

Examen Physique des Particules

durée : 1h30 — *Aucun document autorisé — calculatrices autorisées*

Quelques données numériques utiles :

- facteur de “conversion” : $\hbar c = 197 \text{ MeV}\cdot\text{fm}$
- 1 barn (b) = 10^{-24} cm^2
- masse des leptons chargés : $m_e = 511 \text{ keV}$, $m_\mu = 105.7 \text{ MeV}$, $m_\tau = 1.78 \text{ GeV}$

A- Introduction : contenu en quarks de quelques hadrons

A-1- Les termes *hadron*, *lepton*, *boson* et *fermion* sont utilisés dans la classification des particules. Détailler leur signification. Donner des exemples. Lesquels s’appliquent aux quarks?

A-2- Les baryons (sans quark “étrange”) de plus basse masse sont:

charge électrique	-1	0	+1	+2
particule				
nucléons		n	p	
Δ -baryons	Δ^-	Δ^0	Δ^+	Δ^{++}

Quels sont les contenus en quarks de chacun des baryons du tableau précédent?

A-3- En supposant que les quarks sont dans des états de moment angulaire relatif nul, quelle difficulté fondamentale apparaît avec les états Δ ayant un moment cinétique total $j = 3/2$ et comment est-elle résolue?

B- Mécanismes réactionnels interactions électro-faibles

B-1- Equilibrer les réactions suivantes (en distinguant si besoin les anti-neutrinos des neutrinos et en indiquant le signe des particules chargées):

- $\pi^+ \longrightarrow \pi + e^+ + \nu$
- $\mu^+ \longrightarrow e + \nu + \nu$
- $\pi^+ \longrightarrow \mu + \nu$
- $\pi^- \longrightarrow e + \nu$
- $\tau^- \longrightarrow \pi + \pi^0 + \nu$
- $\nu + n \longrightarrow e + p$

B-2- Compléter les diagrammes de Feynman suivants (indiquer le sens de propagation lorsque c'est nécessaire) :

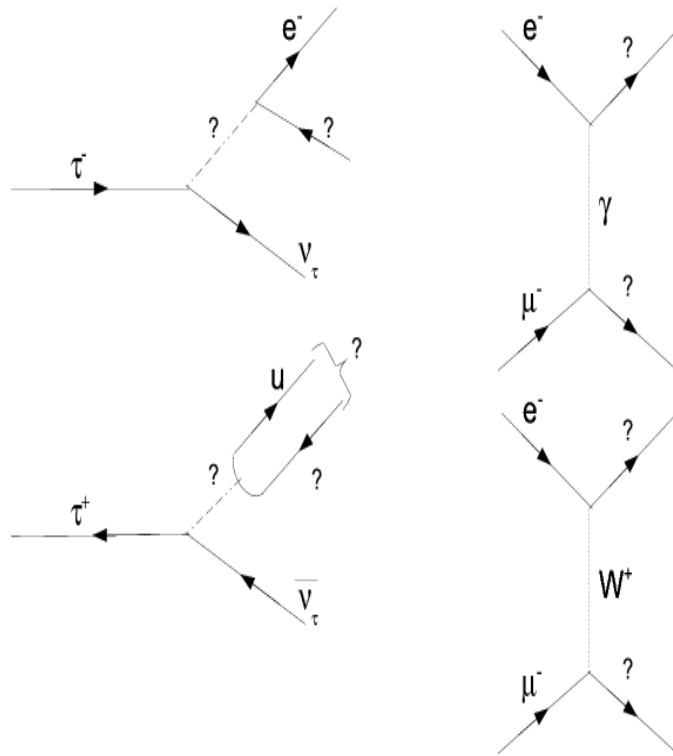


Figure 1: *Diagrammes de Feynman.*

C- Annihilation électron-positron et production de quarks

On se propose de calculer la section efficace de production de quarks par réaction e^+e^- . En notant entre parenthèses les quadrivecteurs énergie-impulsion des particules considérées, on a :

$$e^-(k) + e^+(k') \rightarrow q(p) + \bar{q}(p')$$

On rappelle ci-dessous quelques règles de Feynman de l'interaction électrofaible.

Pour les lignes externes d'un graphe :

- à chaque particule de spin $\frac{1}{2}$ entrante, on associe : $u(p, s)$
- à chaque particule de spin $\frac{1}{2}$ sortante, on associe : $\bar{u}(p, s)$
- à chaque anti-particule de spin $\frac{1}{2}$ entrante, on associe : $\bar{v}(p, s)$
- à chaque anti-particule de spin $\frac{1}{2}$ sortante, on associe : $v(p, s)$
- à chaque particule de spin nul entrante, on associe une constante
- à chaque anti-particule de spin nul sortante, on associe : $\bar{u}(p, s)$ une constante

Pour les lignes internes d'un graphe :

