EXERCICE I - COLLISIONS AU LHC. (6 points)

Document 1. Le boson de Higgs

« La découverte du boson de Higgs est aussi importante pour l'histoire de la pensée humaine que la loi de la gravitation universelle de Newton » s'enthousiasme Carlo Rovelli, du Centre de Physique Théorique de Marseille-Lumini. La théorie de Newton, en son temps, avait prédit l'emplacement de Neptune avant même que les astronomes ne l'observent directement. La découverte du boson de Higgs signe le triomphe de ce qu'on appelle le « modèle standard » de la physique, qui a prédit depuis quelques décennies les détails les plus infimes du monde et qui a été élaboré avec passion par les plus grands scientifiques ces cent dernières années. Grâce au Higgs (comme l'appellent familièrement les physiciens), des voies s'ouvrent, permettant d'explorer la texture de l'espace-temps ou de plonger dans les premiers moments de l'Univers. […] Le boson de Higgs est une particule qui était présente dans un passé extrêmement lointain de l'Univers, autour de 10^{-10} s après le Big Bang, à une époque où la température frisait les 10^{15} °C. Si elle a été « vue » au CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire), c'est parce que de telles énergies ont été atteintes au cœur du LHC (Large Hadron Collider ou Grand Collisionneur de Hadrons), recréant les conditions qui régnaient alors.

D'après un extrait de Sciences et Avenir N°786, août 2012

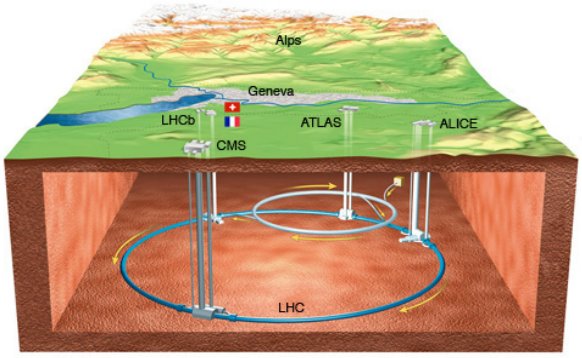
Le modèle standard arrive à décrire toutes les particules élémentaires connues et la façon dont elles interagissent les unes avec les autres. Mais notre compréhension de la nature est incomplète. En particulier, le modèle standard ne répond pas à une question simple : pourquoi la plupart des particules élémentaires ont-elles une masse ?

Les physiciens Peter Higgs, Robert Brout et François Englert ont proposé une solution à cette énigme. Leur théorie est que, juste après le Big Bang, aucune particule n'avait de masse. Lorsque l'Univers a refroidi et que la température est tombée en-dessous d'un seuil critique, un champ de force invisible appelé "champ de Higgs" s'est formé en même temps que le boson de Higgs, particule qui lui est associée. L'interaction avec ce champ répandu partout dans le cosmos permet aux particules d'acquérir une masse par l'intermédiaire du boson de Higgs. Plus les particules interagissent avec le champ de Higgs, plus elles deviennent lourdes. Au contraire, les particules qui n'interagissent pas avec ce champ ne possèdent aucune masse.

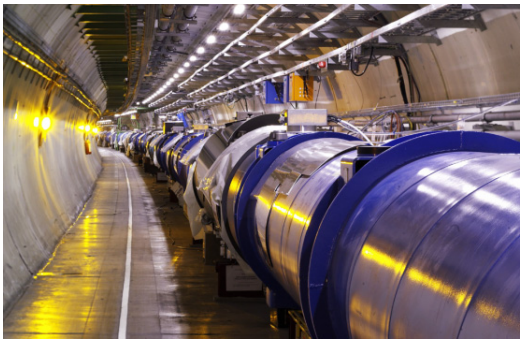
D'après un texte de Michel Spiro, chercheur au CNRS et président du conseil du CERN

Document 2. Le LHC

Le LHC est une boucle souterraine accélératrice de particules. Sa circonférence est de 26 659 m. Il y règne un intense champ électromagnétique accélérant des paquets de particules chargées positivement, par exemple des protons ou des ions plomb.



Le LHC sous la frontière franco-suisse



Vue intérieure du LHC

On fait circuler des paquets d'ions dans les deux sens. Ils entrent en collision frontale à une vitesse proche de celle de la lumière dans le vide : cette collision produit des bosons de Higgs. Leur durée de vie étant très brève, ils se désintègrent immédiatement en une multitude de particules. Ce sont ces particules qu'on détecte par l'expérience. Entre 2008 et 2011, 400 000 milliards de collisions ont été enregistrées. Une particule d'énergie de masse au repos d'environ 125 GeV a été détectée, avec un degré de confiance de 99,999 97 % : le boson de Higgs !

