

VOYAGE AU CŒUR DE LA MATIERE

Les accélérateurs de particules du CERN

Jean-Louis BOURGUIGNON

Cet exposé est essentiellement un compte-rendu d'une visite au CERN en 1993, expliquant la recherche fondamentale qui y est menée, en particulier la création de matière à partir d'énergie à l'aide d'accélérateurs de particules et de collisionneurs.

Jean-Louis Bourguignon détaille le fonctionnement et les équipements du CERN, ainsi que les détecteurs utilisés pour analyser les collisions. Puis, il aborde les résultats des découvertes, comme en 1983, les bosons W et Z, porteurs de l'interaction faible, et les découvertes confirmant le modèle standard des particules, basé sur les quarks et les leptons.

Les accélérateurs recréent les conditions de l'Univers quelques fractions de seconde après le Big Bang. Ainsi, l'astrophysique rejoint la physique des particules pour explorer les origines du cosmos.



SOCIÉTÉ
d'ASTRONOMIE
de NANTES

Prix : X,00 €

Société Scientifique d'Éducation Populaire agricole Jeunesse et Sports
35, boulevard Louis Millet - 44300 NANTES - Tél. 02 40 68 91 20 - Fax 02 40 93 81 23
Internet : www.san-fr.com - E-mail : san@san-fr.com



N° 14

VOYAGE AU CŒUR DE LA MATIERE

Les accélérateurs de particules du CERN

Jean-Louis BOURGUIGNON



Les Cahiers de la SAN

VOYAGE AU CŒUR DE LA MATIÈRE

Les accélérateurs de particules du CERN

Jean-Louis BOURGUIGNON

Qualité auteur

Édition 2011

La Société d'Astronomie de Nantes

Résolument tournée vers le grand public, la SAN vous propose de découvrir l'astronomie ou d'approfondir vos connaissances dans ce domaine de multiples façons :

- Assister aux exposés d'astronomie présentés lors des réunions du vendredi soir, ouvertes à tous les adhérents, au local de la Société à partir de 20h30.
- Consulter ou emprunter l'un des mille ouvrages que possède le fonds bibliothécaire.
- Participer aux observations de découverte ou de perfectionnement. Vous pouvez également emprunter un instrument.
- Assister aux conférences au cours desquelles des astronomes et astrophysiciens de renom viennent présenter les derniers acquis de leurs travaux.
- Solliciter la SAN pour animer des actions pédagogiques préparées à l'attention de public scolaire ou adulte.
- Visiter les expositions auxquelles la SAN participe régulièrement.
- Apporter votre contribution à la réalisation de travaux pratiques d'astronomie tels que la mesure de la masse de Jupiter ou l'évaluation des altitudes des reliefs lunaires.
- Réfléchir et débattre des grands thèmes de la physique, de l'astrophysique et de la science en général au sein d'un groupe de réflexion théorique.
- Enfin, l'astronomie nécessitant des connaissances et des compétences multiples (en optique, mécanique, électronique, etc.), offrir un peu de votre temps pour la conception ou à la réalisation de projets astronomiques.

Pour participer à ces activités, il vous suffit de devenir adhérent.

La Société d'Astronomie de Nantes est une association fondée en 1971 et régie par la loi de 1901.

Les « **Cahiers de la SAN** » sont édités par la Société d'Astronomie de Nantes,
Société Scientifique d'Éducation Populaire agréée Jeunesse et Sports.

35, boulevard Louis-Millet
44300 NANTES

Tél. 02 40 68 91 20 - Fax 02 40 93 81 23 - E-mail : san@san-fr.com

© Toute reproduction intégrale ou partielle faite par quelque procédé que ce soit, sans l'autorisation de la Société d'Astronomie de Nantes, est interdite.