- propagateur de photon : $\frac{-ig^{\mu\nu}}{q^2}$
- propagateur de fermion : $\frac{\gamma^\mu q_\mu + m}{q^2 - m^2}$
- propagateur de boson massif : $-i \frac{g^{\mu\nu} - \frac{q^\mu q^\nu}{m^2}}{q^2 - m^2}$

Pour les vertex :

- entre un photon et 2 fermions de charge e : $-ie\gamma^\mu$
- entre un boson intermédiaire W^\pm et 2 fermions : $-i \frac{g}{2\sqrt{2}} \gamma^\mu (1 - \gamma_5)$

C-1- Préambule: on considère dans cette question la réaction $e^-(k) + e^+(k') \rightarrow \mu^-(p) + \mu^+(p')$. Dessiner le diagramme de Feynman dominant pour cette réaction dans un domaine d'énergie ≤ 50 GeV. Préciser le type d'interaction mis en jeu. Justifier l'équilibre des charges internes dans l'équation-bilan.

C-2- Comment passer de la réaction précédente à la réaction d'intérêt : $e^-(k) + e^+(k') \rightarrow q(p) + \bar{q}(p')$? De quels nombres quantiques doit-on tenir compte en principe? *On ne tiendra pas compte de ceux-ci dans la suite.*

C-3- Donner l'expression de l'élément de matrice T_{fi} en utilisant les règles de Feynman. Justifier alors la forme d'interaction "courant-courant".

C-4- Donner l'expression de T_{fi}^* , conjugué de l'élément de matrice.

C-5- Définir $\overline{|T_{fi}|^2}$ en discutant des polarisations possibles des états entrants/sortants.

C-6- Montrer que l'on peut écrire

$$\overline{|T_{fi}|^2} \propto \text{Tr}[k_\mu \gamma_\mu k'_\nu \gamma_\nu] \text{Tr}[p_\mu \gamma^\mu p'_\nu \gamma^\nu]$$

moeynant une approximation sur les masses des particules que l'on explicitera.

C-7- Utiliser les théorèmes de trace (Fig.2) pour exprimer $\overline{|T_{fi}|^2}$ en fonction de $(p.k)$, $(p'.k')$, $(p.k')$ et $(p'.k)$.

$$\left. \begin{aligned} \text{Tr}[1_{4 \times 4}] &= 4 \\ \text{Tr}[\text{nbr impair de } \gamma] &= 0 \\ \text{Tr}[\gamma^\mu \gamma^\nu] &= 4(g^{\mu\nu}) \\ \text{Tr}[\gamma^\alpha \gamma^\mu \gamma^\beta \gamma^\nu] &= 4(g^{\alpha\mu} g^{\beta\nu} - g^{\alpha\beta} g^{\mu\nu} + g^{\alpha\nu} g^{\beta\mu}) \end{aligned} \right| \begin{aligned} \{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} &= \gamma^\mu \gamma^\nu + \gamma^\nu \gamma^\mu = 2g^{\mu\nu} \\ (\gamma^0)^2 &= 1 \text{ and } (\gamma^i)^2 = -1 \\ \gamma^{\mu\dagger} &= \gamma^0 \gamma^\mu \gamma^0 \end{aligned}$$

Figure 2: Théorèmes de traces et propriétés des matrices gamma.

C-8- On se place dans le référentiel du centre de masse (Fig.3) et on définit les variables de Mandelstam

- $s = (k + k')^2$
- $t = (k - p)^2$
- $u = (k - p')^2$

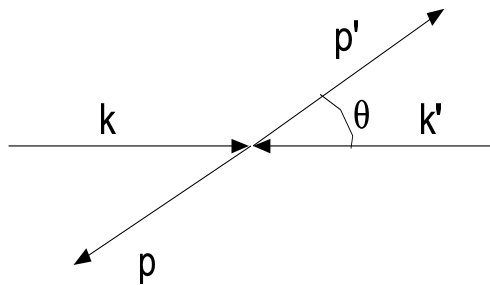


Figure 3: *Cinématique dans le centre de masse.*

Que représente \sqrt{s} ? En conservant l'hypothèse que les masses sont négligeables, exprimer t et u en fonction de s et de l'angle de diffusion θ .

C-9- Montrer finalement que $\overline{|T_{fi}|^2} = ke^4(1 + \cos^2 \theta)$. Expliciter le facteur k en fonction du type de quark envisagé.

C-10- Justifier qualitativement que la section efficace différentielle (par unité d'angle solide) s'écrit :

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \Omega} = \frac{1}{64\pi^2 s} \overline{|T_{fi}|^2}$$

En déduire l'expression de la section efficace totale

$$\sigma = \int \frac{\partial \sigma}{\partial \Omega} d\Omega$$

en fonction de s . Tracer l'allure de $\sigma = f(\sqrt{s})$ et indiquer comment modifier le calcul lorsque l'on approche du domaine d'énergie $\sqrt{s} \simeq 90\text{GeV}$.

C-11- Peut-on observer les quarks à l'état libre? Décrire de manière générale l'état final attendu et proposer un diagramme de Feynman pour l'illustrer.