

Rapport sur la sûreté du Large Hadron Collider

J-P. Blaizot (IPhT, CEA/Saclay et CNRS/MPPU), G. Chardin (CSNSM, Univ. Paris-Sud, CNRS/IN2P3 et CEA/Irfu), T. Jolicoeur (LPTMS, Univ. Paris-Sud et CNRS/MPPU), P. Vanhove (IHES, Bures-sur-Yvette et IPhT, CEA/Saclay)

Introduction

Le LHC (Large Hadron Collider) est une installation de 27 km de circonférence construite au CERN à Genève, permettant d'atteindre les plus hautes énergies de particules jamais produites par l'homme, avec une intensité inégalée. Les aspects de sûreté et de sécurité associés à cette nouvelle installation ont été étudiés par plusieurs comités, comme cela a été également le cas dans le passé pour le collisionneur d'ions lourds RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) aux Etats-Unis. L'ensemble des rapports antérieurs (réalisés en 1999, 2003, avec une mise à jour en 2008), ont conclu à l'absence de risque provoqué par les expériences conduites tant auprès du LHC que du RHIC.

L'ASN (Autorité de Sûreté Nucléaire) a demandé une analyse indépendante du CERN sur les études réalisées en 2003 et 2008. Le présent rapport fournit un résumé de cette analyse et confirme les conclusions des études antérieures quant à l'innocuité des collisions réalisées par le LHC. L'argument principal invoqué repose sur l'observation suivante : la Nature réalise en permanence, et ce depuis plusieurs milliards d'années, l'équivalent d'un très grand nombre d'expériences LHC chaque seconde ; sur la Terre seule, le rayonnement cosmique correspond à plusieurs centaines de milliers d'expériences LHC¹. L'existence même de la Terre peut donc être considérée comme une preuve tangible de l'absence de danger. Cet argument peut être complété par des analyses spécifiques aux différents scénarios catastrophes avancés.

Dans ce texte, nous passons en revue ces principaux scénarios, ainsi que les arguments conduisant à leur réfutation.

Trous noirs

Selon la théorie de la relativité générale d'Einstein, une très grande concentration de matière dans une région de petite taille engendre un trou noir. Ces trous noirs sont macroscopiques, nécessitent de grandes masses, supérieures à la masse du Soleil, et pourraient être présents au centre des galaxies.

L'hypothèse que notre univers, qui nous apparaît à quatre dimensions, est peut-être doté de plusieurs dimensions spatiales supplémentaires, a conduit des physiciens à considérer la possibilité que des trous noirs microscopiques puissent être créés dans les nouvelles générations de collisionneurs à haute énergie. Dans certains des modèles proposés, qui restent largement spéculatifs, la concentration d'une énergie de l'ordre du

¹ Nous appelons dans la suite "expérience LHC" l'activité du LHC intégrée pendant une période de 10 ans avec une luminosité nominale auprès de l'ensemble des instruments associés

TeV, soit l'énergie d'une particule accélérée par le LHC, dans une région de l'ordre de 10^{-18} mètre, permettrait d'obtenir un trou noir microscopique.

La théorie quantique prédit que ces trous noirs ne sont pas stables mais se désintègrent rapidement selon un mécanisme d'évaporation thermique, d'autant plus rapide que leur taille est petite. Pour cette raison, l'existence de trous noirs microscopiques neutres est très improbable. Elle ne peut cependant être complètement exclue ; mais, dans ce cas extrême, les contraintes astrophysiques, détaillées dans une étude exhaustive réalisée par les physiciens Steven Giddings et Michelangelo Mangano, citée en référence du présent rapport, permettent d'infirmer l'hypothèse que de tels trous noirs puissent grossir jusqu'à une taille macroscopique par accrétion de la matière environnante.