VOYAGE AU CŒUR DE LA MATIÈRE

Les accélérateurs de particules du CERN

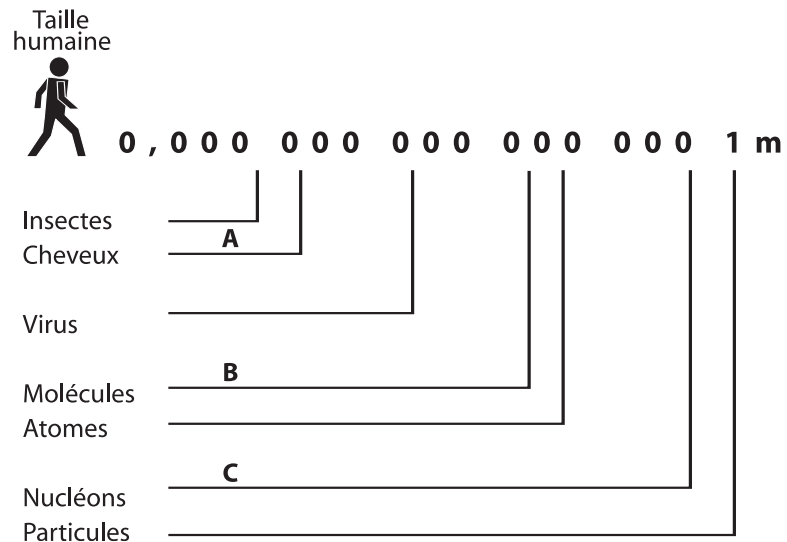
Cet exposé est en quelque sorte le compte-rendu d'un voyage réalisé au C.E.R.N. (CENTRE EUROPÉEN DE RECHERCHE NUCLÉAIRE), à Genève, en janvier 1993.

« Un astrophysicien doit avant tout être un physicien de l'atome »

C'est l'astronome français Paul COUTEAU qui a placé cette phrase dans les premières pages de son livre *« Le grand escalier »*. Nous pouvons l'utiliser aussi pour servir de prologue à ce qui suit : elle nous montre déjà qu'il y a un lien solide entre cette branche de l'Astronomie qu'est l'Astrophysique et la Physique de l'atome ou des particules.

L'exposé comprend trois parties :

- Le domaine des particules ;
- La recherche, c'est à dire le CERN et les moyens mis en œuvre ;
- Quelques résultats : exemples de découvertes.



A : jusqu'au millimètre et au dixième de millimètre on utilise les microscopes optiques classiques ;

B : à la taille des virus (ces « microbes de microbes ») et des grosses molécules, il faut des microscopes électroniques où les rayons lumineux sont remplacés par des faisceaux d'électrons ;

C : dans ces dimensions bien plus réduites on utilise des « *accélérateurs de particules* » et des « *collisionneurs* ».

Plus on explore « petit », plus il faut une « lumière » de longueur d'onde réduite (ou une « particule sonde ») et, donc, une grande énergie.

« *La recherche de l'élémentarité est une démarche sans fin* »

Un des buts des physiciens serait d'arriver, pour les distances, au milliardième de milliardième de millimètres.

Bibliographie

- Notes prises au cours de la visite du CERN le 30 janvier 1993
- Le CERN (document CERN)
- La danse de l'Univers (document CERN)
- How energy becomes matter (document CERN)
- Les Secrets de la Matière, numéro spécial *Science et Avenir*.
- Le fascinant Univers des particules élémentaires, *Cahiers de Science et Vie*.

Conclusion

Si l'on prend l'histoire de la naissance de l'Univers (il y a environ 13,7 milliards d'années), c'est à dire le *Big Bang*, on apprend, par exemple, que :

- entre 10^{-43} seconde et 10^{-35} seconde se seraient formés les quarks, les leptons, les gluons. L'interaction forte apparaît ;
- entre 10^{-35} seconde et 10^{-10} seconde : apparition des bosons et des photons, les interactions électromagnétique et faible se différencient ;
- entre 10^{-10} seconde et 100 secondes, protons et neutrons se constituent.
- etc.

Comment les physiciens sont-ils parvenus à une description aussi précise de la naissance du Monde ?

En conjuguant les données de l'Astrophysique avec les découvertes de la Physique des particules.

