

# Voyage au LHC du CERN

## Association d'astronomie VEGA avec

## Société Astronomique de France

Bernard LELARD

Genève 16 17 octobre 2013

Donc nous allons aujourd'hui à **Genève**, au CERN voir ATLAS un des 2 détecteurs qui a révélé le 14 juin 2012 à 19 H 02 des courbes statistiques dont les pics d'énergie trahissaient à 99,99.999% le passage furtif du fameux boson de Higgs. Yves Sirois nous disait il y a moins d'un mois que les journalistes de la Tribune de Genève remarquèrent vite qu'à partir de cette date il n'y avait plus une seule bouteille de champagne en vente à Genève et dans les villes françaises des environs. Nous avons nous mêmes remarqué en 2010 que le haut des armoires des salles de contrôle du LHC supportait beaucoup de bouteilles vides, collection que nous avons nous aussi enrichi et que nous enrichirons encore demain avec les bouteilles que nous transportons afin que les chercheurs boivent à la santé de nos associations. Il faut dire que la preuve de l'existence du boson couronnait une fantastique aventure de la physique qui progressa tout au long du 20 ième siècle et offrit au monde : télévision, GPS, internet, scanner, IRM, Smartphones. **Et pourquoi le boson de Higgs nous intéresse-t-il? Parce que nous sommes astronomes et cosmologistes et que ce boson explique l'origine de la lumière et de la matière. Rien que ça.**

Mardi 8 octobre 13 H 40 annonce du **Prix Nobel 2013 à François Englert & Peter Higgs**

*"la découverte théorique d'un mécanisme qui contribue à notre compréhension de l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a récemment été confirmée par les expérience ATLAS et CMS au LHC du CERN"*

*Car c'est au boson de Higgs que l'on doit que notre univers ne soit pas resté une soupe informe. "Sans lui, nous n'existerions pas",* ainsi s'exprimait **Olga Botner** du jury du comité Nobel dans son communiqué. La particule ainsi piégée au Cern *a existé pendant les premières fractions de seconde* après le Big-Bang soit lorsque *l'Univers était âgé de  $10^{-10}$  s et la température frôlait les  $10^{15}$  degrés.* A cette température ce qui existait ne pouvait être que symétrique. Il y aura **toute une mathématique pour expliquer comment briser cette symétrie** en conservant les propriétés physiques (**théorie de jauge**). Donc Higgs va **briser cette symétrie**. Avant l'existence du boson l'U était constitué de photons et de quarks. On ne sait pas **d'où il vient**, pas plus que les quarks ou les électrons ou les photons originaux. Avant le travail d'Higgs, Brout, Englert, Guralnik, Hagen et Kibble la physique nous disait **de quoi est faite la matière d'aujourd'hui**, mais nous ne comprenions pas comment elle est apparue. Higgs a été le plus loin dans les calculs car il est **le seul** à avoir décrit le boson donc a orienté les recherches. Comment Higgs et les autres se sont intéressés à ce problème de naissance de matière? Il faut savoir que l'U est constitué de matière et de 4 forces (provenant mathématiquement de champs) qui la mettent en mouvement et tiennent sa consistance. Au

début il ne pouvait y avoir qu'une **seule force** et c'est pour aboutir à cette **force primordiale** que les chercheurs se sont penchés sur la question. "Avant d'entrer en interaction avec ce champ qui, mathématiquement aura la forme d'un chapeau mexicain, toutes les **particules sont dépourvues de masse et se déplacent à la vitesse de la lumière**. Mais en traversant ce champ d'énergie elles se chargent d'une masse car la particularité du **boson de Higgs** est de relier les composantes gauche et droite de l'électron". Nous reviendrons là dessus.

Cette interaction fondamentale et les expériences du CERN permettent de recréer les conditions de l'origine de la matière, c'est-à-dire à **un millième de milliardième de seconde** après le BB et donc de fabriquer artificiellement un boson de H pour voir s'il a vraiment existé. Ce qui se passe dans les détecteurs du LHC a eu lieu à  $10^{-10}$  s. Ce que le satellite PLANCK a mesuré est à  $10^{-30}$  s. Et là où l'on bute est à  $10^{-43}$  s.

