

Rapport sur la sûreté des collisions au LHC

LHC Safety Assessment Group^(*)

lsag@cern.ch
(20 juin 2008)

Résumé :

Une étude, conduite en 2003 par le groupe d'étude de la sûreté (Safety Study Group) du LHC (Large Hadron Collider; le grand collisionneur de protons du CERN, à Genève) et portant sur les collisions produites par l'accélérateur a conclu que l'exploitation de ce dernier n'entraînait aucun danger.

Le présent rapport reprend l'analyse conduite en 2003 à la lumière de résultats expérimentaux et théoriques additionnels qui confirment, mettent à jour et généralisent les conclusions de l'étude précédente. Le LHC reproduit en laboratoire et sous contrôle des collisions à des énergies au repos inférieures à celles des rayons cosmiques bombardant l'atmosphère terrestre depuis des milliards d'années.

Nous rappelons dans notre étude les taux de collisions des rayons cosmiques avec la Terre, le Soleil, les étoiles à neutrons et les naines blanches, à des énergies supérieures à celles produites au LHC. La stabilité de ces objets astronomiques indique que de telles collisions ne peuvent être dangereuses.

Plus précisément, la possible production au LHC d'objets hypothétiques comme des bulles de vide conduisant à une transition du vide, des monopôles magnétiques, des trous noirs microscopiques (ou mini trous noirs) et des strangelets est étudiée, montrant l'absence de risques associés. Il est prédit que tout trou noir microscopique produit au LHC se désintègre par radiation Hawking avant même qu'il n'atteigne les murs du détecteur. Si un trou noir microscopique était stable, ceux produits par les rayons cosmiques auraient été arrêtés à l'intérieur de la Terre ou dans d'autres objets astronomiques. La stabilité de tels objets impose de sévères contraintes sur le taux possible d'accrétion de tels trous noirs qui rendent le danger associé inconcevable. En ce qui concerne les strangelets, leur production est fortement contrainte dans les collisions d'ions lourds au LHC par le bon accord entre les mesure de production de particules au RHIC et des modèles thermodynamiques simples, ce qui impose un danger associé nul.

^(*)John Ellis, Gian Giudice, Michelangelo Mangano, Igor Tkachev^() et Urs Wiedemann**

Département de physique, division physique théorique, CERN, CH 1211 Genève 23, Suisse

^(**)

Adresse permanente: Institut de recherche nucléaire de l'Académie russe des sciences, Moscou 117312, Russie

(traduction française : Julien Baglio^{***})

^{***} Laboratoire de physique théorique, Université Paris XI, bâtiment 210, F-91405 Orsay Cedex, France)

1 - Introduction

Les conditions expérimentales contrôlées offertes par les accélérateurs permettent l'étude détaillée d'un grand nombre de phénomènes naturels produits dans l'Univers. Un grand nombre de particules telles que les muons, les pions ou les particules étranges ont d'abord été découvertes dans les rayons cosmiques puis étudiées avec précision grâce aux accélérateurs. L'augmentation de l'énergie produite par les accélérateurs a permis de révéler beaucoup de particules plus lourdes et instables, comme celles contenant des quarks lourds ou bien les particules médiatrices de la force faible. Bien qu'absentes dans la matière ordinaire stable, elles ont joué un rôle prépondérant dans l'histoire primordiale de l'Univers et il se peut qu'elles aient leur mot à dire en ce qui concerne les objets astronomiques de haute énergie tels que ceux produisant les rayons cosmiques.

L'énergie des accélérateurs, bien qu'encore très faible comparée aux rayons cosmiques les plus énergétiques, a régulièrement augmenté depuis les débuts de la physique des particules. À chacune de ces augmentations on peut se demander quels risques peuvent survenir avec l'apparition possible de nouveaux phénomènes. D'un côté, il est toujours rassurant de voir que les rayons cosmiques ont bombardé la Terre depuis sa création et qu'il n'y a pas eu d'effets catastrophiques. De l'autre, les particules produites dans les collisions entre l'atmosphère et les rayons cosmiques ont des vitesses différentes par rapport à la Terre de celles produites en laboratoire, les situations ne sont donc pas directement comparables. Ainsi, la question de savoir si l'aspect inoffensif des rayons cosmiques peut aussi s'appliquer aux collisions en accélérateur s'est posée.

La construction du LHC est pratiquement achevée au CERN, le centre européen de physique des particules.¹ Il a été conçu pour collisionner des paires de protons dont l'énergie individuelle est de 7 TeV (à peu près 7000 fois leur énergie de masse), et des paires de noyaux de plomb d'énergie individuelle d'environ 2,8 TeV par nucléon (nucléon = proton ou neutron). Bien que ces énergies soient bien plus importantes que celles obtenues avec les accélérateurs précédents, elles restent très inférieures aux énergies produites par les collisions quotidiennes avec les rayons cosmiques les plus énergétiques. À la lumière des questions de sûreté des précédents accélérateurs et en prévision de questions similaires soulevées par le LHC, la direction du CERN demanda au groupe d'étude de la sûreté du CERN un rapport quant à la sûreté du LHC, groupe regroupant des experts indépendants. D'après ce rapport, publié en 2003 [1], toute menace concevable du LHC ne repose sur aucune base.

L'avancée des opérations du LHC a maintenant ravivé de telles craintes quant à la sécurité, ce qui a conduit la direction du CERN à nous demander une nouvelle étude, en examinant les arguments présentés dans le rapport de 2003 ainsi que les travaux sur la production possible de nouvelles particules. Ce nouveau rapport doit aussi réactualiser l'étude de 2003 à la lumière des résultats expérimentaux provenant en particulier du collisionneur d'ions lourds relativistes de Brookhaven (RHIC) ainsi qu'en s'appuyant sur les récentes spéculations théoriques sur de nouveaux phénomènes possibles.

Nous envisageons tous les scénarios spéculatifs discutés dans la littérature scientifique sur de nouvelles particules ou états de la matière et nous soulevons les dangers potentiels. La méthodologie employée est basée sur la méthode empirique en utilisant les observations expérimentales, permettant ainsi de l'utiliser pour d'autres phénomènes exotiques pouvant soulever le même type de questions plus tard.

Notre attention est principalement portée sur deux phénomènes : la production hypothétique de trous noirs microscopiques tels que ceux apparaissant dans certains modèles théoriques à base de

¹ Le 10 septembre 2008 a eu lieu le test d'injection des faisceaux dans l'anneau complet (note du traducteur)

dimensions spatiales supplémentaires, et la production spéculative de 'strangelets' qui sont d'hypothétiques briques de matière semblables aux nucléons habituels mais contenant en plus beaucoup de quarks lourds. Ces deux scénarios ont été étudiés avec attention dans le rapport de 2003 [1]. Leurs conclusions concernant les strangelets, obtenues en étudiant les collisions d'ions lourds, s'appliquent tout aussi bien voire encore mieux aux collisions proton-proton du LHC.