Le CERN

C'est le « *Centre européen pour la Recherche Nucléaire* » (à l'origine « *Conseil* » européen). Il y a maintenant une tendance pour que le nom devienne « *Laboratoire Européen pour la Physique des Particules* »

Il est situé sur la frontière franco-suisse, à l'ouest de Genève et est financé principalement par une quinzaine d'états d'Europe Occidentale, plus la Pologne. (Le financement dépend du PNB de chaque pays, ce qui fait de l'Allemagne le plus gros contributeur).

Il y a environ 3 000 employés de beaucoup de qualifications et de compétences diverses.

La raison d'être du CERN est la *recherche fondamentale*, sans but commercial ni militaire (d'où la tendance à transformer l'appellation CERN en LEPP). Mais il y a quand même de l'innovation technologique et des retombées importantes dans d'autres domaines : scanners pour diagnostic médical, marqueurs radioactifs, datation par le carbone radioactif...

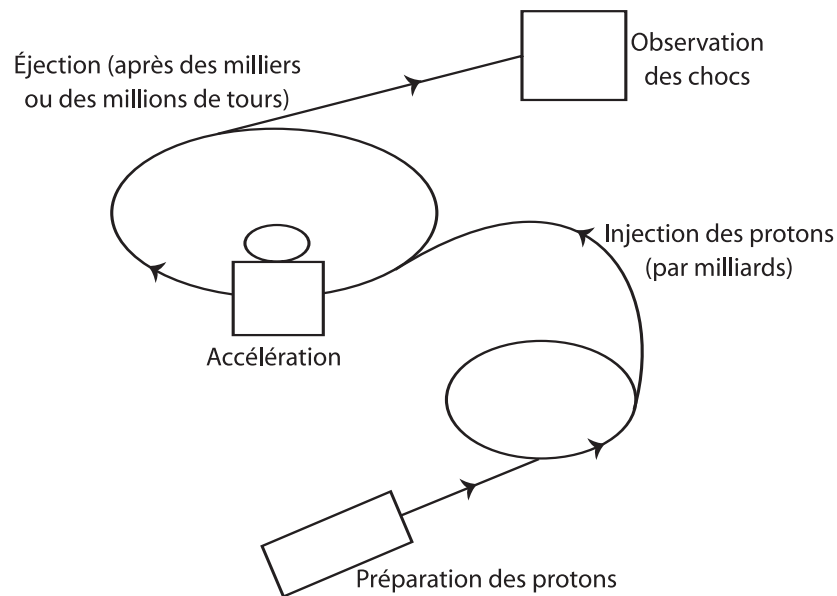
La différence fondamentale entre les centrales nucléaires et le CERN est que dans les premières on produit de l'énergie à partir de certaines substances (uranium, plutonium), tandis qu'au CERN on produit de la matière (création de particules) à partir d'énergie.

Mais la masse des particules créées est si réduite qu'en 25 ans d'expérimentation, et avec beaucoup d'énergie, il n'a pas été produit plus d'un milligramme de matière !

Les *outils* du CERN sont essentiellement des « *accélérateurs de particules* », puis des « *collisionneurs* » qui ont pris leur suite.

Principe d'un accélérateur de particules

Un accélérateur de particules est une machine qui communique des vitesses très grandes à des milliards de protons ou d'électrons. Une fois animés d'une grande énergie, ceux-ci servent à bombarder des cibles fixes ou bien d'autres particules venant en sens inverse.



Le *Synchro-cyclotron* est destiné à accélérer les protons jusqu'à une énergie de 600 MeV (rappelons que l'électron-volt est une unité d'énergie extrêmement petite et qui vaut $1,6 \times 10^{-19}$ joule).

Le *Synchrotron à protons* (P.S.) permet d'atteindre 28 GeV (c.a.d. 28 000 MeV).

Cet appareil sert maintenant de premier apporteur d'énergie à des particules diverses (protons, antiprotons, électrons, positons) avant *injection* dans des machines plus puissantes.

leptons et les quarks :

- les *leptons* sont des particules « légères » : électrons, neutrinos...
- les *quarks* forment les nucléons : protons et neutrons (d'une manière plus générale, les particules formées de quarks sont des *hadrons*).

