



UNIVERSITY OF STRASBOURG

Particle Physics 1st session

A. Besson

Transcribed by
PIERRE GUICHARD

M1-S2 2017-2018

Production hadronique de W^+ se désintégrant en leptons

1 — Cinématique

Le LHC est un collisionneur proton-proton qui fonctionne au CERN avec une énergie pour chaque faisceau de $p = 7000 \text{ GeV}/c$. On étudie la production du boson W^+ se désintégrant en leptons électroniques, c'est-à-dire la réaction : $p + p \rightarrow W^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$. Le neutrino produit échappe à la détection. La figure 1 représente un diagramme de production possible.

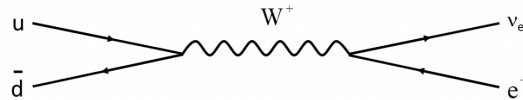


FIGURE 1 – Exemple de diagramme de production de W^+

Les protons du premier faisceau possèdent une impulsion selon $+\vec{u}_z$ et ceux du second faisceau une impulsion opposée selon $-\vec{u}_z$. Lors de la collision entre les deux protons, on considérera qu'un seul constituant de chaque proton interagit. Ces constituants n'emportent pas la totalité de l'impulsion initiale, si bien que les impulsions des quarks u et \bar{d} s'exprimeront comme :

$$\vec{p}_1 = \vec{p}_u = x_1 \cdot p \cdot \vec{u}_z \quad (1)$$

$$\vec{p}_2 = \vec{p}_{\bar{d}} = -x_2 \cdot p \cdot \vec{u}_z \quad (2)$$

où $p = 7000 \text{ GeV}/c$ et où x_1 et x_2 sont des facteurs compris entre 0 et 1 et différents pour chaque collision.

1. Quel est la composition en quarks de valence des protons ? Comment expliquer que le diagramme de la figure 1 est possible ?

$$p = uud$$

le \bar{d} est donc un quark de la mer.

2. Pour une collision donnée, on a $x_1 = 0.32$ et $x_2 = 0.13$. Calculer \sqrt{s} , l'énergie disponible pour la réaction (on négligera la masse des protons). Cette énergie permet-elle de produire un W^\pm ?

$$\begin{aligned} s &= (E, p)^2 \\ &= E^2 - \vec{p}^2 \\ &= (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 \\ &= E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 - \vec{p}_1^2 - \vec{p}_2^2 - 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2 \end{aligned}$$

Or, $\vec{p}_1 = -\vec{p}_2$ et $E_1 \sim p_1$, $E_2 \sim p_2$,

$$\begin{aligned} s &= \vec{p}_1^2 + \vec{p}_2^2 + 2E_1E_2 - \vec{p}_1^2 - \vec{p}_2^2 + 2E_1E_2 \\ &= 4E_1E_2 \end{aligned}$$

Alors,

$$\sqrt{s} \sim 2\sqrt{E_1E_2} = 2\sqrt{p_1p_2} = 2\sqrt{x_1px_2p} = 2p\sqrt{x_1x_2} \sim 2850 \text{ GeV}$$

Alors la production de W^+ est possible.

3. Dans la réalité, on ne peut prévoir les valeurs de x_1 et x_2 (seulement leur distribution). On raisonne alors dans le plan transverse (O, x, y) perpendiculaire à l'axe des faisceaux. Soit N le nombre de particules produites dans l'état final. Justifier les relations suivantes

$$\sum_{i=1}^N p_{x,i} = 0 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N p_{y,i} = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N p_{z,i} \neq 0 \quad (5)$$

où les $p_{x/y/z,i}$ sont les différentes composantes de l'impulsion de la particule i .

État initial

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 = (x_1 - x_2)p\vec{u}_z$$

$$\vec{p} = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ (x_1 - x_2)p \end{pmatrix}$$

Et avec la conservation de \vec{p} on a immédiatement $\sum_{i=1}^N p_{x,i} = 0$, $\sum_{i=1}^N p_{y,i} = 0$ et $\sum_{i=1}^N p_{z,i} \neq 0$.