Depuis 2003 les spéculations autour de l'existence des mini trous noirs et de leurs possibles signatures expérimentales ont été nombreuses, comme rapportées dans [2] où des références précises peuvent être trouvées. En ce qui concerne les strangelets, les mesures expérimentales détaillées faites au RHIC sur la production de particules contenant différents nombre de quarks étranges [3] permettent de raffiner les arguments déjà présents en 2003 : même en supposant l'existence des strangelets, il serait plus difficile de les produire au LHC que de les produire au RHIC.

Avant de discuter plus en détail de ces deux cas hypothétiques, la partie 2 de ce rapport rappelle les taux de collisions des rayons cosmiques de haute énergie avec différents objets astronomiques, entre autres la Terre et le Soleil. Il est estimé que l'Univers reproduit plus de 10^{13} fois par seconde le nombre total de collisions que le LHC produira pendant toute sa durée de fonctionnement, phénomène qui s'est déjà produit à peu près 10^{31} fois depuis l'origine de l'Univers. Le fait que les objets astronomiques survivent aux rayons cosmiques impose de sévères limites supérieures aux sources hypothétiques de danger. En particulier, ni la création de bulles de vide conduisant à une transition ni la production de monopôles magnétiques ne sont des sources de danger envisageables, comme cela est discuté en partie 3.

La partie 4 s'intéresse aux hypothétiques mini trous noirs. S'ils peuvent être produits lors de collisions de particules élémentaires, ils doivent aussi se désintégrer en ces mêmes particules. Théoriquement, les mini trous noirs devraient se désintégrer par radiation Hawking, qui est un phénomène basé sur les principes fondamentaux de la physique sur lesquels il existe un consensus général. Mais imaginons néanmoins que d'hypothétiques mini trous noirs soient stables ; nous donnons ici une liste d'arguments prouvant qu'ils seraient incapables d'attirer la matière de façon dangereuse pour la Terre [2]. Si des mini trous noirs devaient être créés au LHC, ils auraient aussi été produits par les rayons cosmiques et se seraient arrêtés sur Terre ou sur d'autre objets astronomiques. La stabilité de tels objets montre que lesdits mini trous noirs ne sont en aucune façon dangereux.

En ce qui concerne les tout aussi hypothétiques strangelets, la partie 5 de ce rapport présente les données accumulées au RHIC sur l'abondance et la vitesse de particules interagissant fortement, ce qui inclut les particules contenant un ou plusieurs quarks étranges produites au RHIC et dans les expériences de collisions d'ions lourds précédentes [3]. Toutes ces données sont tout à fait compatibles avec un modèle thermodynamique de production très simple ne dépendant uniquement que de la température effective et de la densité nette de baryons (nucléons). La température effective est en bon accord avec les calculs théoriques basés sur les premiers principes et la densité de baryons diminue quand l'énergie augmente, de nouveau en accord avec les prédictions théoriques. Les calculs pour les collisions d'ions lourds au LHC donnent une température effective similaire et une densité de baryons plus faible qu'au RHIC. Cela signifie que le LHC produira des strangelets à un taux inférieur au RHIC, si ces strangelets existent.

Nous réitérons la conclusion du rapport de 2003 du groupe de sûreté du LHC [1] : il n'y aucune base supportant un danger potentiel du LHC. En effet, à la fois les calculs théoriques et les résultats expérimentaux depuis 2003 ont renforcé cette conclusion.

2 – Comparaison entre le LHC et les collisions avec les rayons cosmiques

Le LHC est conçu pour collisionner deux faisceaux de protons ou d'ions lourds tournant en sens opposés l'un à l'autre. On attend des collisions proton-proton à une énergie de 7 TeV par faisceau². Pour atteindre une énergie équivalente au centre de masse avec la collision d'un proton issu d'un rayon cosmique sur une cible fixe telle que la Terre ou un autre objet astronomique, il faut que l'énergie du rayon cosmique soit d'au moins 10^8 GeV, soit 10^{17} eV [4]. Lorsque le LHC aura atteint son taux de collision nominal, il produira environ 1 milliard de collisions proton-proton par seconde dans chacun des deux détecteurs les plus importants ATLAS et CMS. Le temps effectif pendant lequel le LHC produira des collisions à la luminosité nominale est de 10 millions de secondes par an. Ainsi, chacun des deux détecteurs s'attend à obtenir environ 10^{17} collisions proton-proton durant la durée prévue des expériences.

Les rayons cosmiques les plus énergétiques jamais détectés atteignent des énergies d'environ 10^{20} eV, comme le montre la figure 1 ; le flux total de rayons cosmiques avec des énergies d'au moins 10^{17} eV heurtant chaque centimètre carré de la surface de la Terre est mesuré à 5×10^{-14} par seconde [5]. La surface de la Terre est d'environ 5×10^{18} m² et l'âge de la Terre est estimé à 4,5 milliards d'années. Ainsi, plus de 3×10^{22} rayons cosmiques dont l'énergie est supérieure ou égale à 10^{17} eV (donc supérieure ou égale à l'énergie du LHC) ont frappé la surface de la Terre depuis sa formation. Cela signifie [6] que la Nature a déjà effectué l'équivalent de cent milles programmes expérimentaux du LHC sur la Terre – et cette dernière existe encore.