Résultats et exemples de découvertes

Les particules sont régies par trois des quatre forces fondamentales de la Nature :

- la force électromagnétique : elle agit sur les électrons et assure la stabilité des atomes et des molécules ;
- la force nucléaire faible : c'est la radioactivité B (A et B son regroupées en force électrofaible) ;
- la force nucléaire forte : elle agit sur les constituants des noyaux atomiques et cimente les quarks au sein des nucléons (protons et neutrons).

Remarque : complétant ces trois forces, la gravitation est par excellence l'interaction de la matière à grande échelle. Elle régit toute la Mécanique Céleste mais ses effets ne sont pas visibles à l'échelle microscopique et subatomique.

En 1981 des protons et des antiprotons sont entrés en collision dans le SPS et en 1983 les *bosons* W⁺, W⁻ et Z⁰, qui sont les *porteurs* de la force nucléaire faible, ont été découverts par Carlo RUBBIA et Simon VAN DER MEER (Prix Nobel de Physique en 1984).

Pour arriver à cette découverte, il a fallu créer des *antiprotons* (par bombardement d'une cible en tungstène par des protons). Mais comme ces antiprotons ont tendance à s'écarter et à heurter les parois puis à s'annihiler, Simon VAN DER MEER a inventé un procédé appelé *refroidissement stochastique* sans lequel la découverte de Carlo RUBBIA n'aurait pas pu avoir lieu.

Il y eu des centaines de particules différentes découvertes. Citons en quelques unes :

- les particules porteuses des trois forces fondamentales déjà évoquées.
 - *photons* pour la force électromagnétique ;
 - *bosons* pour la force nucléaire faible ;
 - *gluons* pour la force nucléaire forte.
 mais ces particules ne sont *que* des particules de liaison.
- Les constituants fondamentaux de la matière sont les

Jusqu'à maintenant, les accélérateurs servaient à *bombarder* des cibles fixes pour que l'on puisse étudier les fragments de l'impact. Mais le rendement est très faible : 10% environ, à cause du *recul* de la cible (qui absorbe 90% de l'énergie). D'où l'idée de faire se rencontrer, *collisionner*, deux paquets de particules arrivant en sens inverse l'un de l'autre.

Mais pour que deux faisceaux circulent en sens inverse, il faut des particules de masses identiques et de charges électriques opposées.

On arrive au *Super-Synchrotron à protons* (S.P.S.) qui a commencé à fonctionner en 1976 avec des faisceaux de 400, puis 450 GeV. Il consiste en un anneau de 7 kilomètres de circonférence situé à environ 40 mètres sous terre, davantage sous la France que sous la Suisse, les protons traversant et retraversant la frontière à chaque tour. Toutes les 7 secondes on injecte 10 000 milliards de protons qui font 150 000 tours (soit environ 10⁶ km) et atteignent presque la vitesse de la lumière.

Attention ! À ces vitesses, la masse des particules n'est plus la masse possédée au repos, mais celle indiquée par la *relativité* !)

Enfin, ce qui est maintenant le principal outil d'expérimentation, le L.E.P. : « *Large Electrons Positons collider* » ou "Laboratoire Électrons-Positons ». Il a été mis en service en 1989 et permet de communiquer aux électrons des énergies atteignant 8 Tev (« téra » électron-volts, c'est à dire 8.000 Gev).

Le LEP est un tunnel de 27 kilomètres de circonférence situé entre l'aéroport de Genève et les contreforts du Jura, entre 50 et 150 mètres de profondeur.

Il est constitué d'abord par un tube en alliage d'aluminium sous un vide particulièrement poussé (la valeur de ce vide est le chiffre qui m'a le plus surpris au cours de la visite : il serait de 10⁻⁹ à 10⁻¹¹ atmosphère (les particules peuvent parcourir une distance équivalente à 1/3 d'année lumière avant de rencontrer une quelconque molécule de gaz égarée).

