

LE LHC, le nouvel accélérateur du CERN.

Catherine Vander Velde, mai 2009.

I. Le LHC

Le sigle LHC veut dire « Large Hadron Collider », ce qui traduit en français donne « Le grand collisionneur de Hadrons ». En effet, cette machine fera entrer en collision frontale deux faisceaux de particules subatomiques de la famille des hadrons, des protons ou des ions de plomb. Il est ici seulement question des collisions de protons.

Au LHC, les protons seront accélérés jusqu'à une énergie cinétique colossale, jamais atteinte dans un accélérateur auparavant, une énergie cinétique de 7 téraélectronvolts (TeV), c'est-à-dire, mille milliards de fois l'énergie d'un électron accéléré par une différence de potentiel de un volt, soit sept fois plus que l'énergie atteinte par l'accélérateur le plus puissant fonctionnant actuellement, le Tevatron, aux USA. Cela permettra de reproduire les conditions d'énergie qui prévalaient dans l'univers un dixième de milliardième de secondes après sa naissance, qu'on appelle le big-bang. A cette énergie, les protons du LHC auront une vitesse qui vaudra 99,9999991 % de celle de la lumière, qui vaut 300.000 km/s. De ces collisions extrêmement violentes jailliront des centaines de particules de toutes sortes. En analysant les caractéristiques de ces particules, des équipes de physiciens du monde entier, espèrent apporter des réponses aux questions qu'ils se posent sur la structure microscopique de la matière, sur la naissance de notre univers et son évolution.

Pour pouvoir atteindre une telle énergie le LHC a une circonférence de 27 km; c'est le plus grand collisionneur existant au monde. Il est enfoui 100 m sous terre, dans le sous-sol de la campagne genevoise, au laboratoire européen du CERN, à cheval sur la frontière franco-suisse (fig.1.). Pour étudier les collisions, quatre détecteurs ont été installés le long de l'accélérateur : ATLAS, CMS, auquel participe la Belgique, ALICE et LHC-B.

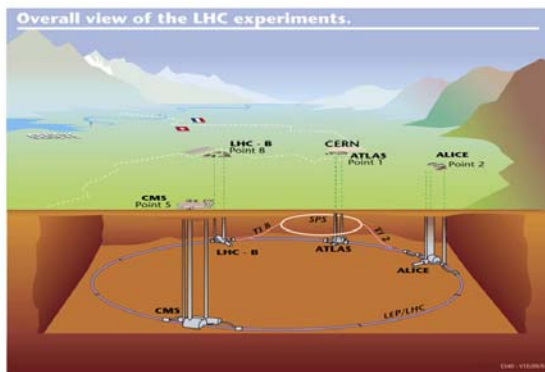


fig.1.: schéma des accélérateurs du CERN et des expériences du LHC.



fig.2. : vue du tunnel du LHC et de ses aimants.

Dans le tunnel souterrain du LHC, les protons feront 11.000 tours de 27 km par seconde. Ils seront accélérés par des champs électriques très puissants tandis que des milliers d'aimants, tels que celui de la photo (fig.2.), les guideront le long de la circonférence. Pour forcer les protons à suivre la courbure du tunnel, les aimants doivent atteindre un champ magnétique de plus de 8 teslas, soit 200.000 fois le champ magnétique terrestre. Pour cela, il faut faire appel à la technique de la supraconductivité qui consiste à supprimer la résistance des conducteurs au passage du courant électrique, en les refroidissant à une température proche du zéro absolu. Ces aimants seront donc plongés dans un bain de 120 tonnes d'hélium superfluide à 1,9 K, soit -271 °C. Le système cryogénique du LHC est chargé de produire 32.000 litres d'hélium liquide par heure. Les deux faisceaux de protons circuleront en sens inverse dans deux tubes distincts. Pour éviter que les protons ne soient déviés de leur trajectoire par des molécules de gaz, il faut faire régner un vide de 10^{-13} atmosphères à l'intérieur des tubes; c'est un vide plus poussé que sur la lune.