**Nous allons comprendre qu'un boson est la signature d'un champ.** C'est ce que les savants cherchaient et par nature un champ est impossible à détecter directement. D'où la construction à Genève du LINAC3, du PS, le SPS, le LEP puis du **LHC** qui veut dire **Large Hadron Collider**, nous parlerons abondamment de la signification de ces initiales.

Comprendre le boson de Higgs, ou plutôt **BEH**, ou plutôt, **le champ de Higgs, champ scalaire**, n'est pas facile. Pour exprimer un **ensemble de forces qui provoque un mouvement** (exemple un vent dans une chevelure, les vagues d'un océan) Faraday en 1821 observe à sa fenêtre du Surrey en banlieue de Londres un champ de houblons ballotté par le vent. Il va appeler « **champ** », « **field** » en anglais, pour désigner les **lignes de forces d'un aimant au voisinage d'un courant électrique qui ressemble à ses houblons ventés** et parler de champ électrique et champ magnétique. Par là même il inventait le moteur électrique et la production industrielle d'électricité. Maxwell va ensuite **mathématiser** les champs de forces **électromagnétiques** en utilisant les nouvelles mathématiques des équations différentielles (rotations, divergences intégrales curvilignes).

Un **champ scalaire** est ce que nous montre tous les soirs à la télé au journal de 20H les présentatrices de météo avec la carte de France des températures (le champ c'est l'espace de la carte + les valeurs des températures qui sortent de la carte), un **champ vectoriel** est, dans cette même émission, la carte avec les flèches représentant la direction des perturbations. Par contre dire que le boson de Higgs ou plutôt **le champ de Higgs** est comme l'eau d'une piscine où l'on nage difficilement sauf si on est poisson ou bien comme la difficulté de marcher dans la neige avec des raquettes (la neige est le champ), ou de skier selon le fart des skis ou d'entourer une célébrité qui passe ou la propagation d'une rumeur, le tout pour donner de la masse aux particules ne fait **qu'embrouiller les esprits** par des exemples **simplistes** et pas très justes sur un sujet par nature **difficile à comprendre** et tout aussi **difficile à expliquer**. Aussi si l'on veut que **notre voyage soit instructif** et ne se résume pas à des photos de tubes bleus, d'ascenseurs jaunes et de tores rouges quelques prérequis sont nécessaires. Je vais donc tenter de reprendre le déroulé d'une fantastique aventure scientifique qui marqua notre siècle.

Donc nous allons à **Genève**, plus grande ville de Suisse avec 195.000 habitants. Chacun sait que Genève abrite beaucoup de banquiers et d'exilés fiscaux. C'est la faute au roi Louis XIV. Il révoqua l'Edit de Nantes (1598) de son grand père Henri IV qui avait mis fin aux Guerres de Religion. Les 300.000 élites du million de **protestants français** s'exilèrent pour partie à Genève (ville refuge de Calvin) pour les banquiers et surtout à Amsterdam pour les grands commerçants. De par la **neutralité** de la Suisse Genève est

aussi une ville **internationale** depuis 1919 où, à la signature du Traité de Versailles, **Wilson** président américain, demanda la constitution d'une instance internationale, la **SDN**, Société des Nations, ancêtre malheureuse de l'ONU, devant siéger dans un pays européen non belligérant afin que la paix soit contrôlée. La SDN n'existe plus mais son « **Palais des Nations** » à Genève héberge un grand nombre d'organisations internationales : l'**ONU** (siège européen, HCR Haut Commissariat aux Réfugiés, aux Droits de l'Homme), Comité International de la Croix Rouge, l'**OMS** Organisation Mondiale de la Santé, le **BIT** Bureau International du travail, de la Météo, et le **CERN**, Organisation Centre Européen de Recherche Nucléaire regroupant les budgets de 20 états européens. Le **C** n'a plus de signification, de même que **N** car les recherches portent sur les composants de la matière et non sur l'usage des rayonnements.