La Terre, notre système solaire et notre galaxie (la Voie Lactée) sont en effet baignés par un flux important de rayons cosmiques énergétiques dont les effets sont analysés et mesurés très précisément à l'observatoire international Pierre Auger en Argentine. Les collisions de deux protons dans le LHC, avec une énergie de quelques TeV, donnent les mêmes produits de réaction que des rayons cosmiques d'une énergie de l'ordre de 10^{17} eV entrant en collision avec la Terre, le Soleil ou d'autres objets astrophysiques, notamment des étoiles à neutrons, qui existent depuis plusieurs milliards d'années. Même pour des corps de relativement petite taille comme la Terre, le rayonnement cosmique correspond à plusieurs centaines de milliers d'expériences LHC, et ce nombre est plus important encore pour des planètes comme Jupiter ou des étoiles comme le Soleil.

On peut invoquer le fait que les éventuels trous noirs produits par le LHC le seraient dans des collisions frontales leur conférant une impulsion faible par rapport à la Terre, alors que les collisions des rayons cosmiques s'effectuent entre un proton ou un noyau de très haute énergie qui provient de l'espace et un noyau de l'atmosphère pratiquement immobile par rapport à la Terre. Cette différence est significative mais ne modifie pas la conclusion sur l'innocuité du LHC. En effet, un trou noir chargé sera capturé par la Terre, qu'il soit produit par le LHC ou par le rayonnement cosmique, et le fait que la Terre existe encore après 4,5 milliards d'années démontre l'innocuité de tels trous noirs. On pourrait supposer que les trous noirs produits par les rayons cosmiques sont toujours neutres, bien que ceci soit en contradiction avec le fait qu'ils puissent à la fois accréter des noyaux atomiques chargés et qu'ils ne s'évaporent pas. Mais ces trous noirs neutres seraient de toute façon capturés par les étoiles à neutrons, et l'existence de telles étoiles à neutrons permet d'éliminer ce scénario.

Instabilité du vide

Une autre possibilité évoquée à propos du LHC est la nucléation d'une bulle de « vrai » vide, qui permettrait à l'Univers de découvrir de façon catastrophique le véritable vide, plus stable car correspondant à une énergie plus faible. Le vide est généralement considéré comme l'absence de matière et donc pas vraiment comme un milieu à part entière. Néanmoins, la théorie relativiste des champs a conduit les physiciens à attribuer au vide un certain nombre de propriétés qui se rapprochent considérablement de celles d'un milieu matériel. Ainsi, les raies spectrales émises par les atomes sont-elles très légèrement influencées par le bouillonnement incessant des particules qui existent virtuellement dans le vide.

Certaines théories envisagent la possibilité que ce vide puisse exister sous plusieurs phases différentes tout comme les substances matérielles existent sous plusieurs phases. Par exemple l'eau ordinaire se rencontre sous forme liquide, solide et gazeuse et il existe même plusieurs formes différentes de glace. Cette variété se rencontre dans toutes les substances matérielles connues.

Le modèle standard des interactions entre constituants élémentaires de la matière possède également plusieurs sortes de vide et les physiciens pensent qu'il y a eu dans le passé des changements d'états brutaux entre des vides de genre différents. Ces changements d'état sont appelés transitions de phase. En font partie les phénomènes courants que sont l'ébullition, la fonte, le gel dans le cas de l'eau par exemple. Il y a eu vraisemblablement une transition de phase dans l'Univers primordial lorsque, à un âge d'environ 10^{-12} secondes, la transition électrofaible s'est produite.

On pourrait donc imaginer que l'Univers d'aujourd'hui soit dans un état métastable, tout comme l'eau peut rester liquide bien en dessous de zéro degré centigrade. C'est le phénomène de la surfusion qui peut cesser brutalement si l'on perturbe par un choc le liquide surfondu – il cristallise immédiatement. Si l'Univers était aujourd'hui dans un état métastable, toute perturbation comme une collision de protons à très haute énergie serait également susceptible de le ramener localement dans le vrai vide. Un tel phénomène se propagerait a priori à une vitesse proche de celle de la lumière et atteindrait rapidement l'Univers tout entier.

On peut alors remarquer qu'une telle catastrophe universelle, si elle devait se produire, aurait déjà dû avoir lieu dans le passé. En effet, de nombreuses collisions proton-proton avec des énergies égalant ou dépassant même très largement celles du LHC, ont lieu un grand nombre de fois par seconde dans l'Univers. Le simple fait que nous existions infirme donc l'existence d'une telle métastabilité et nous permet de déduire que le LHC ne provoquera pas de catastrophe correspondante.