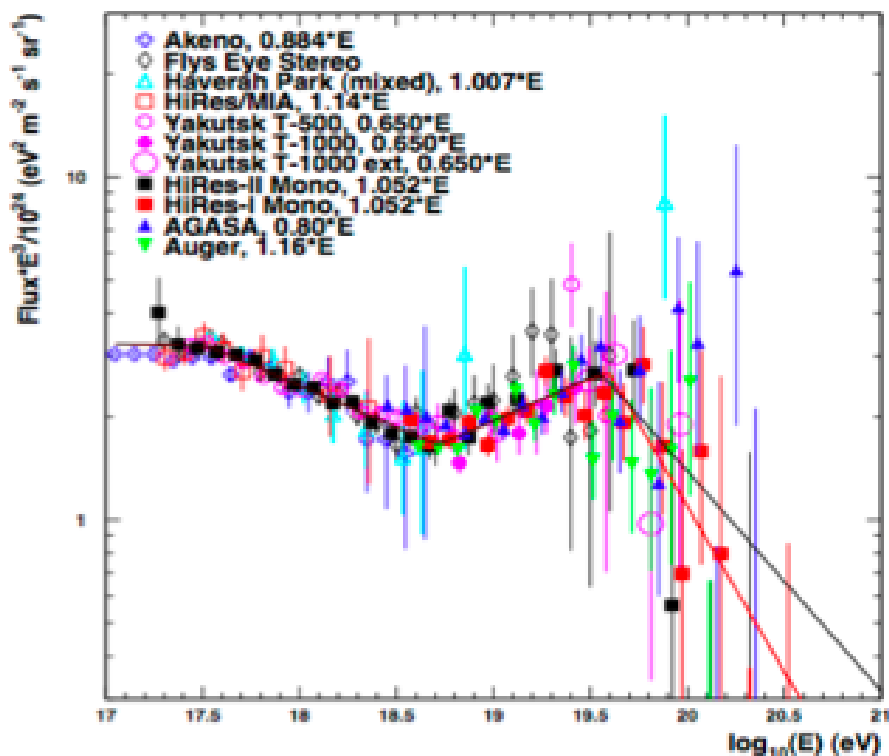


Fig. 1 : spectre des rayons cosmiques d'ultra haute énergie, mesuré par diverses expériences [5]. Chaque rayon cosmique d'énergie telle que tracée ci-dessus, c'est-à-dire au-delà de 10^{17} eV, libère lors d'une collision avec l'atmosphère plus d'énergie dans le référentiel du centre de masse que ne le fait une collision au LHC

D'autres objets astronomiques sont plus gros, ce qui augmente d'autant plus le nombre d'expériences

² soit un total de 14 TeV au centre de masse (note du traducteur)

LHC que les rayons cosmiques ont fait sur ces objets. Par exemple le rayon de Jupiter est 10 fois plus grand que celui de la Terre, et le rayon du Soleil l'est 100 fois. Ainsi la surface du Soleil est 10 000 fois plus importante que la surface de la Terre ce qui implique l'équivalent d'un milliard de programmes LHC déjà réalisés via les collisions entre les rayons cosmiques et le Soleil – ce dernier existe toujours.

Nous pouvons continuer avec la Voie Lactée, qui contient environ 10^{11} étoiles de taille similaire à celle du Soleil, et il y a environ 10^{11} galaxies similaires à la nôtre dans l'Univers observable. Les taux de collision entre les rayons cosmiques et ces étoiles sont similaires à ceux observés pour le Soleil, ce qui signifie que la Nature a déjà accompli environ 10^{31} programmes expérimentaux LHC depuis l'origine de l'Univers. De plus, chaque seconde, l'Univers continue de faire environ 3×10^{13} programmes LHC. Il n'y a absolument aucun signe prouvant qu'un seul de ces « programmes LHC » précédents ait eu une des conséquences notables : les étoiles dans notre galaxie et dans les autres existent toujours et l'astrophysique conventionnelle est capable d'expliquer tous les trous noirs astrophysiques détectés.

Ainsi, l'existence continue de la Terre et des autres objets astronomiques peut être utilisée pour contraindre ou exclure les spéculations sur de possibles nouvelles particules qui pourraient être produites par le LHC.

3 – Vide métastable (bulle de vide) et monopôles magnétiques

Les taux élevés de collisions des rayons cosmiques vus dans la partie précédente, à des énergies plus grandes que celle du LHC, impliquent directement que la production de bulle de vide ou de monopôles magnétiques au LHC ne peut entraîner de danger [1].

On a souvent suggéré que l'Univers n'était peut-être pas complètement stable car l'état que nous appelons « vide » pourrait ne pas être l'état de plus basse énergie possible. Selon ce scénario, notre « vide » se désintégrerait en fin de compte en un tel état de plus basse énergie. Comme il apparaît que cela n'est pas advenu, le temps de vie de notre vide avant une telle désintégration doit être supérieur à l'âge de l'Univers. Le danger potentiel lié à des collisions de particules de haute énergie proviendrait du fait qu'elles puissent stimuler la production de petites « bulles » d'un tel état de plus basse énergie et provoquer la transition complète vers ledit état via l'expansion de ces bulles ce qui détruirait non seulement la Terre mais l'Univers tout entier.

Cependant, si le LHC pouvait produire de telles bulles, les rayons cosmiques le pourraient aussi bien entendu. Cette possibilité a été étudiée pour la première fois dans [7], et les conclusions finales ont été reproduites dans [8] : l'expansion de telles bulles³ aurait déjà annihilé de larges parties de l'Univers observable des milliards d'années plus tôt. L'existence continue de l'Univers signifie que telles bulles de vide ne sont pas produites dans les collisions avec les rayons cosmiques et donc *a fortiori* le LHC ne va pas non plus les produire.

D'année en année des suggestions ont aussi été faites quant à l'existence de monopôles magnétiques, c'est-à-dire de particules avec une charge magnétique libre non-nulle. Comme Dirac l'a montré en premier, toute charge magnétique libre doit être quantifiée et doit être plus importante en ordre de grandeur que ne l'est la charge électrique de l'électron ou du proton. C'est pour cette raison que les recherches de monopôles magnétiques se sont focalisées sur la recherche de particules lourdes ionisantes ou bien la recherche de quanta de charge magnétique. Cette recherche va être poursuivie au LHC.

³ provoquant une transition de vide (note du traducteur)

Dans certaines théories de grande unification, mais pas dans le Modèle Standard de la physique des particules, des monopôles peuvent aussi catalyser la désintégration des nucléons, en transformant les protons et les neutrons en électrons et positrons ainsi que des mésons instables. Dans ce cas, des collisions successives avec un grand nombre de nucléons dégageraient une énergie considérable. Les monopôles magnétiques possédant de telles propriétés devraient avoir une masse d'au moins 10^{15} GeV ce qui est bien trop lourd pour être produit au LHC.

Néanmoins, nous allons ici considérer la possibilité de produire des monopôles magnétiques légers et destructeurs de protons au LHC.

Une discussion quantitative de l'impact de tels monopôles magnétiques sur la Terre a été présentée dans [1], qui en a conclu que seulement un microgramme de matière serait détruite avant que le monopôle ne quitte la Terre. Indépendamment de cette conclusion, si des monopôles pouvaient être créés au LHC, les rayons cosmiques de haute énergie en auraient déjà produits beaucoup d'entre eux lors de leur collision avec l'atmosphère terrestre ou avec d'autres objets astronomiques. Ayant une grande charge magnétique tout monopôle créé par un rayon cosmique aurait été arrêté par la matière terrestre [2]. L'existence continue de la Terre et d'autres objets astronomiques après des milliards de bombardements par les rayons cosmiques montre que n'importe quel monopôle produit ne catalyse pas la désintégration du proton à un taux significatif. Si les collisions produites au LHC devaient créer des monopôles dangereux, les rayons cosmiques de haute énergie l'auraient déjà fait.