Le **CERN**, fondé en 1952 à l'initiative du français Louis de Broglie (prix Nobel 1929), a pour vocation **la découverte des constituants et des lois de l'Univers**. Il utilise des instruments scientifiques très complexes, des accélérateurs et des détecteurs pour sonder les constituants ultimes de la matière : **les particules fondamentales**. Ses **moyens de calculs** sont mondiaux grâce à Internet inventé pour mutualiser les laboratoires de chercheurs à travers le monde. **Internet** fut à l'origine inventé par le CERN en 1990 par Tim Bernes Lee.

Pourquoi donc des **astronomes s'intéressent-ils au boson de Higgs** presque autant qu'aux anneaux de Saturne ? Cela vient sans doute de notre contemplation du ciel et de la remarque de Leibniz en 1740 contemplant lui aussi notre ciel au temps heureux où les savants étaient d'abord les philosophes : « **Pourquoi y a-t-il quelque chose plutôt que rien ?** ». Le début de la réponse vient de la vitesse limitée de la lumière. Observer le ciel c'est donc observer l'histoire et donc vient l'idée d'un début de cette histoire. Les calculs de l'abbé Lemaître conduisant à l'expansion de l'U et donc son début invite à découvrir les balbutiements du jeune Univers fait de plasma de gluons et un champ de force peut être unique. Mick Storr, qui va nous accueillir ce soir, me disait en 2010 : **« nous travaillons pour vous les astronomes »**. Avec le LHC on va recréer les conditions initiales en énergie et température d'une fraction de seconde du BB où les éléments internes des atomes étaient dissociés. L'inflation, confirmée en mars dernier par Planck, va refroidir l'Univers naissant et libérer et composer ces éléments.

Parler du boson de Higgs c'est comprendre d'abord cette chose inimaginable: **les atomes ont un noyau** et ce noyau lui même renferme d'autres éléments, **les particules**, tout aussi invisibles et au comportement probabiliste. Comment un savant, dans son laboratoire, son bureau ou en promenade, a pu un jour imaginer que l'atome grand comme 1/10 de milliardième de millimètre renfermait un noyau en son centre.

La **renaissance du concept d'atome**, datant de 5 siècles avant JC, commence par la Révolution Industrielle en Angleterre où les savants d'alors voulaient comprendre la composition de la vapeur des machines de Watt qui faisait bouger les bielles et avançait les premières locomotives. Parmi eux l'Autrichien Boltzman qui osa dire que la dite vapeur était composée d'atomes. **En 1900 on ne connaissait encore rien des atomes**. Il y eut même en **en France** une lamentable campagne **contre** l'existence des atomes. Le grand chimiste **Berthelot**, secrétaire de l'Académie des Sciences, refusait tout article parlant d'atomes. Ministre de l'Instruction Publique il interdisait que l'on en parlât dans les programmes. Honteux de cet épisode Claude **Allègre**, alors ministre de l'Education Nationale, a voulu faire déboulonner la statue d'Auguste Comte, leader antiatome, de devant la Sorbonne. Il n'y parvint pas mais il réussit à la changer de sens, la statue tourne désormais le dos à l'université. Désespéré lui aussi par l'imbécillité de ses

collègues conservateurs Ludvig Boltzman se suicide à Vienne en 1906 en demandant que sa formule logarithmique sur l'entropie soit inscrite sur sa tombe. Se faisant il ignorait qu'un jeune de 26 ans nommé **Einstein** venait de démontrer l'année précédente que les grains de pollen du **botaniste Brown** ne pouvaient s'agiter que par l'action des atomes de l'eau où baignait le pollen. Jean Perrin démontra en 1908 par l'expérience l'existence des atomes d'Einstein. **La ronde de 54 prix Nobel liés aux particules pouvait commencer.**

