Examen de Physique des Particules 1
Particle Physics Booklet et notes de cours/TD autorisés

Exercice 1 : La diffusion Bhabha

Nous étudions dans la suite le processus Bhabha $e^-(p_1) + e^+(p_2) \to \gamma^* \to e^-(p_1') + e^+(p_2')$ pour des électrons non-polarisés et en **négligeant** la masse de lélectron.

a) Dans quelles conditions peut-on négliger la masse de l'électron ainsi que l'échange du boson Z ?

L'amplitude de diffusion prend la forme

$$\mathcal{M} = \mathcal{M}_s - \mathcal{M}_t \,, \tag{1}$$

$$\mathcal{M}_s = \frac{e^2}{s}[\bar{v}(p_2)\gamma^\mu u(p_1)][\bar{u}(p_1')\gamma_\mu v(p_2')] \,, \tag{2}$$

$$\mathcal{M}_t = \frac{e^2}{t}[\bar{u}(p_1')\gamma^\nu u(p_1)][\bar{v}(p_2)\gamma_\nu v(p_2')] \,. \tag{3}$$

b) Tracez les diagrammes de Feynman (à leading order) en indiquant toutes les informations pertinentes et justifiez le signe relatif entre les amplitudes $\mathcal{M}_s$ et $\mathcal{M}_t$.

c) Donnez la définition de l'élément de matrice $\overline{|\mathcal{M}|}^2$ et calculez le en fonction des variables de Mandelstam s, t, u. Utilisez $\sum_{\text{spins}} |\mathcal{M}_t|^2 = \sum_{\text{spins}} |\mathcal{M}_s|^2 (s \leftrightarrow t)$.

d) Donnez la section efficace différentielle $d\sigma/d\Omega^*$ en fonction de l'angle de diffusion $\cos\theta^*$ dans le référentiel du centre de masse.

Exercice 2 : Invariance de jauge SU(3)

Le Lagrangien de la QCD est donné par

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = -\frac{1}{4} G^a_{\mu\nu} G^{\mu\nu}_a + \sum_f \bar{q}_f (i\gamma^\mu D_\mu - m_f) q_f \tag{4}$$

avec

$$D_\mu = \partial_\mu + igG^a_\mu T_a \,, \quad G^a_{\mu\nu} T_a = \frac{-i}{g}[D_\mu, D_\nu] \,. \tag{5}$$

Ici, les générateurs T_a sont dans la représentation fondamentale, c.à.d., $T_a = \lambda_a/2$ avec les matrices $\lambda_{a=1,\ldots,8}$ de Gell-Mann.

a) Rappelez (**sans dérivation**) comment les différents objets (quarks, gluons, dérivée covariante) changent sous une transformation de jauge SU(3)$_c$ et montrez que $\mathcal{L}_{\text{QCD}}$ reste invariant.

b) Montrez que $G^a_{\mu\nu}$ transforme selon la représentation adjointe de SU(3)$_c$.
Piste : Considérez une transformation infinitésimale avec paramètres $\alpha^a(x) \ll 1$.

Tournez la page s.v.p.

Exercice 3 : Règles de Feynman et production du boson de Higgs

Le Lagrangien effectif gouvernant l'interaction du boson de Higgs avec des gluons est donné par

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = -\frac{k}{4} G^a_{\mu\nu} G_a^{\mu\nu} h \,, \tag{6}$$

où k est une constante [1], h est le boson de Higgs et $G^a_{\mu\nu}$ est le tenseur des gluons.

a) Le vertex V_{ggh} prend la forme $V_{ggh} = ik\delta^{ab}H^{\mu\nu}(p_1, p_2)$. Ici (p_1, a, μ) sont l'impulsion, la couleur et l'indice de Lorentz du premier gluon, (p_2, b, ν) l'impulsion, la couleur et l'indice de Lorentz du deuxième gluon et le boson de Higgs a une impulsion p_3.
Dérivez le tenseur $H^{\mu\nu}(p_1, p_2)$ en utilisant les règles discutés en cours pour dériver un vertex à partir d'un Lagrangien.

b) $\mathcal{L}_{\text{eff}}$ génère aussi des interactions du boson de Higgs avec trois et quatre gluons. Les vertex prennent la forme $V_{gggh} = -kg_s f^{abc} V^{\mu\nu\sigma}$, $V_{ggggh} = -ikg_s^2 X^{abcd}_{\mu\nu\sigma\lambda}$.
Donnez **sans dérivation** les expressions pour $V^{\mu\nu\sigma}$ et $X^{abcd}_{\mu\nu\sigma\lambda}$.
Piste : Comparez avec le vertex à trois et quatre gluons en QCD.

c) Le mécanisme dominant pour la production du boson de Higgs au LHC est le processus $gg \to h$. En utilisant le vertex effectif $V_{ggh} = ik\delta^{ab}H^{\mu\nu}(p_1, p_2)$, donnez l'expression pour la section efficace $\hat{\sigma}(gg \to h)$. Notamment, spécifiez l'élément de matrice $\overline{|M_{fi}|}^2$ moyenné sur les spins et couleurs et l'espace de phase. Utilisez $H^{\mu\nu}H_{\mu\nu} = m_h^4/2$.

d) Bonus : Proposez une expression pour la section efficace $\sigma(p+p \to h)$ de la production du Higgs dans les collisions proton–proton dans le modèle des partons.

Bon courage !

1. Pour être complet, jusqu'à 2-boucles $k = \frac{-\alpha_s}{3\pi v}(1 + \frac{11}{4}\frac{\alpha_s}{\pi})$. Ce Lagrangien est valable dans la limite $m_t \gg m_h$ où m_t est la masse du quark top et m_h la masse du boson de Higgs. $v = 246$ GeV est la valeur moyenne dans le vide (vev) du Higgs.