II. L'expérience CMS et la contribution belge

Pour étudier la multitude de particules qui sont émises lors des collisions entre protons, la région d'interactions est entourée d'un détecteur de forme cylindrique, comme le détecteur CMS schématisé sur la figure 3. Ce détecteur est constitué de différentes couches, représentées dans des couleurs différentes, qui ont des fonctions spécifiques. Les particules émises dans les collisions, qui se produisent au centre du détecteur, traversent successivement ces différentes couches.

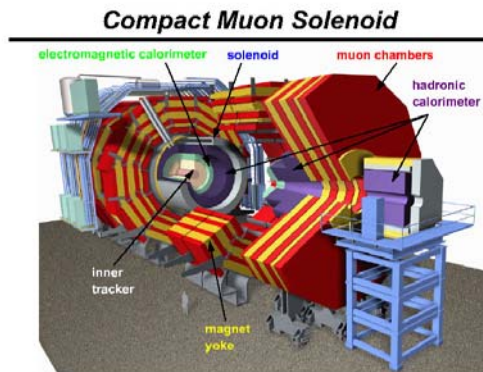


fig.3.: schéma du détecteur CMS.



fig.4.: le détecteur CMS en cours d'assemblage.

CMS veut dire "Compact Muon Solenoid". En fait, il n'est compact que relativement à ATLAS, le plus grand des quatre détecteurs, car il atteint tout de même la taille d'un immeuble de quatre étages; il fait 15 m de diamètre, 22 m de long et pèse 12.500 T. Il a été assemblé en surface (fig.4.), pendant que la caverne souterraine dans laquelle se trouve actuellement était préparée. La figure 5 montre une photo prise pendant la descente vers cette caverne, située 100 m sous terre, d'une des 9 tranches du détecteur CMS.

Un détecteur d'une telle dimension et d'une telle complexité ne peut être financé et réalisé que par une très grande collaboration. La collaboration CMS comporte plus de 2000 scientifiques, physiciens et ingénieurs, répartis dans 38 pays et 175 institutions. Outre la participation de la plupart des pays européens, il y a une importante participation des USA et de la Russie mais aussi quelques pays d'Asie. La Belgique représente 2,5 % de la collaboration en nombre de physiciens.



fig.5.: descente d'une des 9 tranches de CMS dans la caverne de l'expérience, située 100 m sous terre.

Les particules sont beaucoup trop petites pour être vues, même avec les microscopes électroniques les plus puissants. Elles sont donc détectées de manière indirecte par les perturbations qu'elles laissent dans la matière des détecteurs. Un peu comme un avion très haut dans le ciel : seule la trace qu'il laisse derrière lui peut être vue. Les perturbations engendrées dans les détecteurs sont de différentes nature suivant le type de détecteur mais dans les détecteurs modernes, comme ceux du LHC, elles conduisent toutes à la production de signaux électroniques qui sont triés et enregistrés sur un support informatique.

La Belgique a contribué à la conception et à la construction du détecteur de traces de CMS, la partie centrale, constituée de quelque 15.000 détecteurs au silicium; ceux-ci mesurent les coordonnées des points d'impact des particules chargées qui le traversent. C'est le plus grand détecteur au silicium jamais construit, plus grand d'un ordre de grandeur. Depuis 1993 des scientifiques belges contribuent à l'expérience CMS. Outre leur participation à la construction du détecteur, ils travaillent à la préparation des analyses de physique. Actuellement, ils sont plus de 70 répartis dans 6 universités : Anvers, UCL, Gand, Mons, ULB et VUB. Vu l'ampleur de la tâche, c'est en collaboration avec d'autres pays qu'ils ont construit le traceur de CM. Environ 1.800 détecteurs au silicium ont été assemblés à Bruxelles, sur un robot qui permettait d'atteindre une précision d'assemblage de quelques dizaines de millièmes de millimètres, et de les aligner à mieux d'un demi degré (voir fig.6.). A Bruxelles et à l'UCL, des détecteurs étaient fixés et connectés sur des structures en formes de pétales (voir fig.7) qui ont été ensuite montées sur des roues, au CERN et à Aachen (voir fig. 8.).