A cette époque, Ernest **Rutherford**, (prix Nobel de chimie 1908 sur la nature des particules alpha) au Cavendish Laboratory à Cambridge, avec Joseph John Thompson lui aussi prix Nobel pour la découverte de l'électron (1897), étudiait l'effet ionisant sur les gaz des rayons que Röntgen baptisa X par manque d'inspiration. Rutherford imagina alors plusieurs expériences pour comprendre **l'action sur la matière des rayonnements** découverts par Marie Curie. En **1911**, en bombardant une feuille d'or avec des rayons alpha, il remarqua que certains rayons rebondissaient alors que d'autres traversaient la feuille. **Rutherford eut alors l'intuition** qu'il y avait **quelque chose à l'intérieur des atomes** de la feuille qui faisait rebondir certaines particules de radium et en laissait passer d'autres. Ancien agriculteur néo zélandais, par référence aux cerises, il nomma « **noyau** » cet obstacle et il calcula qu'il concentrait presque toute la masse et toute la charge positive de l'atome électriquement neutre, les électrons situés à l'extérieur déterminant de fait la taille de cet atome. La taille d'un atome varie entre  $10^{-11}$  et  $10^{-10}$ , le noyau entre  $10^{-15}$ . Le noyau d'atome d'H est 40... fois plus petit que l'atome lui même.

Ainsi Rutherford avait démontré que :

Que **la matière est vide** puisque la plupart des particules passent à travers sans interaction, ce qui signifie qu'elle est concentrée dans des petits volumes (pour comprendre : **Si les protons et les neutrons avaient un diamètre de 10 cm, les quarks et les électrons mesureraient moins de 0,1 mm et un atome entier ferait environ 10 km de diamètre. Un atome est constitué à plus de 99,99 % de vide.**)

Que certaines particules sont diffusées de manière "violente", jusqu'à parfois faire demi-tour

Que le fait que **les électrons ne soient pas mélangés avec les noyaux** et sont situés à des distances de ce noyau beaucoup plus grandes que sa taille fut **une surprise**

Rutherford mettra **2 ans** à trouver un modèle ressemblant **au système solaire** qui se révélera faux bien qu'on l'utilise encore par facilité.

8 ans plus tard, Rutherford, dont la spécialité était le bombardement des atomes, découvre que le noyau de l'atome d'hydrogène se trouve **aussi dans les autres atomes**. Il remarque que lorsque des particules alpha sont envoyées dans un gaz d'azote, ses détecteurs de scintillation indiquent la signature de noyaux d'hydrogène. Il détermine ensuite que cet hydrogène ne peut provenir que de l'azote. Ce noyau d'hydrogène est donc présent à l'intérieur d'un autre noyau. Rutherford baptise la particule correspondante du nom de **proton**, d'après le mot grec pour « premier », πρῶτον. Il faut noter que presque tout le vocabulaire scientifique vient, depuis le XVIII<sup>ème</sup> siècle du **grec**, juste reconnaissance car ne connaissant pas de scientifique romain le latin ira enrichir surtout le vocabulaire juridique, militaire et administratif, grandes spécialités des Romains.

Rutherford était devenu très célèbre et un jeune étudiant danois, **Niels Bohr** **prix Nobel 1922**, obtint une bourse pour étudier à Cambridge avec Thomson. Ne supportant pas le caractère irascible de Thomson Bohr, il part à Manchester. Bohr réfute immédiatement le schéma, style système solaire, de l'atome de Rutherford qui, selon les équations de Maxwell, ne peut pas être stable (un électron tournant provoque un courant électrique, consomme de l'énergie et donc tombe sur le noyau, ce qui n'est pas ce que l'on observe). Adeptes des sauts quantiques, il propose que les électrons soient sur des **niveaux d'énergie comme les étages d'une tour**. Lorsque ceux-ci change de niveau à l'occasion d'une collision extérieure, il y a émission d'une particule que Gilbert Levis en 1922 appellera « **photon** » du grec « photos : lumière ». C'est la manifestation du **discret et du continu**. Jusqu'alors la physique utilisait des valeurs continues avec des fonctions continues où à partir d'une position on en déduisait la suivante. Là les phénomènes procédaient par **saut imprévisible**. Ce sera la **grande querelle** des anciens et des modernes illustrée en 1927 par la confrontation d'idées Bohr Einstein (Dieu ne joue pas aux dés), avec la réplique de Bohr : « Cessez Einstein de dire à Dieu ce qu'il doit faire ». Bohr était croyant, tout comme Rutherford. C'est la séparation des physiques : **la mécanique relativiste est déterministe, la mécanique quantique est probabiliste**.

