

Le CERN-LHC en 2016

Académie des Sciences d'Outre-Mer

(J.N. Capdevielle, Section 4, Sciences Physiques, Naturelles, Biologiques et applications)

Ma première invitation au CERN date de 1973 ; elle fût précédée par quelques échanges avec Francis PERRIN, Pierre AUGER et Louis LEPRINCE- RINGUET; précurseurs de la création du CERN, proposée par Louis De BROGLIE (1949, conférence de Lausanne). Depuis la cafeteria (toujours proche de l'accueil CERN entre ALICE et ATLAS et de la frontière franco-suisse, en pointillé à droite sur la photo prise depuis les hauteurs du pays de Gex), nous pouvons contempler les Alpes et partager la vie des chercheurs.

Ce 16 juin 2016, notre visite débute à 15h pour accéder à ATLAS et aux laboratoires les plus proches, à droite de l'anneau du SPS (Super Proton Synchrotron) : mis en service en 1976 Opposant faisceaux de protons et antiprotons, le SPS, en mode collisionneur pulsé, a atteint une énergie de collision équivalente à un demi-million de GeV pour les protons des rayons cosmiques..



Une courte projection bien choisie, commentée par Mr PELLEQUER nous permet d'observer la construction et la mise au point du LHC (Grand Collisionneur d'Hadrons). Le LHC vient de résoudre un défi de la physique du 21^{ème} Siècle décrivant des interactions nucléaires à des

énergies jamais atteintes par l'homme ; il a démontré (4 juillet 2012) le bien fondé de 50 ans de théorie de la chromodynamique quantique relativiste en découvrant le boson de Higg (en cohérence avec le mécanisme de Brout, Englert et Higgs envisagé dès 1963) Une importante participation française du CEA et du CNRS a participé en première ligne à cette avancée dans ATLAS (avec Annecy, Clermont-Ferrand, Grenoble, Marseille, Orsay, Paris et Saclay) et dans CMS (avec Lyon, Palaiseau, Saclay et Strasbourg).

L'énergie actuelle communiquée aux protons des deux faisceaux antagonistes donne lieu à des collisions d'énergie $\sqrt{s} = 13$ TeV tout près de la limite attendue de l'anneau d'environ 27 km. Cette énergie limite de l'accélérateur le plus puissant du monde sera sous peu de $\sqrt{s} = 14$ TeV.¹ L'énergie de la collision frontale de 2 protons correspond à une énergie de 10^{17} eV dans une collision sur cible fixe. Cette conversion qui est une exploitation admirable de la Relativité Restreinte permet de comparer facilement les collisions naturelles des rayons cosmiques et les interactions des synchrotrons fabriqués par l'homme.