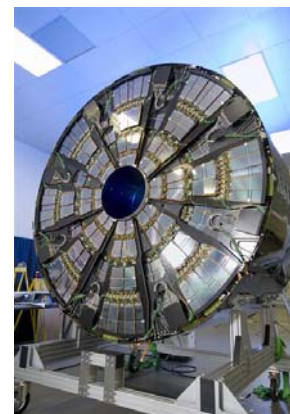


fig. 6, 7 et 8 : le détecteur de traces de CMS, partiellement assemblé en Belgique.

III. Le GRID

Au LHC, les paquets de protons se croiseront dans les quatre détecteurs 40 millions de fois par seconde. A chaque croisement, il y aura une quinzaine de collisions superposées, chacune avec une centaine de particules émises. Les détecteurs enregistreront quelque 50.000 canaux chaque fois. Une telle quantité d'informations est impossible à enregistrer dans sa totalité. Aussi y aura-t-il une sélection automatique des interactions les plus intéressantes qui se fera de sorte à n'enregistrer qu'une centaine de croisements par seconde. Malgré cela, 15 millions de gigaoctets de données seront enregistrés chaque année au LHC. S'il fallait les graver sur des CD, cela donnerait 20 millions de CD par an, soit une tour de 20 km de haut. La puissance de calcul qui sera nécessaire pour analyser ces données correspond à 100.000 des processeurs de PC actuels les plus rapides. Aucun centre de calcul, même celui du CERN, n'est capable à lui seul, de fournir de telles ressources.

La solution qui a été trouvée à ce défi est de réaliser un réseau distribué de ressources de calcul, une grille informatique ou "GRID" en anglais. Le GRID mets en commun les unités de stockage de données et les unités de calcul d'un grand nombre d'institutions, réparties dans le monde entier. Chacun, où qu'il soit, peut calculer sur un processeur ou lire des données, qui sont peut-être à l'autre bout de la planète. Le GRID développé pour le LHC, est déjà utilisé dans une moindre mesure dans d'autres domaines et il risque de connaître un développement similaire au Web, lui aussi inventé au CERN, pour les besoins des physiciens. Il y a deux centres GRID pour le LHC en Belgique, l'un à l'UCL et l'autre au centre de calcul de l'ULB-VUB.

IV. Les objectifs du LHC

Les objectifs du LHC s'inscrivent dans ceux du CERN qui est un laboratoire de recherche fondamentale dédié principalement à la physique des particules élémentaires. C'est un nom moderne pour une aspiration vieille comme le monde : comprendre ce que nous sommes et d'où nous venons. Plus précisément, l'objectif des chercheurs engagés dans ce domaine, est d'arriver un jour à connaître la structure microscopique de la matière dans ses constituants les plus ténus et de comprendre sous l'effet de quelles forces ces particules dites élémentaires s'assemblent pour former la matière et le monde macroscopique qui nous entoure.

Il se fait que les réponses à ces questions ont des implications sur notre compréhension de l'évolution de l'univers et qu'il y a un lien étroit entre physique des particules et cosmologie. En effet, on sait depuis la 1^{ère} moitié du 20^è siècle, que notre Univers est en expansion, les galaxies se fuient comme si l'Univers était le résultat d'une gigantesque explosion qu'on appelle le big-bang. Se pose alors la question de savoir ce qui s'est passé au moment du big-bang et juste après. Qu'y avait-il alors dans l'univers lorsqu'il était confiné en un minuscule volume ? Comment sont apparus les atomes et les molécules, comment se sont formées les étoiles et les galaxies ? Autant de questions qui sont restées plusieurs décennies sans réponse et auxquelles la physique des particules commence à pouvoir apporter un début de réponse. En effet, on peut montrer que l'expansion de l'univers correspond à une diminution de son énergie ; pendant que les galaxies se fuient mutuellement, l'univers se refroidit. L'instant du big-bang et ceux qui ont suivi immédiatement correspondent donc à un moment d'énergie extrêmement intense. Les accélérateurs de particules actuels recréent les conditions d'énergie qui devaient exister dans l'univers moins d'un milliardième de seconde après sa création. Ce sont donc les résultats obtenus lors de ces expériences de physique des particules qui ont