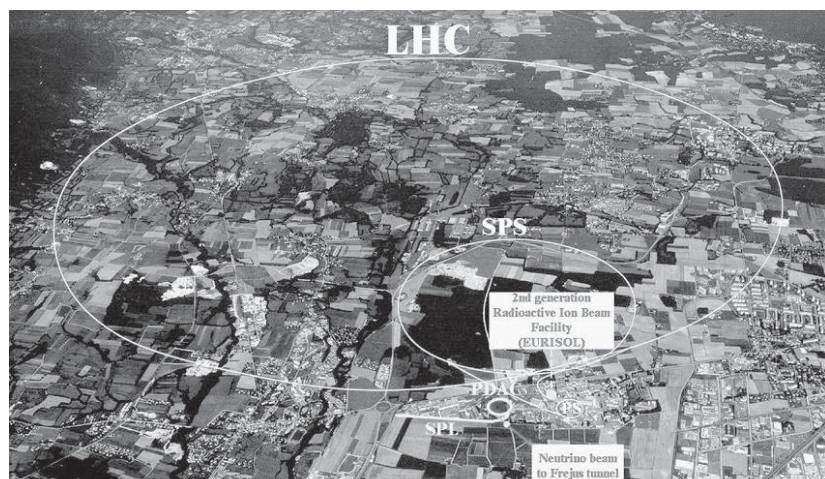
Des milliers de gros électro-aimants maintiennent les faisceaux dans l'axe du tube.

Il y a principalement trois types d'appareils disposés sur la boucle :

- des aimants dipolaires (environ 3 000) pour obliger les électrons à suivre la courbure de cette très grande boucle (action en direction horizontale) ;
- des aimants quadripolaires pour *centrer* les faisceaux de particules avant et après les accélérations (action de concentricité) ;
- des cavités radio-fréquence pour accélérer les paquets de particules : c'est une électronique très complexe dont certaines des pièces maîtresses sont des *klystrons* (oscillateurs de haute fréquence). Il y a une synchronisation énorme sur le passage des particules : dans chacun de ces accélérateurs une onde électrique progresse et les particules *s'accrochent* à l'onde comme des surfers sur une vague ;
- enfin de très nombreux capteurs pour mesurer la position et la vitesse des particules.

En tout, le LEP totalise 60 000 tonnes d'équipements.

Les collisions ont lieu dans quatre zones d'expérimentation où se trouvent d'énormes détecteurs pour enregistrer et analyser les résultats.



Le CERN à Genève

Les détecteurs

Au cours des collisions, des millions de particules entrent en contact à chaque seconde et chaque collision peut produire des centaines de fragments. Il faut déceler les particules secondaires, jalonner leurs parcours et déterminer leurs caractéristiques. Par ailleurs, il faut agir en quelques microsecondes pour déterminer les trajectoires, les énergies et les masses.

Il y a les *chambres à bulles* (qui avaient pris la suite des *chambres à brouillard* de WILSON), puis les *chambres à fils* (inventés par Georges CHARPAK en 1968, perfectionnées en 1970 et qui lui valurent le prix Nobel de Physique en 1992, soit plus de 20 ans après sa découverte !).

Il y a aussi des *scintillateurs*, des *chambres à étincelles*, des *tubes à dérive*, des *calorimètres électromagnétiques* (pour les électrons et les photons) et des *calorimètres hadroniques* (pour les protons et d'autres particules comme les *pions* et les *kaons*). Ces machines font parfois de 6 à 7 mètres de diamètre et autant de long.

Les scintillateurs sont faits de matière pastique transparente contenant des liquides organiques sensibles. Au passage d'une particule chargée, des photons sont libérés et se propagent jusqu'à des photocathodes qui les transforment en signal électrique que l'on amplifie. Ce détecteur sert au comptage.

Les calorimètres servent en fait à mesurer l'énergie des particules.

Les grands détecteurs, situés aux points d'expérimentation, sont un ensemble de tous ces détecteurs spécifiques. Le montage est adapté au type d'expérience réalisée.