Monopôles magnétiques

Les monopôles magnétiques sont des particules hypothétiques, analogues de la charge électrique élémentaire, mais associées au champ magnétique. Ces particules n'ont jamais été observées, malgré d'importants efforts expérimentaux en ce sens, notamment au laboratoire souterrain du Gran Sasso (Italie) où une expérience dédiée, MACRO, d'une surface de détection de plusieurs centaines de mètres carrés, a cherché à détecter ces particules pendant plusieurs années, sans succès.

Les physiciens Curtis Callan et Valery Rubakov ont noté que, s'ils existent, les monopôles magnétiques pourraient peut-être déclencher la désintégration de la matière sur leur passage. L'intérêt porté aux monopôles magnétiques est dû au fait que ces particules agiraient, sans se consumer, comme des catalyseurs en rendant indéfiniment possible la désintégration de la matière.

Les théories qui prévoient l'existence de monopôles magnétiques possédant ces propriétés leur attribuent généralement une masse très élevée, des milliards de fois

supérieure à celle des particules que pourra produire le LHC. Il semble donc très peu probable que des monopôles magnétiques puissent être produits au LHC.

On peut néanmoins remarquer que s'ils étaient produits malgré tout par le LHC, les monopôles magnétiques le seraient a fortiori par les rayons cosmiques qui viennent interagir en permanence avec l'atmosphère terrestre. Tout monopôle, qu'il soit produit par les rayons cosmiques ou par le LHC, est arrêté dans la Terre car sa perte d'énergie dans la matière est beaucoup plus importante que celle d'un électron de même vitesse. L'existence de la Terre, après son bombardement par le rayonnement cosmique pendant une période de plus de 4 milliards d'années, indique donc que les monopôles magnétiques éventuellement produits au LHC n'auront pas de conséquence observable sur la Terre avant un grand nombre de milliards d'années.

Strangelets

La matière étrange est un état hypothétique de la matière nucléaire constituée non seulement de quarks u et d de la première famille, comme la matière nucléaire ordinaire, mais aussi, en proportion à peu près égale, de quarks s, dits « étranges », plus lourds, de la deuxième famille de quarks. Des gouttelettes de telle matière étrange, appelées strangelets, pourraient être plus stables que les noyaux atomiques ordinaires, au delà d'une certaine taille (il peut exister des noyaux atomiques étranges dans lesquels un petit nombre de nucléons sont remplacés par des particules étranges, mais ceux-ci sont instables et donc inoffensifs). On peut alors imaginer qu'une fois produit, un strangelet pourrait absorber la matière ordinaire avec laquelle il rentre en contact et la transformer elle aussi en matière étrange, enclenchant un processus catastrophique qui ne prend fin qu'avec la disparition de la matière nucléaire environnante. La réfutation d'un tel scénario repose à nouveau, mais en partie seulement, sur l'argument que les rayons cosmiques devraient avoir produits des strangelets en nombre beaucoup plus important que ne pourra jamais le faire le LHC, et que ceux-ci n'ont eu aucune conséquence observable.

On peut cependant remarquer, à juste titre, que, comme dans le cas des trous noirs, les strangelets potentiellement produits par le LHC le seront avec des vitesses relatives par rapport à la Terre beaucoup plus faibles que ceux produits par les rayons cosmiques. Contrairement aux trous noirs, les strangelets sont des objets fragiles, et il est concevable que ceux produits par le LHC survivent plus facilement aux collisions avec la matière nucléaire terrestre, et soient donc potentiellement plus dangereux, que les strangelets produits par le rayonnement cosmique qui eux ont toutes les chances d'être systématiquement détruits avant de parvenir au niveau du sol, ou dans leurs premières collisions avec la matière terrestre. Ce scénario très pessimiste est cependant exclu par les analyses détaillées qui sont décrites dans les documents cités en référence.