En 1924, le physicien français **Louis de Broglie**, prix Nobel 1929 émet l'hypothèse que toute particule doit être associée à **une onde semblable à la lumière**.

Le mouvement va s'accélérer et se fixer pour un temps avec le trio **Heisenberg, Schrödinger et Pauli**. On remarquera que cette génération de **chercheurs germaniques** voulait, avec **Einstein**, effacer par la science les horreurs de la guerre 14-18 issues de leurs pays. C'était l'apogée alors des universités d'Heidelberg et de Göttingen.

**Heisenberg**, prix Nobel 1932, jeune mathématicien contrarié, veut travailler avec Bohr, de retour à Copenhague, en appliquant la théorie des matrices sur les paramètres des particules incontrôlables, celles-ci remplissant tout l'espace, en introduisant des probabilités de présence et en évacuant les représentations par point de la mécanique classique. A la suite d'une retraite studieuse en 1927 sur les falaises de l'île d'Héligoland en Mer du Nord (il était gravement allergique au pollen et l'air sur l'île était pur) il déduit que les **particules sont et seront invisibles car apparentées à des objets mathématiques**. Les expérimentateurs les devineront par leur trace, leur masse, leur charge auquel Pauli rajoutera le spin. Heisenberg énonce alors son « **Principe d'Incertitude** » par une formule disant qu'il y a incertitude sur la position, la vitesse, l'énergie des particules. C'est la **non localisation** ou encore appelée **l'intrication quantique**. Il introduit, en même temps que son adversaire Schrodinger, la notion que le comportement d'un électron dans un atome est décrit par **une orbitale** qui est **une distribution de probabilité** de présence plutôt qu'une orbite.

**Pauli**, prix Nobel 1945, redéfinit en 1924 le **spin** d'une particule, notion compliquée qui permet d'expliquer la structure hyperfine des spectres atomiques (l'effet Zeeman). Le mot spin (rotation en anglais) est tout aussi impropre que « trou noir » car on a cru un moment que l'électron tournait sur lui-même comme la Terre. Pour simplifier cette notion complexe, disons qu'il s'agit d'un degré de liberté supplémentaire détectable. Pauli énonce alors le « **Principe d'exclusion** » : les électrons ne peuvent **pas se trouver au même endroit dans le même état** quantique. En mécanique quantique, il n'est pas

possible de supposer que les grandeurs physiques telles que la position ou la vitesse aient une valeur définie que l'on **puisse mesurer sans perturber le système**. L'état du système doit donc **être défini indépendamment des grandeurs physiques observables**: spin, charge, masse (ou son équivalente : l'énergie). **D'où l'importance de l'étude des champs**. Ce sera la base du champ de Higgs et des recherches de son boson.

De ces découvertes fondamentales plusieurs problèmes surgissent : comment décrire par des champs des **mouvements incontrôlables par coordonnées**, comment décrire des particules issues de ces champs, en conservant l'énergie, l'impulsion, la charge, le moment. **La physique mathématique prend le relais**.

Arrive alors les clés de toutes les futures recherches du neutron, du neutrino, du muon non encore découverts à cette époque, au futur boson de Higgs : « **la théorie quantique des champs** » QFT et le fameux théorème d'Emmy Noether sur **l'invariance de jauge : les symétries sont équivalentes à la loi de conservation**. Il faut donc **un outil capable de décrire un champ dont les caractéristiques étaient totalement libres dans toutes les directions à la fois**.

Pour cela il faut recourir à des notions mathématiques difficiles comme les lagrangiens, les hamiltoniens, les diagonalisations de matrices, toutes notions imprimées sur les T-shirt et les mugs que vous achèterez à la boutique du CERN.