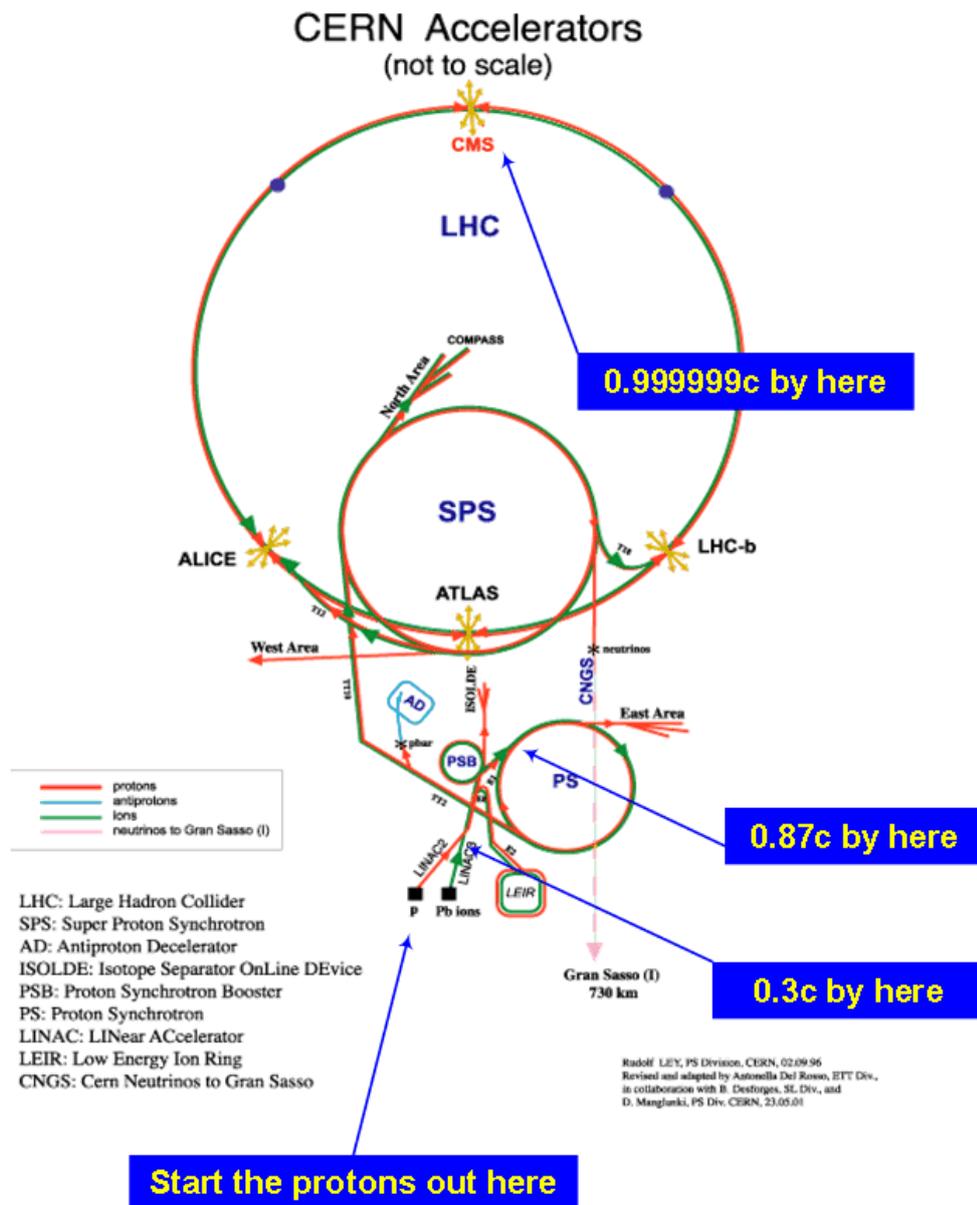
L'anneau de 27 Km presque circulaire est accessible en 8 points différents à une profondeur de l'ordre de 100 m. Quatre laboratoires jalonnent le circuit séparés de 7 km ; ATLAS(A Toroïdal Lhc ApparatuS) et ALICE (Solenoid Compact for Muons) aux points 1 et 2 se trouvent entre Meyrin et St Genis Pouilly ; au-delà, CMS au-dessous de Cessy et LHCb au-dessous de Ferney-Voltaire respectivement aux point 5 et 7 remplissent aussi les principales missions scientifiques, tandis que les autres points assurent le bon fonctionnement du synchrotron géant.

Le « détecteur » ATLAS pèse 7000 Tonnes et plus de 3000 scientifiques appartenant à 38 pays et 174 instituts analysent le comportement des particules en collision dans un espace long de 46m, haut et large de 25m. Comme pour ATLAS, mais avec des instruments différents, CMS peut étudier aussi bien la physique des particules (collisions ultra-relativistes avec tous les échanges matière-énergie et annihilations) que commencer de nouvelles recherches dans le domaine de la matière noire et de l'énergie sombre (cette dernière remplit de plus en plus notre univers)

Les faisceaux interceptés par ATLAS et CMS sont constitués de « trains » de paquets, contenant chacun environ 100 milliards de protons, accélérés dans l'anneau de 27 km à une vitesse proche de celle de la lumière. A raison de 2244 paquets par faisceau, espacés de 25 nanosecondes, ATLAS et CMS ont analysé en une année 400 millions de millions de collisions proton-proton. Plus discret et moins énergique, un faisceau s'échappe du SPS produisant sur une cible fixe des mésons chargés (une majorité de pions) s'enfonçant dans un tunnel de plus d'un km orienté Sud-Est ; désintégrés en muons et en neutrinos dans le tunnel, ces pions sont à l'origine d'un faisceau de neutrinos recueilli par des murs de briques à