L'existence continue de la Terre et des autres objets astronomiques tels que le Soleil montre que tout monopôle magnétique produit par des rayons cosmiques de haute énergie sont sans danger. Il en va ainsi de même pour tout monopôle hypothétiquement produit au LHC.

4 – Mini trous noirs

Le LHC va produire des collisions à des énergies au centre de masse bien inférieures à celles de certains des rayons cosmiques ayant bombardé la Terre et d'autres objets astronomiques depuis des milliards d'années, comme il a été démontré plus haut. On estime que durant l'histoire de l'Univers, la Nature a effectué l'équivalent de 10^{31} projets LHC (définis par la luminosité intégrée pour des rayons cosmiques dont l'énergie au centre de masse est d'au moins 14 TeV) et continue de le faire à un taux de plus de 10^{13} expériences par seconde via les collisions entre les différents objets astronomiques et les rayons cosmiques énergétiques.

Il existe néanmoins une différence significative entre le bombardement d'un objet au repos par des rayons cosmiques et des collisions au LHC : toute nouvelle particule massive créée par le LHC aura souvent une faible vitesse alors que les collisions avec les rayons cosmiques produisent des particules dont la vitesse est élevée. Ce point important a été étudié de manière détaillée [2] depuis le rapport de 2003 du groupe d'étude de la sûreté du LHC [1]. Comme nous allons le voir, les conclusions qu'il donnait quant à l'absence de danger des collisions au LHC sont validées et renforcées par les travaux plus récents.

On rappelle que les trous noirs observés dans l'Univers ont des masses très importantes, bien supérieures à celle du Soleil. D'un autre côté, chaque collision d'une paire de proton au LHC dégagera une énergie comparable à deux moustiques qui se percutent, ce qui signifie que n'importe quel trou noir produit par le LHC devrait être bien plus petit que ceux observés en astrophysique. Bien plus, si l'on en croit la théorie de la relativité générale d'Einstein qui décrit la gravitation et dont beaucoup de ses prédictions ont été vérifiées, il n'y a aucune chance pour que LHC puisse produire des trous noirs car la force gravitationnelle entre deux particules élémentaires est bien trop faible.

Cependant, il existe des spéculations théoriques reposant sur l'existence à très courte échelle de dimensions supplémentaires et permettant de rendre la force gravitationnelle suffisamment importante entre deux particules pour permettre l'apparition de trous noirs.

Comme l'a montré Stephen Hawking trente ans plus tôt [9], on s'attend à ce que les trous noirs soient en définitive instables, l'argument reposant sur des principes généraux de la théorie quantique en espace courbe tel que celui aux abords d'un trou noir. La raison principale de ce phénomène est très simple : d'après la mécanique quantique des paires de particules et d'antiparticules doivent être créées près de l'horizon des événements du trou noir, or une partie de ces particules (ou antiparticules) va être absorbée par le trou noir, et son antiparticule correspondante (ou particule correspondante) doit être évacuée vers l'extérieur, en tant que radiation. Il existe un très large consensus au sein de la communauté scientifique sur la réalité de la radiation Hawking, même si le phénomène n'a pas encore été mis en évidence de façon directe par manque de sensibilité de nos instruments à l'heure actuelle.

On peut aussi faire un raisonnement indépendant de celui basé sur la radiation Hawking. Si des mini trous noirs devaient être produits seuls (sans particule additionnelle) par des collisions entre les quarks et les gluons à l'intérieur des protons, ils devraient aussi se désintégrer en particules du même type que celles qui les ont produits [10], car ils porteraient les mêmes nombres quantiques que les particules qui les ont créés ce qui implique que leur désintégration en ces particules est autorisée. Ainsi, un trou noir microscopique ne peut être complètement noir, et dans la physique quantique standard le taux de désintégration est directement relié au taux de production, ce qui implique un temps de vie très court. Si l'on envisage le cas de production de trous noirs en paire portant de nouveaux nombres quantiques opposés (par conservation), la conclusion est identique : seul leur état de plus basse énergie est stable et donc toute accréation de matière ordinaire telle que les quarks, les gluons ou les leptons doit être immédiatement évacuée par radiation. Ce raisonnement ainsi que celui basé sur la radiation Hawking restent valide dans les scénarios à base de dimensions supplémentaires utilisés pour envisager la production de mini trous noirs.

On pourrait cependant se demander ce qui se passerait si un mini trou noir stable serait produit au LHC [2]. Nous rappelons encore une fois que cette hypothèse demande la violation de certains des principes fondamentaux de la mécanique quantique – une des pierres angulaires des lois de la Nature – pour permettre au taux de désintégration du trou noir d'être annulé relativement à son taux de production ; et/ou la violation de la relativité générale, pour annuler la radiation Hawking.

La plupart des trous noirs produits par le LHC ou dans les collisions avec les rayons cosmiques devraient avoir une charge électrique car ils auraient été créés par des collisions entre des quarks chargés. Nous avons une bonne connaissance expérimentale de la façon dont un objet chargé électriquement interagit avec la matière, une conséquence directe de ceci est que des trous noirs chargés et stables produits par des collisions entre des rayons cosmiques et la Terre ou le Soleil devraient ralentir et finalement s'arrêter à cause des interactions électromagnétiques entre les trous noirs et l'intérieur de ces objets astronomiques, en dépit de leur vitesse initiale élevée. L'absence totale d'effet macroscopique qui serait dû à des trous noirs chargés qui se seraient accumulés depuis les milliards d'années de vie du Soleil et de la Terre signifie que soit ils n'ont pas été produits, soit ils sont tous neutres et donc aucun n'a pu être arrêté à l'intérieur de la Terre (ou du Soleil), ou encore ils n'ont pas eu d'effet catastrophique s'ils ont été arrêtés.

Si un trou noir devait être produit par un rayon cosmique, il absorberait préférentiellement des protons et des neutrons durant son trajet à travers la Terre car leurs masses sont bien plus importantes que celle de l'électron. Ainsi, ce trou noir devrait acquérir une charge électrique positive même si sa charge était nulle lors de sa création. Le principe de neutralisation standard dû à la création de paire de particule-antiparticule près de l'horizon du trou noir – le principe de

Schwinger – est basé sur des principes très similaires à ceux de la radiation Hawking ; par conséquent si l'on annule la radiation Hawking, le principe de Schwinger doit sans doute aussi être abandonné. Ceci implique que si l'on suppose à la fois que les trous noirs sont stables et absorbent de la matière et qu'en plus ils sont neutres, on doit demander encore plus d'écarts aux principes de base de la physique ; à l'heure actuelle il n'y a aucun exemple expérimental d'un tel scénario dans les systèmes physiques microscopiques.

