**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 1015 °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 *v0* 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×*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 *mp =* 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 = 103 GeV = 1012 eV ;
* Énergie de masse au repos d'une particule de masse *m : Em = m.c2* ;
* Masse d'une rame de TGV : *mTGV =* 444 tonnes ;
* Facteur de Lorentz  avec *v* vitesse de la particule dans le référentiel du laboratoire ;
* La durée de vie Δ*T* d'une particule animée d'une vitesse *v,* mesurée dans le référentiel du laboratoire, est liée à sa durée de vie propre Δ*T*0: Δ*T* = γ. Δ*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 : *Ec = (γ − 1)mp.c2.*

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 *Ec* d'un proton a été multipliée dans les proportions indiquées dans le Guide du LHC.

2.3. L'énergie totale d'un proton *Etotale* 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 Δ*T0* = 1,5 × 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 Δ*T* du méson B mesurée dans le référentiel du laboratoire. Montrer alors que l'hypothèse faite est justifiée.

**REPONSES**

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

…………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………………

**Bac S 2014 Métropole Correction ©** [**http://labolycee.org**](http://labolycee.org)

**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.** *EC* = (γ – 1).*mp*.*c*2 avec γ = 

Si v 🡪 c alors γ 🡪  alors *EC* 🡪 

**2.2.** Le guide du LHC indique :

Pour v0 = 0,999 997 828.c, alors *EC0* = 450 GeV

Pour v1 = 0,999 999 991.c, alors *EC1* = 15.*EC0*

Exprimons le rapport  :

*EC* =  .*mp*.*c*2

 =  =  = 

 = 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.** *Etotale* = *Ec + Em*

*Etotale* = *(γ – 1).mp.c*2 + *mp*.*c*2

*Etotale* = *γ. mp.c*2 *– mp.c*2 + *mp*.*c*2

*Etotale* = *γ. mp.c*2

Comme *Ec* = *(γ–1).mp.c*2 on peut considérer *Etotale* = *Ec* si γ –1 = γ

donc si –1 est négligeable face à γ.

Calculons la valeur du facteur de Lorentz avec les protons animés d’une vitesse v0 (les plus lents, ainsi γ sera le plus faible).

γ =  =  = 4,79794569×102

On vérifie effectivement que γ >> 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 : *Ecollision* = 2*Ecp*

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.

*Ecp* = 15×450 GeV

*Ecollision* = 2×15×450 GeV = 1,35×104 GeV = 13,5 TeV et en ne conservant que deux chiffres significatifs, on vérifie bien que *Ecollision* = 14 TeV.

*Autre méthode :* On calcule l’énergie cinétique des protons les plus rapides, de vitesse *v1* :

*Ecp= (γ – 1).mp.c*2 = 

*Ecp* = × 1,672 621 ×10–27 × 299 792 4582 = 1,120326×10–6 J

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

*Ecollision* = 2*Ecp*

*Ecollision* = 2 × 1,1203261×10–6 = 2,240652×10–6 J

On convertit en TeV

*Ecollision* =  = 14,0 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 : 7,00×2808×110×109 = **2,16×1015 TeV**

On convertit cette énergie en joules : 1 TeV = 1012 eV = 1012 × 1,60×10–19 = 1,60×10–7 J

L’ensemble des protons ont une énergie de 2,16×1015 × 1,60×10–7 = **3,46×108 J**, soit un **ordre de grandeur de 108 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 102 m.s-1.

EcTGV = 

EcTGV =  = 2,22×109 J, donc un ordre de grandeur de **109J**

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 =*  donc Δ*T* = .

Δ*T* =  = 3,3×10–11 s

On trouve Δ*T* > Δ*T0*, ce qui est cohérent avec Δ*T* = γ. Δ*T0*.

En effet γ > 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.