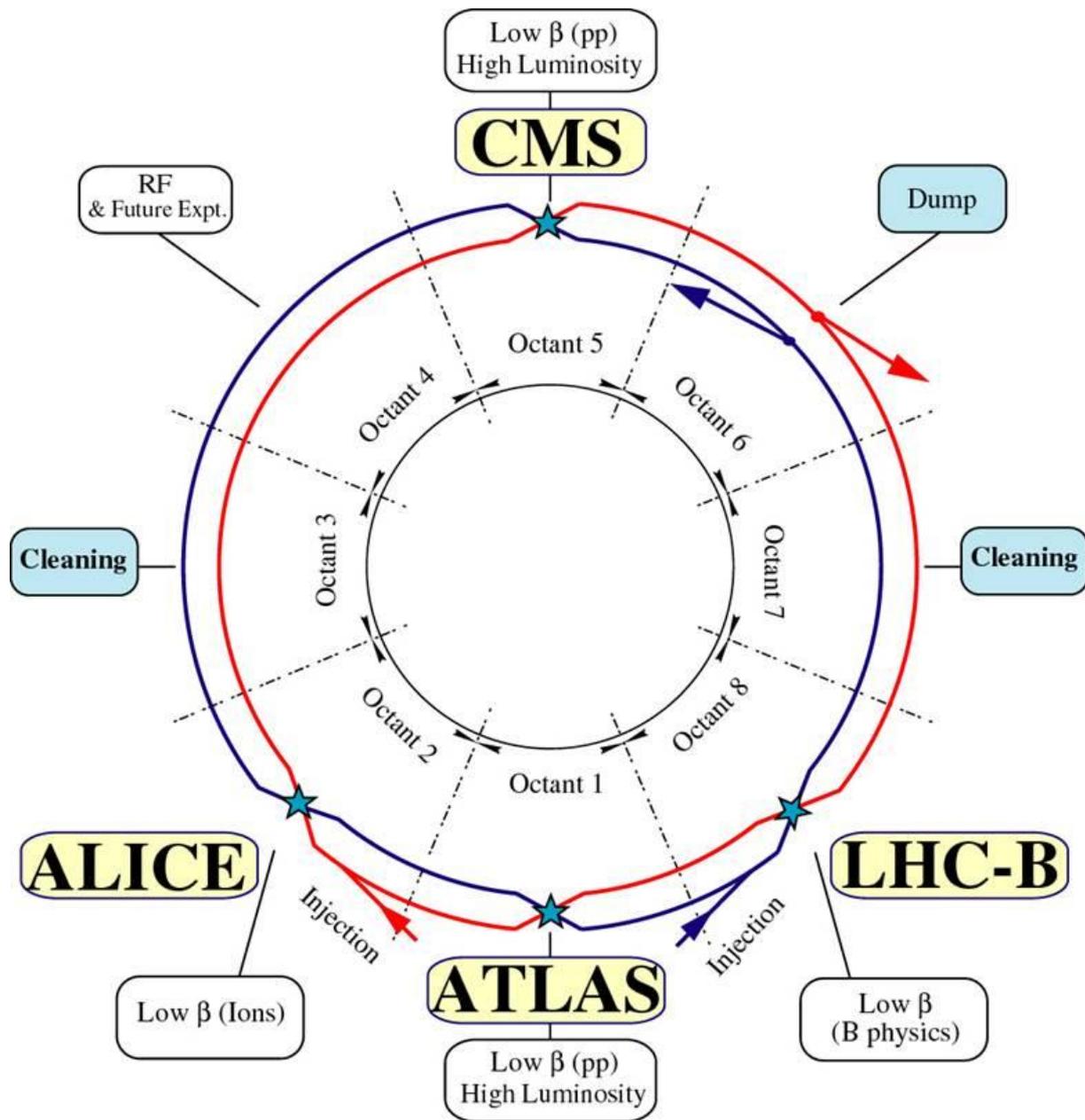
¹ Cette énergie limite de l'accélérateur le plus puissant du monde sera sous peu de $\sqrt{s} = 14$ TeV. (1 TeV correspond à 1000 GeV ou encore 1000 milliards d'eV , l'électron-Volt étant l'énergie accélérant un électron avec une tension de 1 Volt). Suivant la relativité restreinte ces énergies dans le « système du centre de masse » des collisionneurs correspondent à une énergie plus élevée que l'addition de l'énergie portée par deux protons antagonistes à faible vitesse. Ainsi 14 TeV (somme des énergies $\sqrt{s} = 7 + 7$ TeV portées par chaque proton) correspondent à 10^{17} eV (100000 TeV dans le « système du laboratoire ») pour un proton des rayons cosmiques entrant en collision avec un proton des constituants de l'air de la stratosphère(azote, oxygène, argon...) : il en arrive plusieurs milliers par jour sur Paris..., chaque gerbe cosmique déposant quelques dizaines de millions d'électrons, muons dans un disque dont le rayon correspond à la longueur des Champs Elysées.