Ainsi les photons ne sont plus considérés comme des « petites boules de billard » : ils sont considérés **comme des champs quantiques** dont les « **excitations** » ou « **oscillations** » 'ressemblent' à des particules. C'est ce que nous expliquait au FIAP Yves Sirois les bras en l'air et les yeux fermés tellement la QFT était importante pour lui dans sa quête du boson de Higgs. Ce fut aussi notre brusque révélation car on nous l'avait jamais dit. Tous les électrons de l'U sont donc identiques dans tout l'U car issus d'un même champ, le champ électron.

**Les particules sont considérées comme des états excités d'un champ (champ quantique)**, propriété qui sera démontrée plus tard en 1937 par Wigner, autre Prix Nobel.

Erwin **Schrodinger**, prix Nobel 1933, publie une équation d'évolution de la **fonction d'onde** associée à l'état d'une particule. Paul **Dirac**, prix Nobel avec Schrodinger, formula une théorie quantique enfin mathématiquement cohérente en **réconciliant** les idées de Schrödinger et Heisenberg. Son équation traduira le comportement de particules comme l'électron à partir de l'équation de Schrodinger et de la relativité. En 1928, il déduit du travail de **Pauli** sur un système de **spins** une équation relativiste décrivant l'**électron**. Cela permet à Dirac de prédire en 1931 l'existence d'une particule appelée **positron**, l'**antiparticule** de l'électron. **Dirac venait de découvrir l'antimatière**. Étudiant lui aussi les expériences de Marie Curie, lors d'une expérience en 1932, **Chadwick**, qui bombardait du béryllium avec des particules  $\alpha$ , remarqua une radiation inconnue qui éjecte des protons du noyau. Chadwick en conclut que ces radiations étaient composées de particules de masse approximativement égale au proton mais sans charge électrique, **les neutrons**. Prix Nobel 1935.

En conséquence de ces avancées théoriques **les premiers expérimentateurs construisent les détecteurs des particules** sorties des équations. Dès 1912 Charles **Wilson** (prix Nobel 1927) avait imaginé la **chambre à bulles** qui permit à Anderson en 1932 de découvrir le **positron** (l'anti électron) en étudiant les photons des rayons cosmiques. Prix Nobel 1936.

En Angleterre, Cockcroft et Walton toujours en 1932, réalisèrent la première **désintégration réussie du noyau par des particules électriquement accélérées**. Ils utilisèrent un multiplicateur de tension à l'aide d'un montage compliqué en forme de colonne de **redresseurs** et de **condensateurs** qui trône aujourd'hui à l'entrée du Musée des Sciences de Londres. Prix Nobel 1951.

En 1931 Orlando **Lawrence** invente le **cyclotron** à Berkeley pour fracasser des particules en frontal grâce à une très forte tension électrique afin **d'en analyser les morceaux**. Lawrence aura le prix Nobel en 1939. L'énergie des particules ainsi accélérées se mesure en **électron-volts** (eV). L'électron volt, dont on se sert pour annoncer la puissance d'un accélérateur (14 TeV, eV puissance 12, mille milliards, pour le LHC) est **l'énergie d'un électron entre une différence de potentiel de 1 volt**. Les expériences vont se multiplier grâce à l'invention des détecteurs avec des chambres à fils reliés à des ordinateurs et inventés par français Georges **Charpak** (prix Nobel 1993).

Les découvertes vont s'accélérer par **l'étude des impacts des rayonnements nucléaires**. La désintégration **beta** (provoquée par l'émission d'un électron ou d'un positron) verra Pauli imaginé le **neutrino** (l'énergie manquante est emportée par une particule), **Fermi** en 1934 trouve que **la désintégration beta vient de l'échange d'une particule entre le proton et le neutron** (ce sera bien plus tard le boson W). Prix Nobel 1938.

Les théoriciens reviennent :

Hideki **Yukawa**, professeur à l'université d'Osaka au Japon prévoit une théorie des forces nucléaires fortes avec une particule intermédiaire, le **méson**, de masse intermédiaire entre celle du proton et de l'électron qui sera découverte en 1947 par Carl Powel dans les rayons cosmiques. Prix Nobel 1949.

