tai englanniksi.

1.
  - a) Kerro, mitä tarkoitetaan *fuusiolla* ydinfysiikassa. Mitä etuja ja toisaalta haasteita fuusion valjastamiseen ihmiskunnan palvelukseen liittyy? Käsittele vastauksessasi ainakin Coulombin vallia, reaktiotaajuutta sekä plasmata. (2p)
  - b) Rakenna nyt *Lawsonin kriteeri* sille, että fuusiovoimalaitoksesta saataisiin ulos nettoenergiaa. Lähtö liikkeelle plasman energiataseesta ja johda sen avulla epäyhtälö plasman hiukkastiheyden  $n$  ja koossapitoajan  $\tau$  tulolle. Plasman termienergiatiheys on  $E_T = 3nk_B T$ , elektronien jarrutusäteilytehotiheys on  $P_{br} = \alpha_b n^2 (k_B T)^{1/2}$ , fuusiotehotiheys on  $P_f = \frac{1}{4} n^2 \langle \sigma v \rangle Q$  ja hyötösuhde sähkön tuottamiselle on  $\eta$ . Tässä  $\sigma$  on fuusioreaktion vaikutusala,  $v$  hiukkasten nopeus ja  $Q$  reaktiossa vapautuva energia.  
Laske saamallasi lausekkeelle lukuarvo, kun tarkastellaan deuterium-tritium-fuusiota, jolle  $\langle \sigma v \rangle = 4,5 \cdot 10^{-22} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  lämpötilassa 20 keV ja  $Q = 17,6 \text{ MeV}$ . Sähköntuotannon hyötösuhde olkoon  $\eta = 0,35$  ja  $\alpha_b = 0,5 \cdot 10^{-36} \text{ W m}^3 \text{ J}^{-1/2}$ . Mitä sanot ITERin toimivuudesta, jos plasman koossapitoaika on arviolta 4 s ja keskimääräinen tiheys  $1,4 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$ ? (4p)
2. Hiukkasfysiikassa operoidaan relativistisella alueella, ja tällöin näppärä suure eri hiukkasreaktioiden analysoimiseksi on *invariantti massa*. Tarkastellaan invariantin massan avulla seuraavia ongelmia:
  - a) Tarkastellaan hiukkassuihkua (energia  $E_L$ , hiukkasen massa  $m_b$ ), joka törmää levossa olevaan kohtioon (kohtiohiukkasen massa  $m_t$ ). Määritä pienin mahdollinen energia  $E_L$ , jolla törmäysreaktiossa saadaan syntymään kaksi hiukkasta, massoiltaan  $m_1$  ja  $m_2$ . (2p)
  - b) Määritä seuraavaksi uusien hiukkasten tuottamiseen käytettävissä oleva energia, kun 50 GeV:n elektronit ja 500 GeV:n protonit ajavat nokkakolarin (suihkut tulevat siis lähes vastakkaisista suunnista). Kuinka paljon lukuarvo muuttuu, jos suihkut törmäävätkin toisiinsa  $15^\circ$ :n kulmassa? Voit olettaa, että energiat ovat paljon suurempia kuin törmäävien hiukkasten massat. (2p)
  - c) Tarkastellaan lopuksi varattujen pionien  $\pi^\pm$  siroamista protoneista (käytännössä nestemäisestä vedystä tehdystä kohtiosta). Kuvaan 1 on hahmoteltu reaktion kokonaisvaikutusala massakeskipistekoordinaatiston kokonaisenergian funktiona. Tulkitse kuvaaja niin hyvin kuin pystyt. (2p)
3.
  - a) Tee selkoa hadronien *kvarkkimallista*. Toisin sanoen: mitkä ovat kvarkkimallin peruslähtökohdat, mitä asioita kvarkkimalli pystyy selittämään ja ennustamaan sekä miten hadronien välisiä reaktioita käsitellään kvarkkimallin puitteissa? (2p)
  - b) Tarkastellaan sitten kevyimpiä baryoneja kuten protoneita ja neutroneita. Oletetaan vielä, että baryonin aaltofunktio rakentuu kvarkkimaun ilmoittaman osuuden ohella vain rata- ja spinosuudesta. Konstruoi tämän tiedon avulla kaikki kevyimmät  $L = 0$ -baryonit Gell-Mannin alkuperäisen teorian mukaisista u-, d- ja s-mausta; muista myös Paulin kieltoääntö. Vertaa tulostasi kuvaan 2, jossa on esitetty luonnosta löydetty  $L = 0$ -baryonit niiden hypervarauksen (baryoniluvun ja outouden summa) ja isospinin z-komponentin funktiona. Miten fyysikot saivat aikoinaan ratkaistua havaitsemasi ongelman? (4p)