permis aux cosmologistes d'imaginer ce qui a pu se passer dans l'univers à ce moment et de se faire une idée de ce qu'a dû être son évolution.

Quelles sont les principales questions auxquelles on espère apporter une réponse avec les résultats du LHC ? Tout d'abord, d'où vient la masse des particules et pourquoi de telles différences entre les plus légères et les plus lourdes d'entre elles? En 1964, un physicien écossais, Peter HIGGS, et deux belges, François ENGLERT et Robert BROUT, ont proposé simultanément et indépendamment, un mécanisme pour expliquer l'apparition des masses. Ce mécanisme prévoit l'existence d'une nouvelle particule, qu'il faudrait appeler le boson de Brout-Englert-Higg; il est malheureusement plus connu sous le nom de boson de Higgs. Personne n'a encore observé cette nouvelle particule et sa découverte est un des objectifs majeurs du LHC.

Il serait trop long de développer dans ces pages d'autres questions qui seront adressées au LHC. En voici énumérées quelques unes.

- Pourquoi à un moment de l'évolution de l'Univers, est apparu un léger excès de matière sur l'antimatière, ce qui explique que notre monde de matière a pu se créer ?
- Y aurait-il dans l'univers d'autres dimensions spatiales, cachées, que les trois que nous connaissons ?
- Quelle est la nature de cette matière inconnue, qu'on appelle matière noire, qui envahit l'Univers ?

V. La vision actuelle du monde microscopique

Depuis la fin du 19^e siècle, nous savons que toute matière, inerte ou vivante, est constituée de molécules, elles-mêmes faites d'atomes. Il existe un peu plus d'une centaine d'atomes différents qui sont classés dans le fameux tableau de Mendeleïev. Dans la première moitié du 20^e siècle, nous avons appris que l'atome n'est pas insécable. Il comporte un noyau et des électrons qui gravitent autour (fig.9.). Quant au noyau, il a lui-même une structure, il est composé de neutrons et de protons. On sait depuis quelques dizaines d'années que si les électrons eux semblent bien insécables, par contre les protons et les neutrons sont constitués de particules encore plus petites, les quarks. Ceux-ci sont de deux sortes que l'on a appelées « up » et « down ». Le proton est constitué de deux quarks up et d'un quark down, tandis que le neutron est constitué de deux quarks down et d'un quark up.

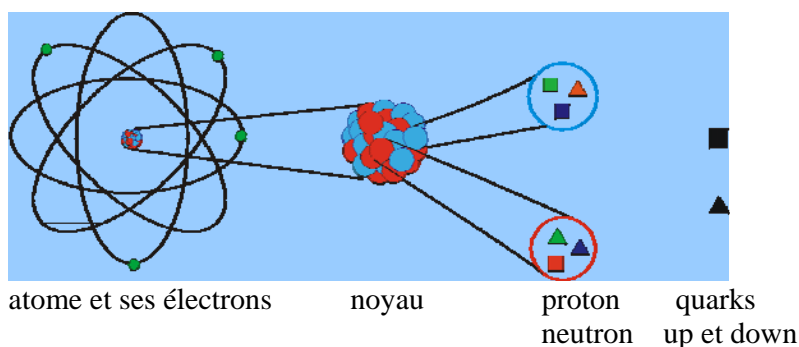


fig.9.: composition de la matière.

