EXERCICE I – COLLISIONS AU LHC (6 points)

1. À propos du boson de Higgs

1.1. L'observation du boson de Higgs confirme la théorie de Higgs, Brout et Englert. Cette théorie permet de comprendre pourquoi les particules élémentaires ont une masse, ce qui complète la théorie du modèle standard.

1.2. L'observation du boson de Higgs nous ramène dans un passé extrêmement lointain, autour de 10^{-10} s après le Big Bang, soit vers la naissance de l'Univers.

2. Apport de la relativité restreinte

2.1. $E_C = (\gamma - 1).m_p.c^2$ avec $\gamma = \dfrac{1}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$

Si v → c alors $\gamma \rightarrow \infty$ alors $E_C \rightarrow \infty$

2.2. Le guide du LHC indique :
Pour v_0 = 0,999 997 828.c, alors E_{C0} = 450 GeV
Pour v_1 = 0,999 999 991.c, alors $E_{C1} = 15.E_{C0}$

Exprimons le rapport $\dfrac{E_{C1}}{E_{C0}}$:

$$E_C = \left(\frac{1}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}-1\right).m_p.c^2$$

$$\frac{E_{C1}}{E_{C0}} = \frac{\left(\dfrac{1}{\sqrt{1-\dfrac{v_1^2}{c^2}}}-1\right).m_P.c^2}{\left(\dfrac{1}{\sqrt{1-\dfrac{v_0^2}{c^2}}}-1\right).m_P.c^2} = \frac{\left(\dfrac{1}{\sqrt{1-\dfrac{0,999999991^2.c^2}{c^2}}}-1\right)}{\left(\dfrac{1}{\sqrt{1-\dfrac{0,999997828^2.c^2}{c^2}}}-1\right)} = \frac{\left(\dfrac{1}{\sqrt{1-0,999999991^2}}-1\right)}{\left(\dfrac{1}{\sqrt{1-0,999997828^2}}-1\right)}$$

$\dfrac{E_{C1}}{E_{C0}}$ = 15,565 soit environ 16.

L'énergie cinétique d'un proton a été multipliée par 16, ce qui est cohérent avec le guide du LHC qui indique un facteur d'environ 15.

2.3. $E_{totale} = E_c + E_m$
$E_{totale} = (\gamma - 1).m_p.c^2 + m_p.c^2$
$E_{totale} = \gamma.\ m_p.c^2 - m_p.c^2 + m_p.c^2$
$E_{totale} = \gamma.\ m_p.c^2$

Comme $E_c = (\gamma-1).m_p.c^2$ on peut considérer $E_{totale} = E_c$ si $\gamma - 1 = \gamma$
donc si –1 est négligeable face à γ.

Calculons la valeur du facteur de Lorentz avec les protons animés d'une vitesse v_0 (les plus lents, ainsi γ sera le plus faible).

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v_0^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{0{,}999997828^2.c^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1-0{,}999997828^2}} = 4{,}79794569\times10^2$$

On vérifie effectivement que $\gamma >> 1$, donc l'énergie totale du proton est pratiquement égale à son énergie cinétique.

3. Manipulation à haute énergie

3.1. L'énergie de collision entre les deux protons est égale à la somme de leurs énergies cinétiques : $E_{collision} = 2E_{cp}$

On utilise les données du document 3 : Les protons à pleine vitesse possèdent une énergie cinétique quinze fois supérieure à celle qu'ils ont au moment où ils pénètrent dans le LHC.

$E_{cp} = 15\times450$ GeV

$E_{collision} = 2\times15\times450$ GeV $= 1{,}35\times10^4$ GeV = 13,5 TeV et en ne conservant que deux chiffres significatifs, on vérifie bien que $E_{collision}$ = 14 TeV.

<u>*Autre méthode :*</u> On calcule l'énergie cinétique des protons les plus rapides, de vitesse v_1 :

$$E_{cp} = (\gamma - 1).m_p.c^2 = \left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v_1^2}{c^2}}} - 1\right).m_p.c^2$$

$$E_{cp} = \left(\frac{1}{\sqrt{1-0{,}999999991^2}} - 1\right) \times 1{,}672\,621\times10^{-27} \times 299\,792\,458^2 = 1{,}120326\times10^{-6}\text{ J}$$

On stocke la valeur non arrondie en mémoire de la calculatrice.

$E_{collision} = 2E_{cp}$

$E_{collision} = 2 \times 1{,}1203261\times10^{-6} = 2{,}240652\times10^{-6}$ J

On convertit en TeV

$$E_{collision} = \frac{2{,}2406522\times10^{-6}}{1{,}60\times10^{-19}\times10^{12}} = 14{,}0\text{ TeV}$$

Cette méthode donne bien le résultat avec trois chiffres significatifs comme le sujet le demande.

3.2. Chaque proton possède une énergie totale de 7,00 TeV.

Il circule 2808 paquets contenant chacun 110 milliards de protons.

L'énergie cinétique de l'ensemble des protons vaut : $7{,}00\times2808\times110\times10^9$ = $\mathbf{2{,}16\times10^{15}}$ **TeV**

On convertit cette énergie en joules : 1 TeV = 10^{12} eV = $10^{12} \times 1{,}60\times10^{-19} = 1{,}60\times10^{-7}$ J

L'ensemble des protons ont une énergie de $2{,}16\times10^{15} \times 1{,}60\times10^{-7}$ = $\mathbf{3{,}46\times10^{8}}$ **J**, soit un **ordre de grandeur de** $\mathbf{10^8}$ **J**.

Énergie cinétique d'une rame de TGV lancée à pleine vitesse, supposons v = 360 km.h^{-1}.

Alors v = 100 m.s^{-1}, soit un ordre de grandeur de 10^2 m.s^{-1}.

$$E_{cTGV} = \frac{1}{2}.m_{TGV}.v^2$$

$E_{cTGV} = \frac{1}{2}\times444\times10^3\times(10^2)^2$ = $2{,}22\times10^9$ J, donc un ordre de grandeur de $\mathbf{10^9}$**J**

L'énergie cinétique de l'ensemble des protons est de l'ordre d'un dixième de celle d'une rame de TGV à pleine vitesse.

4. Quelle durée de vie au LHC ?

4.1. La durée de vie propre du méson est définie dans le référentiel propre. Donc dans le référentiel où les deux évènements « naissance » et « mort » ont lieu au même endroit, c'est-à-dire dans le référentiel {méson}.

4.2. Dans le référentiel du laboratoire le méson parcourt la distance d avec une vitesse pratiquement égale à c.

$v = c = \dfrac{d}{\Delta T}$ donc $\Delta T = \dfrac{d}{c}$.

$\Delta T = \dfrac{1,0 \times 10^{-2}}{299792458} = 3,3 \times 10^{-11}$ s

On trouve $\Delta T > \Delta T_0$, ce qui est cohérent avec $\Delta T = \gamma . \Delta T_0$.

En effet $\gamma > 1$, ce qui signifie que la vitesse du proton est suffisamment proche de celle de la lumière pour que la dilatation des durées soit perceptible.