Nous allons de plus voir qu'il est possible d'exclure toute conséquence macroscopique due aux trous noirs même si de tels scénarios inconnus étaient réalisés [2].

Le taux d'accrétion d'un trou noir arrêté est dépendant du modèle choisi. Ceci est étudié en détail dans [2], où différents scénarios d'accrétion basés sur de la physique macroscopique bien établie ont été utilisés pour poser des limites supérieures (limites type scénario catastrophe) au taux de croissance d'un trou noir dans la Terre et dans d'autres objets plus denses tels que les naines blanches et les étoiles à neutrons. Dans les modèles à dimensions supplémentaires motivant l'existence de mini trous noirs (mais qui ne motivent pas leur stabilité), le taux d'accrétion serait si faible dans le cas d'au moins sept dimensions que la Terre survivrait encore des milliards d'années avant qu'un quelconque dommage ne survienne. En effet, dans ce type de modèles les dimensions supplémentaires sont très petites, à tel point que l'évolution du trou noir, due aux forces gravitationnelles intenses de la part des nouvelles dimensions, se termine alors que le trou noir grandissant a toujours une taille microscopique.

Si par contre il n'y a que cinq ou six dimensions de l'espace-temps pertinentes à l'échelle du LHC les interactions gravitationnelles des trous noirs sont suffisamment importantes pour que leur impact, s'ils existent, devrait être détectable dans l'Univers. Notamment, les rayons cosmiques de ultra haute énergie percutant les étoiles denses telles que les naines blanches ou les étoiles à neutrons devraient avoir produit en quantité des trous noirs durant leur durée de vie. De tels trous noirs, même s'ils étaient neutres, devraient avoir été arrêtés par la matière à l'intérieur de tels objets compacts et l'accrétion rapide due à la densité importante de ces objets et aux interactions gravitationnelles intenses de ces trous noirs aurait conduit à la destruction des naines blanches et des étoiles à neutrons sur des échelles de temps bien inférieures à leur durée de vie observée [2]. L'étape finale de leur destruction aurait évacué en explosion de très grandes quantités d'énergie et aurait donc été très clairement visible.

L'observation de naines blanches et d'étoiles à neutrons, qui devraient être détruites selon ce scénario, démontre bien que les rayons cosmiques ne produisent pas des trous noirs selon ce scénario et donc *a fortiori* cela ne sera pas le cas du LHC non plus.

Une conclusion s'impose donc : en plus du raisonnement très général excluant la possibilité que des mini trous noirs stables existent et qui prouve en particulier qu'ils ne peuvent qu'être neutres électriquement, nous avons aussi démontré qu'il y a des arguments empiriques très robustes qui soit démontrent leur inexistence, soit démontrent qu'il n'y a pas de conséquence catastrophique due à leur existence.

5 – Les strangelets

Le programme de recherche du LHC inclut des collisions entre des noyaux de plomb ultrarelativistes ainsi que d'autres noyaux (qui forment ainsi des ions). Le principal objectif scientifique du programme de recherche d'ions lourds est de produire de la matière aux température et densité les plus élevées atteignable en laboratoire afin d'étudier ses propriétés. On s'attend à produire en très petites quantités un plasma primordial du type de celui ayant baigné l'Univers âgé d'une microseconde.

La matière ordinaire dont nous sommes constitués ainsi que toute les objets visibles de l'Univers est

composée des deux quarks les plus légers : le quark up et le quark down. On a découvert dans les collisions avec les rayons cosmiques et dans les accélérateurs des quarks plus lourds et instables, dont le plus léger d'entre eux est le quark étrange. Depuis plusieurs décennies, nous produisons régulièrement dans les laboratoires des particules contenant des quarks étranges et leur temps de désintégration est de l'ordre de la nanoseconde ou plus rapide. De tels temps de vie sont caractéristiques de l'interaction faible qui est responsable de la radioactivité, le processus gouvernant leur désintégration. On a aussi observé des particules instables contenant deux ou trois quarks étranges.

On a observé que des particules contenant un quark étrange peuvent se lier aux noyaux et créer ce que l'on appelle les hypernoyaux, qui sont néanmoins instables et se désintègre rapidement sur des échelles de temps de l'ordre de la nanoseconde encore une fois. Indépendamment de l'existence de noyaux contenant deux particules composées au moins d'un quark étrange et se désintégrant rapidement [11], aucun noyau contenant plusieurs quarks étrange n'est connu à ce jour.

La matière étrange est un hypothétique état de la matière consistant en un grand nombre de quarks up, down et étrange en proportions à peu près égales. De tels hypothétiques amas de matière étrange de masse atomique comparable à celle de la matière ordinaire sont souvent appelés 'strangelets'. La plupart des études théoriques de ces strangelets montre que s'ils existent ils doivent être instables et se désintégrer en un temps comparable à celui des particules étranges, à savoir l'échelle de la nanoseconde. Dans ce cas la production de strangelets ne comporte aucun risque.

Néanmoins, des spéculations ont été faites quant à la possibilité que la matière étrange puisse avoir une masse inférieure à celle de la matière nucléaire ordinaire contenant le même nombre de quark up et down, mais uniquement pour des nombres atomiques supérieurs à 10. Si l'on prend ce cas très hypothétique, un tel strangelet serait stable.

D'autres hypothèses ont suggéré que des strangelets pourraient se mélanger à la matière ordinaire et catalyser sa transformation en matière étrange ce qui créerait des strangelets encore plus gros. C'est ce scénario qui sous-tend les inquiétudes à propos de la production de strangelets en accélérateur et qui a été discuté précédemment dans [8] et [1].

Il est communément admis qu'un strangelet stable devrait avoir une charge électrique positive ; dans ce cas, il serait repoussé par la matière nucléaire habituelle et donc dans l'incapacité de la convertir en matière étrange [8], voir [12]. Néanmoins, dans certains modèles étudiés, il est possible de trouver des strangelets chargés négativement mais qui sont instable car les états chargés positivement ont une énergie plus basse [13]. Ceci dit, il n'y a aucune preuve rigoureuse assurant que la charge électrique d'un strangelet stable soit positive, ni de preuve assurant qu'un strangelet chargé négativement ne soit pas métastable (c'est-à-dire avec une durée de vie longue). Ainsi, il est nécessaire d'envisager la possibilité de strangelet chargé négativement stable ou à longue durée de vie.

