

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

1. Olet päässyt kesäharjoittelijaksi kokeellisen hiukkasfysiikan tutkimusryhmään. Ohjaajasi Veikko Siipi on antanut tehtäväksesi suunnitella heinäkuun aikana koejärjestely varattujen pionien π^+ ja π^- havaitsemiseksi; pionien havaitseminen on keskeinen osa tohtori Siiven tutkimushanketta, jossa selvitetään erilaisten hadroniresonanssien ominaisuuksia. Esitä nyt koejärjestelysi kaikkinne olennaisine osineen kiinnittäen erityistä huomiota hiukkasten tunnistamiseen sekä niiden liikemäärän, nopeuden ja energian selvittämiseen. Tutkimuksen kohteena olevissa reaktioissa syntyvät pionit ovat varsin suurienergisiä: niiden liikemäärä on suuruusluokkaa $1 \text{ GeV}/c$. Miten koejärjestelyäsi pitää muuttaa, jotta saisit haaviisi myös neutraalit pionit π^0 ?

Tarkastellaan lopuksi erästä työsi kannalta olennaista reaktiota, jossa liikemäärältään $17 \text{ GeV}/c$:n suuruinen hiukkassuihku osuu runsaasti protoneja sisältävään kohtioon ja reaktion lopputuloksena syntyy muun muassa pionipari $\pi^+ + \pi^-$. Miten voit pioniparin ominaisuuksia mittaamalla varmistua siitä, että reaktio on edennyt neutraalin resonanssitilan X^0 kautta? (6p)

2. a) Lähtien liikkeelle vapaan hiukkasen (massa m , energia E , liikemäärä \mathbf{p}) relativistisesta, neliöllisestä kokonaisenergian lausekkeesta konstruoi kvanttimekaaninen liikeyhtälö kuvaamaan ko. hiukkasta (Klein–Gordon-yhtälö). Osoita, että tasoaallot $\Psi(\mathbf{r}, t) = C e^{\pm i(\mathbf{p}\cdot\mathbf{r} - Et)/\hbar}$ ovat yhtälön ratkaisuja. Mitä hyviä ja huonoja puolia näillä ratkaisuilla on? (2p)
- b) Miten Diracin yhtälö $i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = [c\boldsymbol{\alpha} \cdot \hat{\mathbf{p}} + \beta mc^2] \Psi(\mathbf{r}, t)$ korjaa a)-kohdassa listaamasi ”ongelmat” ja mitä voit sanoa toisaalta Diracin ja toisaalta Klein–Gordon-yhtälön käyttöalueista? (1,5p)
- c) Ratkaise a)-kohdassa kirjoittamasi Klein–Gordon-yhtälö ajasta riippumattomassa, pallosymmetrisessä tapauksessa (eli ei θ - ja ϕ -riippuvuuksia) origon ulkopuolella. Mitä voit sanoa ratkaisustasi, jos $m \rightarrow 0$ ja mitä tekemistä sillä on sähkömagneettisen vuorovaikutuksen kanssa? (2,5p)

Vihje: Pallokoordinaatistossa

$$\nabla^2 = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2}.$$

Kannattaa tehdä myös muuttujanvaihto $\Psi(r) = u(r)/r$.