4. Certaines particules, comme les neutrinos, échappent à la détection. Parmi les particules produites, seules M particules sont mesurées avec $M < N$. On définit alors l'impulsion transverse de la manière suivante :

$$p_{Tx} = - \sum_{i=1}^M p_{x,i} \quad (6)$$

$$p_{Ty} = - \sum_{i=1}^M p_{y,i} \quad (7)$$

$$p_T = \sqrt{p_{Tx}^2 + p_{Ty}^2} \quad (8)$$

Dans le cas présent, on a $N = 2$ et $M = 1$. On note le quadri-vecteur du neutrino $(E_{\nu_e}, \vec{p}_{\nu_e})$ et le quadri-vecteur du positon et (E_{e^+}, \vec{p}_{e^+}) . On pose $p_{T,\nu_e} = \sqrt{p_{x,\nu_e}^2 + p_{y,\nu_e}^2}$. Exprimer p_{x,ν_e} , p_{y,ν_e} et p_{T,ν_e} en fonction des $p_{T,x}$, $p_{T,y}$ et p_T .

(3) et (4) donnent,

$$\left. \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N p_{x,i} = 0 = p_{x,e} + p_{x,\nu_e} \\ \sum_{i=1}^N p_{y,i} = 0 = p_{y,e} + p_{y,\nu_e} \end{array} \right\} \implies \begin{cases} p_{x,\nu_e} = p_{x,e} = p_{Tx} \\ p_{y,\nu_e} = -p_{y,e} = p_{Ty} \end{cases}$$

$$p_{T\nu_e} = \sqrt{p_{x,\nu_e}^2 + p_{y,\nu_e}^2} = \sqrt{p_{Tx}^2 + p_{Ty}^2} = p_T$$

$$\implies \begin{cases} p_{x,\nu_e} = p_{Tx} \\ p_{y,\nu_e} = p_{Ty} \\ p_{T\nu_e} = p_T \end{cases}$$

5. En faisant l'hypothèse que le W^+ est une particule réelle, montrer que

$$m_W^2 = m_{e^+}^2 + 2E_{\nu_e}E_{e^+} + 2p_T^2 - 2p_{z,e^+}p_{z,\nu_e} \quad (9)$$

$$E_W^2 = m_W^2 + p_W^2 \implies m_W^2 = E_W^2 - p_W^2$$

$$\begin{aligned} m_W^2 &= (E_{\nu_e} + E_{e^+})^2 - (\vec{p}_{\nu_e} + \vec{p}_{e^+})^2 \\ &= E_{\nu_e}^2 + E_{e^+}^2 + 2E_{\nu_e}E_{e^+} - p_{\nu_e}^2 - p_{e^+}^2 - 2\vec{p}_{\nu_e} \cdot \vec{p}_{e^+} \end{aligned}$$

Or,

$$E_{\nu_e}^2 - p_{\nu_e}^2 \sim 0 \text{ et } E_{e^+}^2 - p_{e^+}^2 = m_{e^+}^2$$

Alors,

$$m_W^2 = m_{e^+}^2 + 2E_{\nu_e}E_{e^+} - 2\vec{p}_{\nu_e} \cdot \vec{p}_{e^+}$$

6. Montrer que :

$$E_{\nu_e}^2 \simeq p_{z,\nu_e}^2 + p_T^2 \quad (10)$$

$$E_{\nu_e}^2 = m_{\nu_e}^2 + p_{\nu_e}^2 = m_{\nu_e}^2 + p_{x,\nu_e}^2 + p_{y,\nu_e}^2 + p_{z,\nu_e}^2 \sim p_{z,\nu_e}^2 + p_{T,\nu_e}^2 \sim p_{z,\nu_e}^2 + p_T^2$$

7. Combiner les résultats des deux questions précédentes pour obtenir une équation du second degré permettant de déterminer $p_{z,\nu}$ en fonction des grandeurs mesurées du positon $(E_{e^+}, p_{x,e^+}, p_{y,e^+}, p_{z,e^+})$, des masses et de p_T (on ne cherchera pas à la résoudre).

2 — Questions diverses

8. Parmi les diagrammes de la figure 2, indiquer ceux qui sont possibles et ceux qui ne le sont pas en justifiant à chaque fois votre réponse.

