

Faglig kontakt under eksamen:
Professor Kåre Olaussen
Telefon: 9 36 52 eller 45 43 71 70

Eksamen i FY3403 PARTIKKELFYSIKK

Torsdag 31. mai 2007
09:00–13:00

Tillatte hjelpemidler: Alternativ C

Typegodkjent kalkulator, med tomt minne (i henhold til NTNU liste).

K. Rottman: *Matematisk formelsamling* (alle språkutgaver).

Schaum's Outline Series: *Mathematical Handbook of Formulas and Tables*.

Dette oppgavesettet er på 4 sider.

Oppgave 1. Kvarkmodell for $q\bar{q}$ -mesoner

Gi en beskrivelse av hvordan man i kvarkmodellen tenker seg at mesoner er bygd opp av en u eller d kvark og en $\bar{u}$ eller $\bar{d}$ antikvark. Prøv spesielt å forklare

- a) hvilket spinn S det kombinerte $q\bar{q}$ -systemet kan ha,
- b) hvilket isospinn I det kombinerte $q\bar{q}$ -systemet kan ha,
- c) hvilken relativ banedreieimpuls L det kombinerte $q\bar{q}$ -systemet kan ha,
- d) hvilken total dreieimpuls J det kombinerte $q\bar{q}$ -systemet kan ha,
- e) hvilken spektroskopisk notasjon man bruker for å betegne $q\bar{q}$ -systemer som over,
- f) kvalitativt hvordan massen til mesonet avhenger av de forskjellige kvantetallene (illustrer helst med et diagram),
- g) hvordan pariteten P til mesonet avhenger av de forskjellige kvantetallene,
- h) hvordan C -pariteten til de nøytrale mesonene avhenger av de forskjellige kvantetallene,
- i) hvordan G -pariteten til mesonet avhenger av de forskjellige kvantetallene,
- j) hvilke mer kvantitative matematiske modeller man kan bruke for å beregne massen (og andre fysiske egenskaper) til mesonet.

Oppgave 2. Henfall av mesoner lagd av lette (anti-)kvarker, dvs. $u, \bar{u}, d, \bar{d}$

Ifølge *Review of Particle Physics* har ρ -mesonene (3S_1 -tilstander med $I = 1$) masse $m = 771 \text{ MeV}/c^2$ og vidde $\Gamma = 149 \text{ MeV}/c^2$, mens de tilsvarende ω -mesonene (3S_1 -tilstander med $I = 0$) masse $m = 782 \text{ MeV}/c^2$ og vidde $\Gamma = 8.44 \text{ MeV}/c^2$.

a) Hvorfor er ω -mesonene så mye mer stabile enn ρ -mesonene?

I *Review of Particle Physics* finner vi a_2 -mesonene (3P_2 -tilstander med $I = 1$) listet med masse $m = 1318 \text{ MeV}/c^2$ og vidde $\Gamma = 107 \text{ MeV}/c^2$.

b) Forklar hvorfor henfallsmoden $a_2 \rightarrow \pi\pi$ ikke er observert

c) Henfallsmoden $a_2 \rightarrow \pi\pi\pi$ er heller ikke observert. Hva tror du kan være grunnen til dette?

Oppgitt: Ifølge *Review of Particle Physics* finner vi følgende kvantetall tilordnet endel mesoner:

$\pi^0(135)$	$I^G(J^{PC}) = 1^-(0^{-+})$
$\pi^\pm(140)$	$I^G(J^{PC}) = 1^-(0^{-})$
$\eta(547)$	$I^G(J^{PC}) = 0^+(0^{-+})$
$\rho(770)$	$I^G(J^{PC}) = 1^+(1^{-})$
$\omega(782)$	$I^G(J^{PC}) = 0^-(1^{-})$
$a_2(1318)$	$I^G(J^{PC}) = 1^-(2^{++})$

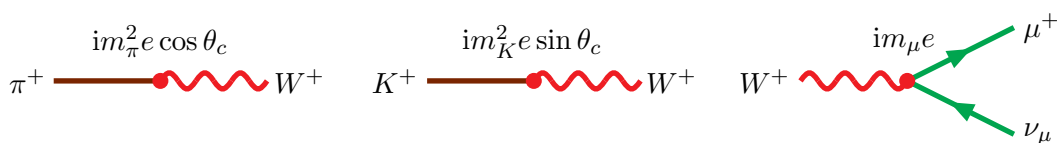
Vi har følgende sammenhenger: $P = (-1)^{L+1}$, $C = (-1)^{L+S}$, $G = (-1)^I C$.

Oppgave 3. Kvantitativ modell for henfall av pseudoskalare mesoner

Som en sterkt forenklet (og derfor unøyaktig) modell for henfall av ladete π -mesoner og K -mesoner, f.eks

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \quad K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu,$$

antar vi at disse mesonene kan konvertere til et virtuelt W^+ vektormeson, som igjen kan konvertere til $\mu^+ + \nu_\mu$ som indikert av Feynmanreglene nedenfor.