3. a) Hyvä ystäväsi hiukkasfyysikko Pyry Harakka on saanut tehtäväkseen tunnistaa tohtori Veikko Siiven havaitsemat kolme lumottua baryonia. Harakalla on kuitenkin kauhea kiire, joten hän delegoi homman sinulle. Tiedät jo, että kunkin baryonin lumous on $\tilde{C} = 1$ ja varaus joko $q = 0$ tai $q = +e$. Kaksi baryoneista kuuluu isospintriplettiin, jolle outous on $S = 0$, ja kolmas isospinsinglettiin, jolle myös $S = 0$. Mikä on kunkin baryonin kvarkkikoostumus? (2p)
- b) Harakka ja Siipi tutkivat kuumeisesti mesonia $\eta(547)$, jonka tiedetään olevan spin-0-hiukkanen ja jonka on todettu hajoavan joko reaktiolla $\eta \rightarrow \pi^0 + \pi^0 + \pi^0$ tai $\eta \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$ sähkömagneettiselle vuorovaikutukselle tyypillisellä nopeudella. Auta Siipeä ja Harakkaa ja määritä η -mesonin pariteetti ja selitä sen avulla, miksi reaktiota $\eta \rightarrow \pi^0 + \pi^0$ ei ole koskaan havaittu. Pionit ovat kaikki 0^- -hiukkasia. (2p)
- c) Harakan kollega Pilvi Pouta on pähkäillyt koko viikon ajan, miksi reaktiot $\Sigma^- \rightarrow n + e^- + \bar{\nu}_e$ ja $K^+ \rightarrow \pi^0 + \mu^+ + \nu_\mu$ on havaittu kokeellisesti mutta ei reaktioita $\Sigma^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e$ ja $K^+ \rightarrow \pi^+ + \nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$. Pelasta Poudan päivä! (2p)

4. Kaikki tämän tehtävän kysymykset liittyvät vuorovaikutuksiin. Vastaa niihin lyhyesti ja ytimekkäästi mutta täsmällisesti!

- Mitä oleellisia eroja on vahvalla ja heikolla vuorovaikutuksella? Miten kvarkkimaut sekä kvarkkien ja leptonien perheajattelu liittyvät asiaan? (1,5p)
- Miten sähkömagneettista ja vahvaa vuorovaikutusta kuvaavat kvanttikenttäteoriat QED ja QCD eroavat toisistaan? Miten värivaraus ja toisaalta varjostus ja antivirjostus liittyvät asiaan? (1,5p)
- Mistä on kyse sähköheikossa vuorovaikutuksessa? Miten spontaani symmetriarikko sekä heikko sekoittumiskulma liittyvät asiaan? (1,5p)
- Mitä tarkoitetaan vuorovaikutusten mittakenttäteorioilla ja mitkä ovat niiden keskeiset periaatteet? Miten minimaalisubstituutio ja mittamuunnokset pelastavat meidät pulasta vapaan ja varatun hiukkasen Schrödingerin tai Diracin yhtälöä tarkasteltaessa? (1,5p)

Hadronien kvarkkikoostumuksia, suluissa niiden massat yksiköissä MeV/c^2 :

$$\pi^0(134,98) = \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d}), \quad \pi^+(139,57) = u\bar{d}, \quad \pi^-(139,57) = d\bar{u},$$

$$K^-(493,68) = s\bar{u}, \quad K^+(493,68) = u\bar{s},$$

$$p(938,27) = uud, \quad n(939,57) = udd,$$

$$\Sigma^+(1189,37) = uus, \quad \Sigma^0(1192,64) = uds, \quad \Sigma^-(1197,45) = dds.$$

Taulukko 1: Kvarkkien tärkeimmät ominaisuudet: massa m , varaus q/e , outous S , isospin I , isospinin z -komponentti I_z , lumous \tilde{C} , kauneus \tilde{B} ja totuus \tilde{T} . Kunkin kvarkin spin-pariteetti on $i^P = \frac{1}{2}^+$.

Kvarkki	m (MeV/c^2)	q/e	S	I	I_z	\tilde{C}	\tilde{B}	\tilde{T}
u	1,5 – 4,5	$\frac{2}{3}$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0	0
d	5 – 8,5	$-\frac{1}{3}$	0	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	0	0
s	80 – 155	$-\frac{1}{3}$	-1	0	0	0	0	0
c	1000 – 1400	$\frac{2}{3}$	0	0	0	1	0	0
b	4000 – 4500	$-\frac{1}{3}$	0	0	0	0	-1	0
t	$174,3 \pm 5,1 \text{ GeV}/c^2$	$\frac{2}{3}$	0	0	0	0	0	1