**Richard Feynman** apporta en 1942 un corpus décisif à toutes les recherches sur la physique des particules. il reformula entièrement la **mécanique quantique** à l'aide de son **intégrale de chemin** qui généralise le **principe de moindre action** de la **mécanique classique** et inventa les **diagrammes** qui portent son nom et qui traduisent par des graphes les désintégrations de particules. Feynman invente aussi la **chromodynamique des champs** (QCD) pour décrire la force d'interaction forte pour comprendre la **structure des hadrons** (protons, neutrons).

Feynman avait pour voisin de bureau au Caltec à Los Angeles le très sérieux **Murray Gell Mann** autre génie, seul survivant aujourd'hui de cette aventure, à qui il faisait peur en criant dans les couloirs et en jouant du tamtam dans son bureau souvent rempli de filles. La profusion des particules découvertes dans des accélérateurs toujours plus puissants donnait une impression de domaine à la dérive et immaîtrisable. Bref **on n'y comprenait plus rien**. Le physicien Isaac Rabi, spécialiste des forces dans les noyaux dit même un jour : « Who ordered that ? » Murray eut alors l'idée de **classifier les particules** en fonction de leurs caractéristiques en utilisant la théorie mathématique des ensembles énoncée par Galois en 1832 et améliorée par le norvégien Sophus **Lie**. Murray établit en 1961 une classification des nouvelles particules découvertes en utilisant les propriétés de symétrie d'ordre trois du groupe SU(3) car tout est symétrique dans l'U du début. Mathématiquement S vient de « spécial » et U vient de « unitaire », afin de rappeler les transformation en rotation du mouvement des particules qui répondent à des groupes non abéliens. Ainsi naquit les **fermions**, particules de matière de spin demi entier qui se repoussent et les **bosons** à spin entier qui s'agglomèrent. Dans la classification, certaines places pour de nouvelles particules étaient encore libres. La découverte en 1963 par un groupe de chercheurs de Brookhaven de la particule  $\Omega^-$ , prévue dans cette classification, confirma **le classement de Gell-Mann**.

La théorie du groupe de symétrie SU(3) permit à Gell-Mann de proposer l'existence de nouvelles particules, appelé **quarks**, particules constituant les neutrons, les protons et toutes les particules massives appelées **hadrons (le H de LHC)**. Avec la théorie de Fynmann les différents quarks prirent les couleurs rouge, bleue, verte. Ainsi naquit la notion de **Modèle Standard** qui est **une théorie des champs quantiques**. Les quarks sont les composants aujourd'hui ultimes des nucléons (protons, neutrons). L'existence des quarks sera mise en évidence en 1969 par James Bjorken et Richard Feynman à l'accélérateur de Chicago.

En 1954 les physiciens **Yang et Mills** imaginent **une force initiale unique** débouchant vers une théorie de jauge (cad de mesure et de localisation par des champs) pour obtenir une description cohérente de la **force nucléaire** responsable de la cohésion des **protons-neutrons** dans le noyau. Ils appliquent le théorème de Emmy Noether. Ce théorème énonce des symétries dans l'espace qui **préservent les lois de conservation** (énergie, impulsion, moment) ainsi que la **charge** nécessaire pour l'interaction de l'interaction électromagnétique. **Donc** voilà où nous en sommes:

**Toutes les particules de matière (les fermions) ou d'interactions (les bosons) sont des quanta d'excitation de champs. Ces champs sont présents dans tout l'Univers et peuvent osciller et interagir entre eux.**