Avant le démarrage du collisionneur d'ions lourds relativistes de Brookhaven (RHIC) une étude avait été conduite [8] afin d'évaluer les scénarios hypothétiques de production de strangelets dans les collisions d'ions lourds. Des arguments supplémentaires ont été donnés dans [14] et une réévaluation d'une telle possibilité a été faite dans le rapport de 2003 du groupe d'étude de la sûreté du LHC [1]. Nous reprenons ici cette étude à la lumière des avancées récentes dans notre compréhension de la théorie et de l'expérience des collisions d'ions lourds. Cela permet de réactualiser et de renforcer les conclusions précédentes sur les scénarios basés sur la production de strangelets. On pourra trouver plus de détails quant à ces considérations dans l'addendum [15]⁴.

Le rapport de 2003 résumait l'état des recherches expérimentales directes et des spéculations théoriques sur les mécanismes possibles de production de strangelets [1]. Plus récemment, les recherches expérimentales au RHIC [16] ainsi que sur les rayons cosmiques [17] ont fourni des

4 cet addendum n'a pas encore été traduit en français (note du traducteur)

limites supérieures directes supplémentaires, ces expériences n'ayant pas trouvé de trace de l'existence de strangelets. Dans un futur proche, des données expérimentales supplémentaires peuvent être attendues en provenance de recherche dans des échantillons de sol lunaire ainsi que dans les détecteurs de particules des satellites [18].

En ce qui concerne la théorie, le rapport de 2003 a envisagé trois mécanismes pour la production de strangelets [1] :

1. un mécanisme thermodynamique [3] dans lequel les particules sont créées comme provenant d'un bain chaud à l'équilibre thermodynamique
2. un mécanisme de coalescence dans lequel les particules produites dans les collisions d'ions lourds se combinent ultérieurement pour former un strangelet
3. un mécanisme de distillation [19] qui a été proposé comme mécanisme spécifique de production de strangelets.

Selon ce dernier mécanisme, un plasma chaud quarks-gluons avec un nombre baryonique net élevé est produit dans les collisions d'ions lourds et devient riche en étrangeté en refroidissant par émission de particules contenant des antiquarks étranges principalement.

Les études détaillées des collisions au RHIC n'ont révélé aucune indication d'un mécanisme de coalescence anormale. En particulier, le taux de production de noyaux légers mesuré dans les collisions de noyaux d'or au RHIC [14] est cohérent avec les taux de coalescence utilisés dans le rapport de 2003 du groupe d'étude de la sûreté du LHC [1] pour exclure la production de strangelets.

Il existe de plus de nombreuses preuves expérimentales qui excluent le mécanisme de distillation. Pour que ce mécanisme soit opérationnel il faut que la matière produite ait une longue durée de vie et une densité nette de nucléons élevée. Cependant, les expériences au RHIC ont confirmé que la densité nette de nucléons est petite et diminue lorsque l'énergie des collisions augmente, ce qui était le comportement attendu ; de plus, le plasma produit dans la collision a une durée de vie très courte, entrant en expansion à environ la moitié de la vitesse de la lumière puis s'effondrant en 10^{-23} secondes [20]. Enfin, il n'a pas été observé de différences caractéristiques dans la production de particules comportant des quarks et des antiquarks étranges. Ainsi, un mécanisme de distillation capable de production des strangelets n'est pas fonctionnel dans les collisions d'ions lourds du RHIC ce qui a entraîné l'abandon de ce mécanisme en ce qui concerne le LHC, et d'un autre côté, comme résumé ci-dessous, les données du RHIC sont très largement en faveur des modèles décrivant la production de particules par émission provenant d'un bain chaud à très haute température [3].

Les strangelets, s'ils existent, seraient des états liés formés initialement avec un numéro atomique comparable à ceux des noyaux habituels et de même que ces noyaux un strangelet aurait un certain nombre baryonique. Nous savons, de par les principes de base de la mécanique quantique, que pour qu'un strangelet soit formé ses constituants doivent être assemblés en une configuration de plus basse énergie que son énergie caractéristique de liaison. Si ce n'était pas le cas les forces entre les divers constituants ne seraient pas suffisamment intenses pour qu'ils soient réunis ensemble et le strangelet ne se formerait pas. Ceci implique que la formation d'un strangelet est moins probable si ses constituants ont initialement une énergie cinétique importante, précisément s'ils sortent d'un système très chaud. Ainsi, la production de strangelets est moins favorisée dans un système très chaud.

L'énergie nécessaire pour détruire un strangelet est similaire à celle nécessaire pour détruire un noyau habituel, qui est de l'ordre d'un à quelques million d'électron-volts. Des énergies similaires seraient atteintes dans un bain chaud d'une température allant de dix à quelques dizaines de milliards de degrés celsius [3]. Les principes de base de la thermodynamique impliquent que dans un tel bain, la plupart des strangelets seraient ainsi dissociés en les particules étranges connues qui se

désintègrent dans les nanosecondes suivantes. C'est pour cette raison que la probabilité de production de strangelets dans les collisions d'ions lourds relativistes peut être comparée à la probabilité de la production d'un cube de glace dans un four.

L'analogie entre les collisions d'ions lourds et un four à particules s'appuie sur beaucoup de mesures précises de la production différents types de particules contenant un, deux ou trois quarks étranges dans les collisions en accélérateur. La figure 2 ci-dessous montre une telle mesure : le taux relatif auquel les particules sont produites dans les collisions d'ions lourds au RHIC s'accorde avec un calcul théorique basé sur un four d'une température d'environ mille-six-cents milliards de degrés celsius [3]. Toutes les proportions de particules sont bien décrites, des particules rares comme les baryons Omega contenant trois quark étranges incluses. Si l'on compare aux particules les plus abondantes comme les pions, l'Omega est produit au % en proportion (voir figure 2).

