

## Examen de Physique des Particules Particle Physics Booklet et notes de cours/TD autorisés

---

### Exercice 1 : Production associée $W + c$

Les processus de production de bosons faibles  $W$  et  $Z$  en association avec des quarks lourds ( $c, b, t$ ) sont des processus du modèle standard étudiés au LHC, soit comme confirmation du modèle standard, soit comme bruits de fond aux recherches de nouvelle physique présentant des signatures voisines. L'objet de ce problème est la détermination de la section efficace de production  $W^- + c$ . Le processus partonique dominant est :

$$g(k) + s(p) \rightarrow W^-(k') + c(p')$$

On pose :

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

Vous pourrez faire toutes les approximations cinématiques pertinentes dans le cadre du LHC.

- Donnez les diagrammes de Feynman associés à ce processus (indiquez les différents indices associés chaque objet : couleur, spin, impulsion, ...).
- Déterminez l'amplitude de Feynman associée à chaque diagramme.
- Le carré de l'amplitude totale peut s'écrire :

$$\overline{|M|^2} = K \left( \frac{T_1}{s^2} + \frac{T_2}{t^2} + \frac{T_3}{st} \right)$$

Explicitez le préfacteur  $K$  et les trois traces  $T_1, T_2$  et  $T_3$ .

- Calculez  $T_1, T_2$  et  $T_3$  en fonction des variables de Mandelstam  $s$  et  $t$ .
- En déduire  $\frac{d\sigma}{dt}$  pour la production  $Wc$  ( $W^-c$  et  $W^+\bar{c}$ ).
- Que se passe-t-il si on fait le même calcul pour  $Wt$  ?
- Pourquoi le processus  $Wb$  n'est-t-il jamais considéré ?
- Quelle quantité physique non calculable peut être contrainte par la mesure de  $pp \rightarrow Wc$  ?

### Exercice 2 : Le processus Drell-Yan

Nous étudions dans la suite le processus Drell-Yan,  $A(p_1) + B(p_2) \rightarrow \gamma^* \rightarrow \ell^+ + \ell^-$ , dans le modèle des partons. Ici,  $A$  et  $B$  sont des hadrons, par exemple des protons, et on produit une paire de leptons à grande masse invariante,  $M^2 = (p_{\ell^+} + p_{\ell^-})^2 \gg 1 \text{ GeV}^2$ . À l'ordre dominant (leading order, LO), il n'y a qu'un seul type de sous-processus partonique qui contribue :

$$q(\hat{p}_1) + \bar{q}(\hat{p}_2) \rightarrow \ell^+(p_{\ell^+}) + \ell^-(p_{\ell^-}).$$

On pose :

$$\hat{s} = (\hat{p}_1 + \hat{p}_2)^2, \quad \hat{t} = (\hat{p}_1 - p_{\ell^+})^2, \quad \hat{u} = (\hat{p}_2 - p_{\ell^+})^2,$$

et on néglige les masses des quarks et leptons.

**Tournez la page s.v.p.**

- a) Donnez le diagramme de Feynman associé à ce processus partonique. Indiquez les différentes impulsions et discutez le facteur de couleur.
- b) Le carré de l'amplitude totale peut s'écrire :

$$|M|^2 = c Q_i^2 \frac{1}{\hat{s}^2} (\hat{t}^2 + \hat{u}^2)$$

- où  $Q_i$  est la charge électrique fractionnaire du quark  $i = (u, d, s, c, b)$  (c.à.d.  $Q_u = 2/3$ , etc.). En utilisant le résultat pour le processus  $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$  traité en TD, explicitez la constante  $c$ .
- c) Donnez le résultat pour les sections efficaces suivantes :  $\frac{d\hat{\sigma}}{d\hat{t}}$ ,  $\frac{d\hat{\sigma}}{d\cos\theta}$  où  $\theta$  est l'angle entre le quark et le  $\ell^+$  dans le CMS partonique, et la section efficace totale  $\hat{\sigma}_0$ .

Dans le modèle des partons, les impulsions des partons sont liées aux impulsions des hadrons :

$$\hat{p}_1 = x_1 p_1, \hat{p}_2 = x_2 p_2$$

avec  $p_1^2 = p_2^2 = 0$ .

- d) Précisez l'expression pour la section efficace  $d\sigma$  pour le processus Drell-Yan dans le modèle des partons (en termes de  $x_1, x_2$  et  $d\hat{\sigma}$ ). Donnez une représentation diagrammatique de cette expression en indiquant toutes les impulsions.
- e) Montrez que la section efficace  $d\sigma/dM^2$  multipliée par  $M^4$  où  $M^2 = (p_{\ell^+} + p_{\ell^-})^2$  est une fonction d'une variable non-dimensionnée  $\tau = M^2/s$  :

$$M^4 \frac{d\sigma}{dM^2} \propto \tau f(\tau).$$

Indication : utilisez la relation  $\frac{d\hat{\sigma}}{dM^2} = \hat{\sigma}_0 \delta(\hat{s} - M^2)$ .

On définit la variable  $x_F := x_1 - x_2$ , (Feynman- $x_F$ ) qui est une mesure de l'impulsion en direction longitudinale. En plus, la rapidité de la paire de leptons dans le CMS partonique est donnée par :

$$y = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{x_1}{x_2} \right).$$

- f) Montrez que  $x_{1,2} = \sqrt{\tau} e^{\pm y}$  et par conséquent  $dx_1 dx_2 = d\tau dy$ .
- g) Utilisez que  $dM^2 dx_F = d\tau dy s \sqrt{x_F^2 + 4\tau}$  pour montrer que la section efficace double-différentielle en  $M^2$  et  $x_F$  a la forme :

$$\frac{d\sigma}{dM^2 dx_F} = \frac{4\pi\alpha^2}{9M^4} \frac{1}{\sqrt{x_F^2 + 4\tau}} \tau \sum_i Q_i^2 [q_i(x_1) \bar{q}_i(\tau/x_1) + \bar{q}_i(x_1) q_i(\tau/x_1)].$$

Donnez  $x_1$  et  $x_2$  en fonction de  $\tau = M^2/s$  et  $x_F$ . Le processus Drell-Yan est donc utile pour contraindre les distributions de quarks et anti-quarks dans les hadrons A et B.