Propagatoren for et virtuelt W -vektormeson med firerimpuls p settes til

$$\text{red wavy line} \quad \frac{i}{p^2 - m_W^2}$$

I naturlige enheter har vi $m_\mu \approx 105.7 \text{ MeV}$, $m_\pi \approx 140 \text{ MeV}$, $m_K \approx 495 \text{ MeV}$, $m_W \approx 80.4 \text{ GeV}$, $\alpha = e^2/4\pi \approx 1/137.04$.

a) Tegn Feynman diagrammene for henfallsprosessene $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ og $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$.

b) Skriv ned de tilhørende algebraiske uttrykk for henfallsamplitudene $\mathcal{M}_f$ i de to tilfellene.

- c) Anta at mesonet er i ro før henfallet. Hva blir energien E_μ til myonet i de to tilfellene?
- d) Det er eksperimentelt kjent at

$$\frac{\Gamma(K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu)}{\Gamma(\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu)} \approx \frac{4}{3}. \quad (1)$$

Velg θ_c slik at denne relasjonen er oppfylt.

- e) Hva blir da henfallsratene, $\Gamma(\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu)$ og $\Gamma(K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu)$?
- f) Bestem levetidene τ_π og τ_K til henholdsvis π^+ og K^+ i denne modellen, under antagelse om at de oppgitte henfallsmodene er de eneste som forekommer. Oppgi svaret i SI-enheter, dvs. sekunder. (Hvis du ikke har fått til forrige punkt, forklar med eksempel hvordan du konverterer fra en henfallsrate Γ gitt i naturlige enheter til en levetid τ gitt i sekunder.)
- g) Forklar hvordan du vil generalisere denne modellen til å beskrive henfall av D_s^+ -mesoner, dvs. $D_s^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$.

Oppgitt:

- a) Sammenhengen mellom amplitude $\mathcal{M}_{fi}$ og henfallsrate er i dette tilfellet (med to partikler i slutttilstanden), i naturlige enheter,

$$\Gamma = \frac{|\mathbf{p}|}{8\pi m^2} |\mathcal{M}_{fi}|^2, \quad (2)$$

der m er massen til partikkelen (i ro) som henfaller, og $|\mathbf{p}|$ er bevegelsesmengden til en av partiklene i slutttilstanden.

- b) $\hbar = 1.0546 \times 10^{-34}$ Js, $c = 2.9979 \times 10^8$ m/s.

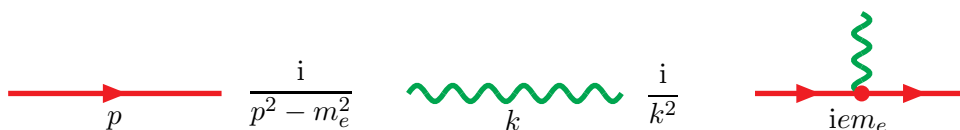
Oppgave 4. e^+e^- -produksjon pga. vekselvirkning med den kosmiske bakgrunnsstrålingen

Det er velkjent at universet er fylt med termiske fotoner med en temperatur $T \approx 2.7$ K. Denne kosmiske bakgrunnstrålingen er essensielt isotrop i vårt Lorentz referansesystem. Dette betyr at andre fotoner med *velldig* høy energi ikke kan propagere over store avstander i universet. De vil istedet kollidere med fotoner fra bakgrunnstrålingen og skape elektron-positron par.

- a) Anslå hvilken energi, $\hbar\omega$, et foton må ha for å danne et elektron-positron par ved en "head-on" kollisjon med et foton fra bakgrunnsstrålingen (målt i vårt Lorentz referansesystem).

Oppgitt: Boltzmann's konstant $k_B \approx 8.6 \times 10^{-5}$ eV/K.

- b) Som en svært forenklet modell for parproduksjonsprosessen behandler vi fotonet som en masseløs nøytral skalar partikkel, og elektronet som en ladet skalar partikkel med masse m_e . Propagatorene for elektronet og fotonet, og vekselvirkningsknuten mellom dem, er som gitt av Feynman reglene nedenfor.



Tegn Feynman diagrammene for parproduksjonsprosessen.

- c) Finn i denne forenklede modellen det algebraiske uttrykket for spredningsamplituden $\mathcal{M}_{fi}$. Du kan bruke *naturlige enheter*, dvs. enheter der $\hbar = c = 1$.
- d) Finn i denne modellen det differensielle tverrsnittet for parproduksjon i massesentersystemet.
- e) Finn i denne modellen det totale tverrsnittet for parproduksjon.
- f) Skisser hvordan du vil gå fram for å transformere det differensielle tverrsnittet for parproduksjon til vårt Lorentz referansesystem.

Oppgitt:

Sammenhengen mellom amplitude $\mathcal{M}_{fi}$ og spredningstverrsnitt er

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{S}{64\pi^2} \frac{|\mathcal{M}_{fi}|^2}{(E_1 + E_2)^2} \frac{|\mathbf{p}_f|}{|\mathbf{p}_i|}. \quad (3)$$

Følgende integral kan være nyttig

$$\int_{-1}^1 dx \frac{1}{(1 - u^2 x^2)^2} = \frac{1}{1 - u^2} + \frac{1}{2u} \log \left(\frac{1 + u}{1 - u} \right) \quad \text{når } -1 < u < 1.$$