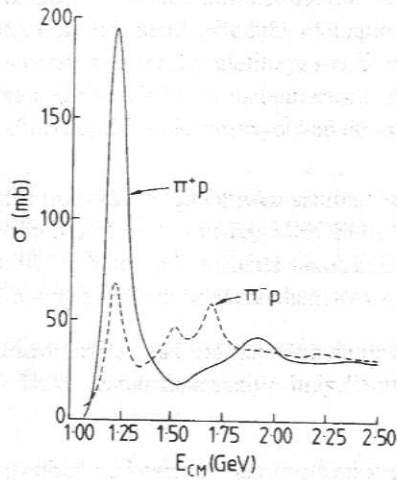
4. Kirjoita 1–2 sivun pituinen essee aiheesta ”perusvuorovaikutukset kvanttikenttäteorioiden näkökulmasta”. Kerro ainakin, miten vuorovaikutusten ajatellaan tapahtuvan kvanttikenttäteorioiden maailmassa, miten vuorovaikutuksia mallinnetaan Feynmanin graafien avulla sekä miten vahva, sähkömagneettinen ja heikko vuorovaikutus eroavat toisistaan. Lopuksi sinun on myös syytä tarkastella, miten eri vuorovaikutukset on mahdollista yhdistää toisiinsa ja miten sekoittuminen liittyy asiaan. (6p)

Aputietoja:

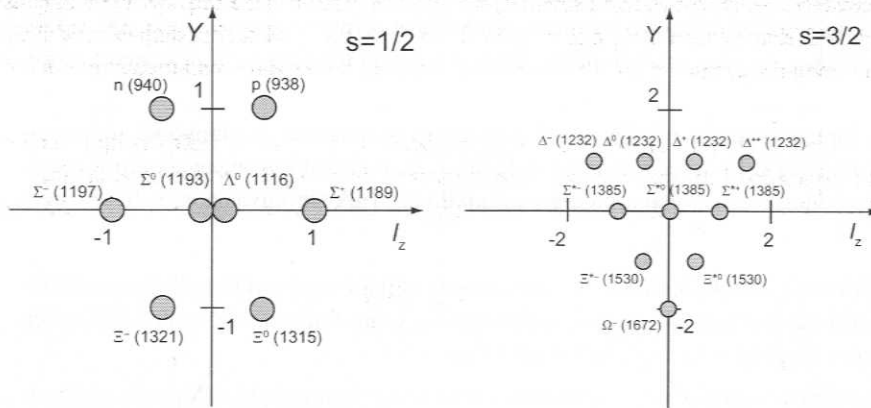
$$e \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}, c \approx 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}, k_B \approx 1,4 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}, 1 \text{ u} \approx 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \approx 931,5 \text{ MeV}/c^2, \\ m_e \approx 511 \text{ keV}/c^2, m_p \approx 938 \text{ MeV}/c^2, m(\pi^\pm) \approx 140 \text{ MeV}/c^2$$

Kvarkkien makukvanttilukuja:

$$I_z(u) = 1/2, I_z(d) = -1/2, I_z(s) = 0, S(u) = 0, S(d) = 0, S(s) = -1$$



Kuva 1: Sironthereaktion  $\pi^\pm + p$  vaikutusala massakeskipistekoordinaatiston kokonaisenergian funktiona.



Kuva 2: Vasemmalla kevyimmät spin-1/2-baryonit  $(Y, I_z)$ -koordinaatistossa. Oikealla puolestaan kevyimmät spin-3/2-baryonit  $(Y, I_z)$ -koordinaatistossa. Suluissa kunkin hidun massa yksiköissä  $\text{MeV}/c^2$ .