D'après le Guide du LHC édité par le CERN

Document 3. Vitesse et énergie dans le LHC
Les protons pénètrent dans le LHC à une vitesse v_0 égale à 0,999 997 828 fois la célérité de la lumière dans le vide, notée c. Ils ont alors une énergie cinétique de 450 GeV. Au maximum, les protons pourront atteindre la vitesse v_1 égale à 0,999 999 991$\times c$. Leur énergie cinétique sera environ multipliée par 15.
En permanence, il circule simultanément 2 808 paquets contenant chacun 110 milliards de protons, générant jusqu'à 600 millions de collisions par seconde.

D'après le Guide du LHC édité par le CERN

Dans cet exercice, on se propose d'étudier des modèles théoriques de la physique contemporaine qui ont été utilisés au LHC.

Données :

- Masse d'un proton m_p = 1,672 621 × 10^{-27} kg ;
- Célérité de la lumière dans le vide c = 299 792 458 m.s^{-1} ;
- 1 eV = 1,60 × 10^{-19} J ;
- 1 TeV = 10^3 GeV = 10^{12} eV ;
- Énergie de masse au repos d'une particule de masse m : $E_m = m.c^2$;
- Masse d'une rame de TGV : m_{TGV} = 444 tonnes ;
- Facteur de Lorentz $\gamma = \dfrac{1}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$ avec v vitesse de la particule dans le référentiel du laboratoire ;
- La durée de vie ΔT d'une particule animée d'une vitesse v, mesurée dans le référentiel du laboratoire, est liée à sa durée de vie propre ΔT_0 : $\Delta T = \gamma.\Delta T_0$.

1. À propos du boson de Higgs

1.1. En quoi l'observation du boson de Higgs permet-elle de compléter la théorie du modèle standard ?

1.2. À quelle période de l'Univers l'observation du boson de Higgs nous ramène-t-elle ?

2. Apport de la relativité restreinte

Dans le cadre de la mécanique dite relativiste, l'énergie cinétique d'un proton vaut : $E_c = (\gamma - 1)m_p.c^2$.

2.1. Si la vitesse v d'un proton tend vers la célérité de la lumière, vers quelle limite tend son énergie cinétique ?

2.2. Vérifier que l'énergie cinétique E_c d'un proton a été multipliée dans les proportions indiquées dans le Guide du LHC.

2.3. L'énergie totale d'un proton E_{totale} est égale à la somme de son énergie cinétique et de son énergie de masse au repos. Donner l'expression de l'énergie totale d'un proton. Vérifier numériquement que l'énergie totale d'un proton du LHC est pratiquement égale à son énergie cinétique.

3. Une manipulation à haute énergie

On peut assimiler l'énergie de collision entre deux protons, $E_{collision}$, à la somme des énergies cinétiques des deux protons lancés à pleine vitesse en sens inverse. On doit obtenir au LHC une énergie de collision de 14,0 TeV, considérée comme phénoménale.

3.1. Vérifier que l'énergie de collision entre deux protons lancés à pleine énergie en sens opposés vaut $E_{collision}$ = 14,0 TeV.

3.2. Chaque proton, lancé à vitesse maximale, possède une énergie totale de 7,00 TeV. Comparer l'énergie de l'ensemble des protons circulant simultanément dans le LHC avec l'énergie cinétique d'une rame de TGV lancée à pleine vitesse. *Le candidat sera amené à proposer un ordre de grandeur de la vitesse d'un TGV.* Commenter le résultat obtenu.

4. Quelle durée de vie au LHC ?

Une des particules émises lors des collisions entre les protons est le méson B. Sa durée de vie propre est $\Delta T_0 = 1{,}5 \times 10^{-12}$ s. Un détecteur, le VELO (VErtex LOcator), repère les mésons B produits.

4.1. Dans quel référentiel la durée de vie propre du méson B est-elle définie ?

4.2. On se place dans le référentiel du laboratoire supposé galiléen. Le détecteur VELO mesure une distance moyenne de parcours du méson B : d = 1,0 cm avant sa disparition.
On fait l'hypothèse que le méson B se déplace à une vitesse pratiquement égale à c. Calculer la valeur de la durée de vie ΔT du méson B mesurée dans le référentiel du laboratoire. Montrer alors que l'hypothèse faite est justifiée.