V.1. Les particules élémentaires de matière

Pour rendre compte de la matière stable qui nous entoure, les objets usuels aussi bien que les corps célestes ou la matière vivante, il faut faire appel à trois constituants élémentaires, les quarks up et down qui constituent les protons et les neutrons des noyaux atomiques, et les électrons qui gravitent autour. Mais ces trois constituants élémentaires ne sont pas les seuls constituants élémentaires. En effet, à côté de la matière stable, il existe des particules plus massives, très instables, qui se désintègrent et disparaissent à peine créées. Elles sont créées dans les interactions à haute énergie qui se produisent continuellement dans le cosmos, que nous recréons parfois avec les accélérateurs de particules, et qui ont été créées au moment du big-bang. Pour rendre compte de la multitude de ces particules éphémères, il en existe plus de cent, il faut compléter la famille des quarks par quatre quarks plus massifs, qu'on a appelés étrange, charmé, bottom et top. Quant à l'électron, il fait partie d'une autre famille, celle des leptons. Il existe deux autres leptons chargés qui lui ressemblent, mais plus massifs, le muon et le tau, et à chacun de ces leptons chargés est associé une particule neutre de masse très faible, le neutrino (fig. 10).

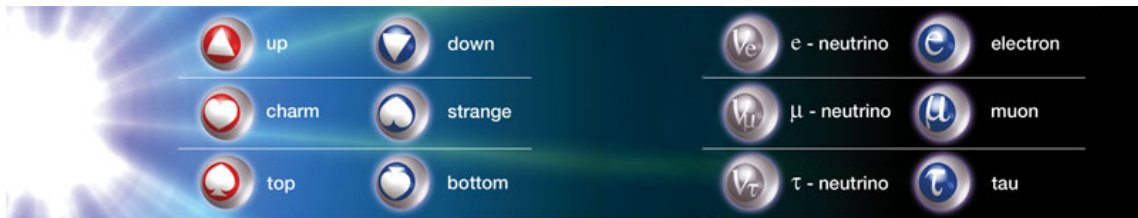


fig.10.: les douze particules élémentaires qui constituent la matière.

A ces douze particules élémentaires de matière, six quarks et six leptons, il faut ajouter les douze antiparticules qui leur sont associées. En effet, à toute particule correspond une antiparticule ; au proton est associé l'antiproton, au neutron est associé l'antineutron. Une antiparticule est une particule comme toutes les autres, dont la plupart des propriétés sont identiques à celles de la particule ; particules et antiparticules associées ont notamment la même masse. Par contre certaines propriétés sont inversées, notamment la charge électrique : l'antiproton est un proton de charge négative. L'antiélectron est un électron positif; on l'appelle positon ou positron.

V.2. Les forces fondamentales

Nous connaissons maintenant les constituants élémentaires de la matière, les quarks et les leptons et leurs antiparticules. Reste à savoir pourquoi ces particules s'assemblent pour former l'univers que nous observons. On sait, depuis Newton, pourquoi les planètes gravitent autour du soleil ; c'est parce qu'il existe une force d'attraction, de portée infinie, dite force gravitationnelle, qui s'exerce entre les masses et donc entre le soleil et ses planètes. Dans le cas des atomes aussi, la cause de la liaison des électrons négatifs aux noyaux positifs, est connue depuis longtemps ; c'est la force électromagnétique qui est attractive entre deux charges de signe opposé et répulsive entre deux charges de même signe. Mais qu'est-ce qui empêche le noyau d'exploser sous l'effet de cette même force électromagnétique qui fait se repousser les différents protons des noyaux, tous positifs ? C'est parce qu'il existe une autre force, plus forte que la force électromagnétique, qui maintient protons et neutrons. On l'appelle la force forte. C'est elle aussi qui lie les quarks à l'intérieur du proton ou du neutron. Il existe une quatrième force, la force faible, qui est responsable des transformations des particules les unes dans les autres. C'est celle qui intervient notamment dans la radioactivité

β . Un neutron d'un noyau se transforme en un proton ; cette transformation est accompagnée de l'émission d'un électron et d'un antineutrino.