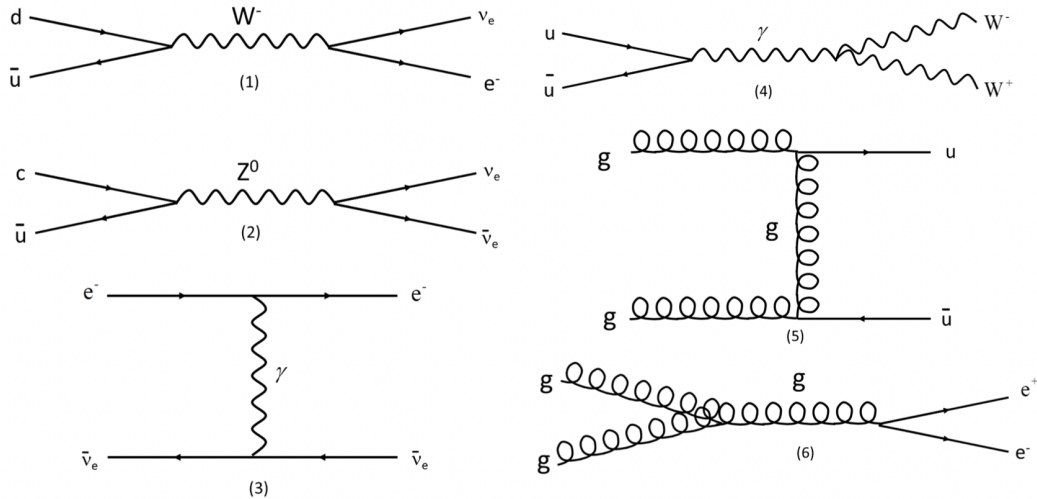


FIGURE 2 – Diagrammes vrais ou faux

- (1) Impossible : le nombre leptonique n'est pas conservé.
 (2) Impossible : le boson Z ne change pas la saveur.
 (3) impossible : le photon ne se couple pas aux neutrinos.
 (4) Possible.
 (5) Impossible : la branche ggu ou $gg\bar{u}$ n'existe pas.
 (6) Impossible : ge^+e^- n'existe pas, les électrons n'ont pas de couleur.
9. À l'aide de la figure 3, évaluer la section efficace de production totale σ_W . En déduire le nombre d'événements attendus au bout d'un an si le LHC fonctionne avec une luminosité instantanée de $10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. (Rappel : $1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$).

$$\sigma_W(\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}) \sim 10^8 \text{ fbarn} \sim 10^5 \text{ pbarn}$$

$$N = \sigma_W LT$$

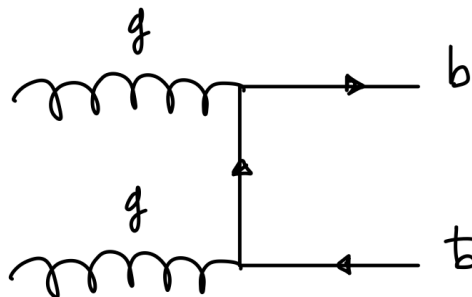
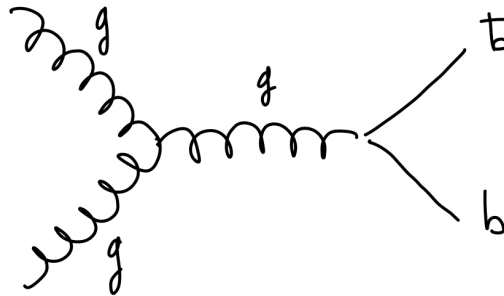
$$T = 365 \times 24 \times 3600 \sim 3.15 \times 10^7 \text{ s}$$

$$L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} = 10^{38} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\sigma_W = 10^{-35} \text{ m}^2$$

$$N \sim 10^{-35} \times 10^{38} \times 3 \times 10^7 \sim 3 \times 10^{10}$$

10. Sur la figure, est également représentée $\sigma_{b\bar{b}}$, la section efficace de production d'une paire de quarks $b\bar{b}$. Dessiner un diagramme de production $gg \rightarrow b\bar{b}$ dans la voie s et un autre dans la voie t .



11. Pourquoi σ_W est bien plus faible que $\sigma_{b\bar{b}}$?

$$\sigma_W \ll \sigma_{b\bar{b}}$$

interaction faible interaction forte

12. Dans le diagramme de la figure 1, quelle est l'hélicité du neutrino produit ?

ν_e hélicité gauche.