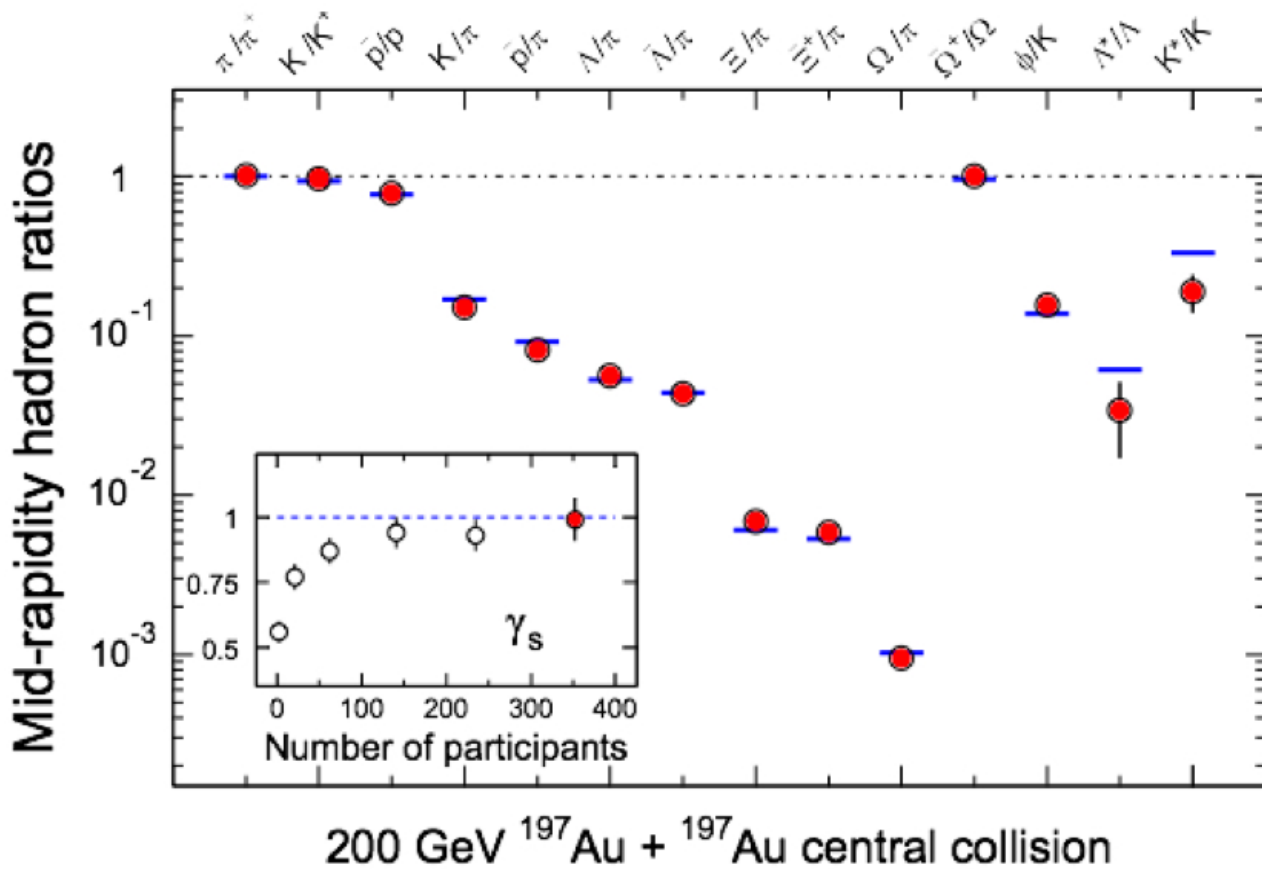


Figure 2 : proportion relative de différentes particules produites au RHIC. Toutes les mesures (points rouges) s'accordent très bien avec un modèle thermique très simple (lignes bleues) où la température effective est d'environ 1600 milliards de degrés en accord avec les calculs théoriques et une densité nette de quarks inférieure à celle des expériences précédentes à plus basse énergie. Le graphe à l'intérieur montre que la fraction de quarks étranges a saturé à la même densité que celle des quarks up et down. Ces deux graphes sont extraits de [3].

Le nombre total de collisions d'ions lourds produites au LHC sera comparable au nombre total de collisions d'ions lourds du RHIC. Le LHC sera un four au moins aussi chaud que le RHIC au sens suivant : les systèmes produits dans les collisions d'ions lourds au LHC auront une température effective similaire à celle des particules produites au RHIC. Ceci constitue un argument pour dire que la production de strangelets au LHC n'est pas plus probable qu'au RHIC.

Un autre argument pointant dans la même direction concerne la densité nette de nucléons, mesurée par le nombre baryonique. Elle sera plus basse au LHC qu'au RHIC, car le système produit au LHC dans les collisions d'ions lourds se répartit sur un spectre plus large de rapidité et que le même nombre baryonique total se répartit sur un volume plus important. Cet effet a déjà été observé au

RHIC en comparaison avec les expériences à plus basse énergie le précédant, et cette tendance continuera avec le LHC [3]. Comme la production de strangelets demande la formation d'un nombre baryonique, ceci montre que la production de strangelets est moins probable au LHC qu'au RHIC.

Nous pouvons donc conclure sur des bases physiques que les collisions d'ions lourds au LHC ont moins de chance de produire des strangelets que les collisions d'ions lourds à plus basse énergie déjà effectuées au RHIC ces dernières années, tout comme la production de strangelets au RHIC était moins probable que dans les expériences précédentes à plus basse énergie conduites dans les années 80 et 90 [8].

Après s'être assuré que la production de strangelets au LHC est moins probable que dans les machines précédentes de plus basse énergie, nous présentons maintenant les arguments démontrant que la production de strangelets dans les expériences de plus basse énergie précédentes ne causèrent aucun danger concevable.

Le document [8] a montré que l'existence continue de la Lune suite aux bombardements par des rayons cosmiques assure que les collisions d'ions lourds ne sont source d'aucun danger via la production de strangelets. En effet une partie importante des rayons cosmiques est constituée d'ions lourds tout comme la surface de la Lune. Cette dernière n'étant pas protégée par une atmosphère à la différence des planètes comme la Terre, les rayons cosmiques la percutant ont produit des collisions d'ions lourds depuis des milliards d'années, à des énergies au moins comparables à celles que l'homme peut produire dans ses expériences, si ce n'est supérieures.

La conclusion obtenue dans [8] a nécessité deux hypothèses tout à fait acceptables.

Premièrement, les rayons cosmiques de haute énergie contenant beaucoup de noyaux de fer qui sont aussi prépondérants sur la Lune, on a assumé que les conditions des collisions fer-fer sont comparables à celles obtenues dans les collisions d'ions d'or ou de plomb étudiées précédemment en laboratoire.

Deuxièmement, il a été nécessaire de faire quelques hypothèses sur la distribution des vitesses des strangelets produits car les expériences au LHC et au RHIC se déroulent dans le référentiel du centre de masse alors que dans les collisions des rayons cosmiques ce référentiel a une vitesse élevée.

Nous rappelons que des strangelets dont la vitesse est élevée pourraient très bien être détruits par la matière lunaire avant de devenir suffisamment lent pour s'agglomérer avec.

Depuis la publication de [8], le programme d'ions lourds du RHIC a aussi étudié la collision d'ions cuivre qui sont comparables aux collisions fer-fer. Les proportions des particules produites dans ces collisions sont décrites par le même modèle thermodynamique que celui du four à particules qui rend compte de façon satisfaisante des collisions or-or. De plus, les distributions de vitesses de toutes les espèces de particules observées au RHIC sont similaires ou plus larges à la distribution utilisée dans [8]. Ces observations sont en faveur des hypothèses faites dans [8], ce qui rend ses conclusions encore plus solides.