émulsion sous le tunnel autoroutier italien du Grand Sasso . L'expérience OPERA vérifie ainsi l'oscillation du neutrino, changeant d'état pendant ce parcours souterrain de 700 km...



Ce schéma d'accélérateurs superposés reflète une dizaine d'années de travaux pour communiquer aux particules chargées des énergies de 7 TeV (il n'en manque que 7% à l'heure actuelle) et quelques décimales sont gagnées dans l'approche de la vitesse de la lumière. L'énergie totale de la collision de deux protons antagonistes équivaut à une énergie de 10^{17} eV pour un seul proton heurtant un proton au repos. Les rayons cosmiques les plus énergiques (et les plus rares) atteignent une énergie de 10^{20} eV grâce à des expériences géantes pour détecter les gerbes cosmiques sur des dizaines de milliers de Km² (AUGER - Argentine, Telescope Array -USA) et peut être bientôt grâce à JEM-EUSO à partir de l'ISS en détectant les émissions lumineuses suivant le passage de ces gerbes dans l'atmosphère.

Le schéma ci-dessous permet de situer les principales stations de l'anneau de 27Km du LHC.



Après la célébration du 60ème Anniversaire du CERN en 2014, un nouveau Directeur du CERN; Fabiola GIANOTTI, responsable d'ATLAS a succédé le 1^{er} Janvier 2016 à Rolf HEUER que nous avons entrevu au restaurant.

Dans la tradition de courtoisie du CERN nous avons bénéficié d'un bus pour franchir à plusieurs reprises la frontière franco-suisse et visiter en premier les installations de surface d'ATLAS (l'approche du faisceau et la présence dans le souterrain sont strictement défendues pour des raisons de sécurité). Divisés en deux groupes, nous avons pu bénéficier de l'accompagnement des ingénieurs et techniciens pour examiner des éléments lourds en réparation ou en développement. Les questions n'ont pas manqué avec des curiosités concernant les 80 km de câble super-conducteur en 8 enroulements, la création d'un champ magnétique de 0.5 Tesla, les systèmes toroïdaux, le calorimètre électromagnétique constitué d'argon liquide cryogénique

Après la visite d'ATLAS, le bus nous reconduit à l'entrée du CERN et un jeune chercheur nous fait partager son enthousiasme en relatant l'histoire du CERN suivant les progrès des cyclotrons, accélérateurs linéaires, synchrotrons. Le CERN est ainsi riche de prouesses technologiques avec des records d'énergie grâce au PS (proton-synchrotron 1959), aux ISR (International Storage Rings 1971). Cette tradition de records a persévéré avec le SPS (collisionneur super proton synchrotron avec des faisceaux proton-antiprotons 1983), le LEP (1989, Large Electron Positron Collider accélérant des électrons) et dernièrement le LHC (Large Hadron Collider en 2009). Les questions fusent et le jeune chercheur nous confie ses travaux sur l'antimatière. la maîtrise de l'anti-hydrogène, les pièges de Penning stockant les antiprotons.