On peut par ailleurs souligner que la probabilité de produire des strangelets au LHC est bien moindre que celle d'en produire dans les accélérateurs de plus basse énergie, comme le SPS (Super Proton Synchrotron du CERN) ou le RHIC, et aucune trace de strangelet n'a été mise en évidence dans les expériences correspondantes. Les modèles de production de particules dans les collisions d'ions lourds qui ont été élaborés au cours de ces vingt dernières années ont été bien validés par l'étude des collisions au

RHIC. Ces modèles permettent d'estimer avec une bonne précision les taux de production de toutes les particules sur la base d'arguments thermodynamiques. Les données du SPS et du RHIC montrent que les propriétés thermodynamiques de la matière produite dans les collisions d'ions lourds évoluent lentement avec l'énergie de la collision, et il est facile d'extrapoler pour prédire ce qu'elles seront au LHC. C'est sur la base d'une telle extrapolation que l'on s'attend à ce que la probabilité de produire des strangelets au LHC soit encore plus faible qu'au RHIC, c'est-à-dire complètement négligeable. Notons enfin que si les propriétés thermodynamiques de la matière produite au LHC se révélaient être très différentes de celles attendues, remettant ainsi en cause l'argument précédent, ceci serait apparent dès les toutes premières expériences.

Conclusions

La question du danger des collisions de particules étudiées au LHC est une question importante, qu'il est possible d'étudier au moyen d'arguments scientifiques étayés par l'étude du rayonnement cosmique et celle des expériences réalisées auprès des accélérateurs qui ont précédé le LHC, en particulier le SPS et le RHIC.

Pour tous les scénarios proposés, même ceux que l'on peut considérer comme peu réalistes, notre analyse des rapports existants confirme que les collisions produites par le LHC ne présentent pas de danger causé par le bombardement permanent, beaucoup plus important, du rayonnement cosmique sur la Terre et d'autres corps célestes depuis leur création, c'est à dire, depuis plusieurs milliards d'années. Autrement dit, ce danger est inexistant.

Le danger potentiel des accélérateurs de particules reste néanmoins une question essentielle, qu'il conviendra de reconsidérer à la lumière des connaissances acquises lorsque des avancées techniques permettront la réalisation d'accélérateurs plus puissants ou d'un type nouveau. Il est ainsi important de noter que bon nombre des arguments que nous avons utilisés, ceux en particulier utilisant notre connaissance actuelle des rayons cosmiques, devront être révisés lorsque l'énergie des faisceaux sera supérieure d'un facteur 30 environ à l'énergie des faisceaux du LHC. Une telle énergie de faisceau n'est pas inaccessible techniquement, même si elle ne semble pas pouvoir être atteinte avant une vingtaine d'années au moins.

La construction de machines très intenses et de très haute énergie utilisant des faisceaux d'électrons et de muons devra également être soumise à une argumentation différente de celle qu'il a été possible d'utiliser ici.

Références

Site web « Sécurité du LHC »

<http://public.web.cern.ch/public/fr/lhc/Safety-fr.html>

Site internet LHC France

<http://www.lhc-france.fr/>

J. P. Blaizot, J. Iliopoulos, J. Madsen, G.G. Ross, P. Sonderegger and H. J. Specht,
« Study of potentially dangerous events during heavy-ion collisions at the
LHC: Report of the LHC safety study group », Yellow report CERN-2003-001,
<http://cdsweb.cern.ch/record/613175>

J. Ellis, G. Giudice, M. L. Mangano, I. Tkachev and U. Wiedemann,
« Review of the Safety of LHC Collisions », J. Phys. G 35, 115004 (2008)
[arXiv:0806.3414 [hep-ph]].

S. B. Giddings and M. L. Mangano,
« Astrophysical implications of hypothetical stable TeV-scale black holes »
Phys. Rev. D 78 (2008) 035009 ; [arXiv:0806.3381 [hep-ph]].

The Pierre Auger Collaboration,

« Recent results from the Pierre Auger Observatory » arXiv:0809.2210 [astro-ph].

Site web de l'observatoire Pierre AUGER :

<http://www.auger.org/>

R. L. Jaffe, W. Busza, F. Wilczek and J. Sandweiss,
« Review of speculative “disaster scenarios” at RHIC »,
Rev. Mod. Phys. 72, 1125 (2000)

Martin Rees, « Before the Beginning: Our Universe and Others », (Free Press, 2002)