On peut donner un argument sur la sûreté totalement indépendant de l'argument ci-dessus et ne faisant pas d'hypothèses sur la distribution des vitesses d'hypothétiques strangelets [21]. On connaît le taux des collisions entre les rayons cosmiques et les ions lourds dans l'espace interstellaire ; si ces collisions produisent des strangelets, ces derniers se seraient agglomérés en étoiles et ainsi toute coalescence à grande échelle auraient donné des explosions d'étoiles, ce qui n'a pas été observé. On fera néanmoins remarquer que cet argument complémentaire nécessite l'hypothèse que tout strangelet produit ne se désintègre pas moins vite que le temps de formation d'une étoile.

On conclut cette partie en rappelant ses arguments principaux. La bonne description des collisions

d'ions lourds comme un four de particules, avec une densité nette de baryons qui décroît quand l'énergie augmente, implique que la production de strangelets au LHC est moins probable qu'aux machines de plus basse énergie [15]. Les arguments donnés précédemment pour la sûreté des collisions à plus basse énergie sont renforcés par les observations effectuées au RHIC. On notera de plus que l'analogie entre le LHC et un four de particules chaudes sera étudié dès les premiers jours de collisions d'ions lourds au LHC. Mille collisions devraient suffire pour effectuer un premier test du modèle thermodynamique les décrivant comme un four de particules. Elles seront parmi les premières analyses de données du programme d'ions lourds du LHC et fourniront immédiatement une confirmation expérimentale des hypothèses de base sous-tendant l'argumentation sur la sûreté.

6 – Conclusion

L'étude des développements théoriques et expérimentaux effectués depuis la publication du dernier rapport de sûreté confirme ses conclusions. Il n'y a aucune base sous-tendant des craintes sur les conséquences qu'auraient la création de nouvelles particules ou de nouveaux états de la matière au LHC.

En ce qui concerne les phénomènes tels que la formation de bulles de vide par transition de phase ou la production de monopôles magnétiques, déjà exclus par le rapport précédent [1], il n'y a pas eu de développements supplémentaires remettant en cause ces conclusions solides.

En ce qui concerne les trous noirs neutres et stables, en plus du fait que tous les modèles théoriques développés excluent leur existence, soit la stabilité des objets astronomiques démontrent leur absence, soit leur taux d'accrétion est trop faible pour être la cause d'effets macroscopiques, se faisant sur des échelles de temps bien plus grandes que la durée de vie naturelle du système solaire. Les arguments présentés dans le rapport précédent démontrant l'impossibilité de la production de strangelets au LHC sont confirmés et renforcés par l'analyse des données du RHIC.

On a considéré tous les scénarios spéculatifs proposés pour la créations de nouvelles particules ou états de la matière qui soulèvent actuellement des questions de sûreté. Notre méthodologie étant basée sur un raisonnement empirique basé sur les observations expérimentales, elle serait applicable à tout phénomène exotique qui pourraient soulever des craintes dans le futur.

Bibliographie

[1] J.P. Blaizot et al., Report of the LHC safety study group, CERN-2003-001.

[2] S.B. Giddings et M.L. Mangano, CERN-PH-TH/2008-025, arXiv:0806.3381 [hep-ph], disponible aussi à l'adresse http://cern.ch/lsag/CERN-PH-TH_2008-025.pdf.

[3] P. Braun-Munzinger, K. Redlich et J. Stachel, dans Quark-Gluon Plasma, eds. R.C. Hwa et X.-N. Wang, (World Scientific Publishing, Singapore, 2003), disponible aussi sur arXiv:nucl-th/0304013.

[4] Lors de la comparaison du LHC avec les rayons cosmiques, ici et partout ailleurs dans le document, nous supposons valide la relativité restreinte. Cette théorie a été testée avec précision dans les laboratoires pour des particules à des vitesses similaires à celles de n'importe quelle nouvelle particule exotique pouvant être produite au LHC, et il n'existe aucune évidence prouvant que la relativité restreinte n'est pas applicable aux rayons cosmiques d'énergies comparables à celles du LHC.

- [5] Pierre Auger Collaboration (J. Abraham et al.), Science 318, 938 (2007); Pierre Auger Collaboration (A.A. Watson et al.), Nucl. Instrum. Meth. A588, 221 (2008) ; HiRes Collaboration (R. Abbasi et al.), Phys. Rev. Lett. 100, 101101 (2008) ; R.U. Abbasi et al. arXiv:0804.0382 [astro-ph] ; D.R. Bergman et J.W. Belz, J.Phys., G34, R359 (2007).
- [6] Cette estimation pourrait être réduite d'un facteur à peu près égal à A si tous les rayons cosmiques d'ultra haute énergie étaient des nucléons de numéro atomique A , car le spectre d'un rayon cosmique suit une loi en $1/E^3$ à haute énergie comme montré dans la figure 1.
- [7] P. Hut et M.J. Rees, Print 83-0042 (IAS, Princeton) (1983); P. Hut, Nucl. Phys. A418, 301C (1984).
- [8] W. Busza et al., Rev. Mod. Phys. 72, 1125 (2000).
- [9] S.W. Hawking, Commun. Math. Phys. 43, 199 (1975).
- [10] G. 't Hooft, Int. J. Mod. Phys. A 11, 4623 (1996), disponible aussi sur arXiv:gr-qc/9607022.
- [11] H. Takahashi et al., Phys. Rev. Lett. 87, 212502 (2001) et Nucl. Phys. A721, 951c (2003).
- [12] Il a été spéculé que si un mécanisme inconnu pouvait transporter les strangelets produits en accélérateurs vers l'intérieur du Soleil alors des strangelets de charge positive pourraient aussi être produits à l'intérieur du Soleil : A. Kent, hep-ph/0009130v2.
- [13] X.J. Wen, Int. J. Mod. Phys. A22, 1649 (2007), disponible aussi sur arXiv:hep-ph/0612253.
- [14] Haidong Liu, Int. J. Mod. Phys. E16, 3280 (2008).
- [15] LSAG (J. Ellis, G. Giudice, M. Mangano, I. Tkachev et U. Wiedemann), Review of the Safety of LHC Collisions: Addendum on Strangelets, http://cern.ch/lzag/LSAG-Report_add.pdf .
- [16] B.I. Abelev et al. [STAR Collaboration], Phys. Rev. C76, 011901 (2007).
- [17] SLIM Collaboration, S. Cecchini et al., arXiv:0805.1797.
- [18] J. Madsen, astro-ph/0612740.
- [19] C. Greiner, P. Koch et H. Stoecker, Phys. Rev. Lett. 58, 1825 (1987).
- [20] The RHIC White Papers, Nucl. Phys. A757, 1 (2005).
- [21] A. Dar, A. De Rujula, U. Heinz, Phys. Lett. B470, 142 (1999).