Les physiciens ont tenté de décrire ces forces au moyen de théories qui expliquent les interactions par l'échange de particules. Pour la force électromagnétique, c'est un photon qui est échangé. La figure 11 schématise l'interaction d'un positron et d'un électron, qui échangent un photon. Dans le cas de l'interaction faible, ce sont des particules massives qu'on appelle boson W ou boson Z^0 qui sont échangées, dans celui des interactions fortes, elles opèrent par l'échange de particules qu'on appelle gluons. Quant à l'interaction gravitationnelle, les physiciens ne sont pas encore parvenus à en rendre compte par une théorie similaire. C'est une des questions qui reste ouverte.

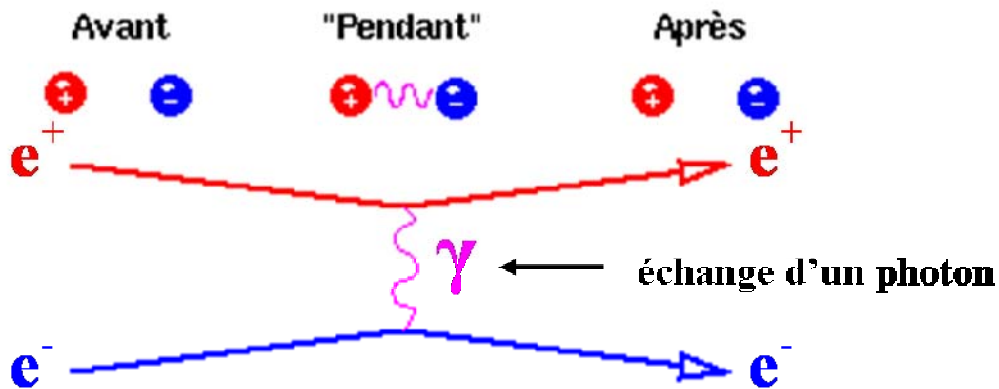


fig.11.: schéma d'une interaction entre un positron et un électron par l'échange d'un photon.

VI. Où en est le projet LHC ?

Le détecteur CMS est prêt. Pendant l'été et l'automne 2008, il a pris des données, non pas avec des collisions de protons, car l'accélérateur ne fonctionne pas encore, mais avec le rayonnement cosmique. Nous sommes continuellement baignés par des particules qui proviennent de l'espace, principalement du soleil mais aussi des étoiles. Un certain nombre de muons parviennent 100 m sous terre et leur trajectoire a pu être mesurée et reconstruite avec le détecteur CMS (voir fig. 12.). Trois cents millions de ces muons ont été enregistrés. Ils permettent de tester, calibrer et aligner les différentes parties du détecteur.

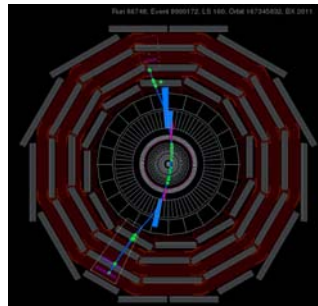


fig. 12. : un muon cosmique reconstruit par le détecteur CMS.

Des protons ont déjà été injectés dans l'accélérateur et ont effectué un tour complet dans les deux sens, au début septembre. C'était un grand succès car c'est une prouesse technologique de guider des paquets de protons d'une dizaine de micromètres, le long d'une circonférence de

27 km. Malheureusement, le 19 septembre, s'est produit un incident qui a conduit à l'arrêt du LHC pour de nombreux mois, afin de permettre les réparations nécessaires et d'installer des dispositifs qui devraient permettre d'éviter ce genre d'incident à l'avenir. L'accélérateur devrait redémarrer à l'automne 2009 et, deux ou trois ans plus tard, notre vision des mondes microscopique et macroscopique, être clarifiée et/ou amener de nouvelles interrogations.