Ces travaux plus confidentiels se poursuivent au LHCb (*Large Hadron Collider beauty experiment*) à Ferney-Voltaire.

A environ 100m de profondeur, près du château de Voltaire, ce laboratoire se concentre sur la relation matière-antimatière apportant une réponse partielle à la définition du mot matière de Voltaire dans son dictionnaire philosophique, rédigé sur le même site...en 1759

L'étude de l'asymétrie matière - antimatière en traquant spécifiquement les particules contenant un quark *b*, appelé "beauté" vise un objectif ultime celui de mieux comprendre pourquoi l'Univers qui nous est accessible est constitué exclusivement de matière, alors qu'à sa naissance matière et antimatière étaient présentes à parts égales

La proportion d'antiprotons qui nous proviennent de l'Univers est infime, mais dans les collisions relativistes proton-proton à haute énergie créées par notre synchrotron les paires proton-antiproton sont créées en parfaite symétrie, aussi bien dans les collisions des rayons cosmiques dans notre atmosphère que dans les cascades de particules secondaires au LHC.

Contrairement à Atlas et CMS, LHCb est un outil spécialisé, destiné à réaliser la meilleure détection possible des particules « belles » (contenant un quark *b*) et de leurs produits de désintégration. Ces particules étant émises, lors des collisions des faisceaux, préférentiellement dans des directions voisines du faisceau, le détecteur LHCb est spécialement conçu pour les observer à « petit angle ». Il est disposé autour du tube à vide de l'accélérateur, dans une seule direction par rapport au croisement des faisceaux. LHCb peut ainsi comparer la matière et l'antimatière avec une précision inégalée.

La 15^{ème} conférence sur les interactions nucléaires de très haute énergie (ISVHECRI) à Moscou en août 2016, suivant la 15^{ème} ISVHECRI au CERN en 2014, révèle que le détecteur MoEDAL (Monopole-détecteurs exotiques au LHCb) a circonscrit plus précisément le territoire où pourrait se trouver une particule hypothétique, le monopôle magnétique. ... sans oublier l'échec de travaux de ce type menés en 1985. Tous les grands progrès de la Science sont dus à des travaux persévérants le long de pistes inédites avec des alternances de succès et de revers.

Il est intéressant à cet égard de consulter le dictionnaire philosophique de Voltaire définissant en 5 pages le mot « matière » et nous livrons à la méditation de nos confrères l'extrait ci-dessous.

Matière : ..des professeurs et surtout des écoliers savent parfaitement tout cela ; et quand ils ont répété que la matière est étendue et divisible, ils croient avoir tout dit ; mais quand ils sont priés de dire ce que c'est que cette chose étendue, ils sont embarrassés.

Cela est composé de parties disent-ils, et ces parties de quoi sont-elles composées ? Les éléments de ces parties sont-ils divisibles? Alors 'ils sont muets ou ils parlent beaucoup ce qui est également suspect. Cet être inconnu qu'on nomme matière, est-il éternel? Toute l'Antiquité l'a cru....



La Matière ; Dictionnaire Philosophique Portatif Londres imprimé clandestinement par Grasset à Genève Juillet 1764 confié à Mme du Deffand en 1759 (extrait du Que Sais Je ? Les Rayons Cosmiques N°729 (1984) p.121) auteur J.N.C. et Collection Prestige de l'Académie Française, Mélanges philosophiques, littéraires et historiques)

Remerciements au CERN : En 2002 et 2014, j'ai bénéficié des moyens du CERN pour organiser deux ISVHECRI à Genève en 2002 et 2014, comme du soutien du CERN pour présider à Paris l'ISVHECRI de 2008 ; comme tous les physiciens des rayons cosmiques et de l'IN2P3 j'utilise parfois l'infrastructure informatique du CERN. J'ai aussi profité de documents du CERN accessibles aux chercheurs de tous les continents pour glaner les informations les plus récentes et les résumer dans cet aperçu à l'attention de mes confrères de la section 4 (Sciences physiques, naturelles, biologiques et leurs applications) de l'Académie des Sciences d'Outre-Mer

Jean-Noël CAPDEVIELLE