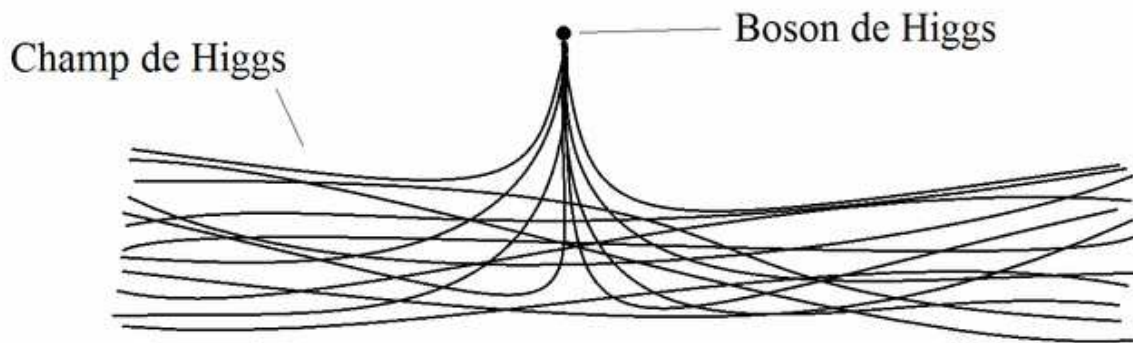
**Universalité des particules : les électrons sont exactement identiques dans tout l'Univers car tous quanta (oscillation minimale) d'un seul et même champ** F. Wilzeck, Nobel 2004.

Le Modèle Standard, en 1963, a donc 4 forces dont la gravité, mais cela semble un système physique boiteux. Certains chercheurs pensèrent alors que **ces 4 forces devaient être réunies en une seule force** au début du BB. **En 1963 Sheldon Glashow propose que la force nucléaire faible et la force électromagnétique peuvent être réunies en une seule force dont les bosons seraient W + et - et Z de masse très élevée.** Le problème principal de la théorie électrofaible de Glashow est que les particules qu'elle décrit sont sans masse, ce qui est en désaccord avec la réalité.

Le hic est qu'il faut aussi réunir le **boson photon de masse nulle de l'électromagnétisme avec les bosons W et Z de masse élevée.** C'est impossible à cause du photon donc les forces sont inunifiables. De plus avant **la séparation des forces** à  $10^{10}$  l'U est symétrique parce que **les masses sont nulles**. Si pas de masse : pas de matières. Il s'agit de masse inertielle (celle qui résiste à l'accélération). Comment donner des masses sans briser la symétrie ? Les premiers à y penser sont Anderson, Nambu et Schinger. **L'écossais Peter Higgs**, chercheur à Edimbourg va alors proposer une solution, ainsi que **les Belges Brout et Englert** de l'Université Libre de Bruxelles. Dans les instants très proche du BB l'Univers était très chaud, composé d'un plasma de gluons (étudié par le détecteur ALICE et d'une seule force : **c'est le refroidissement dû à l'inflation qui les a dissocié.**

**Higgs annonce en août 1964 un mécanisme qui permet d'avoir des forces totalement unifiées à haute température, mais dissociées à basse température (la clé est là) – un champ variable selon la température -.** Cette dissociation se manifestant notamment par le fait que les bosons W et Z doivent acquérir une masse à basse température. **Higgs est le seul à décrire le boson qui portera son nom.**





Pour que les bosons W et Z acquièrent de la masse, on va **imaginer** les mettre dans un champ analogue à une mélasse ou un espace visqueux. La masse, c'est quelque chose qui s'oppose au changement dans le mouvement, une accélération, et pour donner une illusion de masse à une particule, on peut la faire interagir avec ce champ, qui va jouer un rôle analogue à de la mélasse. En langage de physicien c'est **une fluctuation de l'énergie du vide**. Dans l'Univers le vide n'est pas totalement vide car il y a toujours des particules résiduelles en mouvement non détectables. Par ailleurs l'état fondamental d'un champ est son état de plus faible énergie. **Toute la difficulté, c'est faire en sorte que le champ recherché crée bien une mélasse à basse température, mais pas à haute température.** Or la mélasse n'est pas l'état naturel d'un champ. Exemple le champ électromagnétique : si on ne fait rien pour le stimuler ou le créer, il sera nul et ne freinera pas. On dit que **l'état fondamental du champ électromagnétique est zéro**. Mais avec le champ de Higgs, pour avoir de la mélasse sans rien faire, il nous faut aussi un champ dont l'état fondamental soit non nul. Enfin seulement à basse température, car on ne veut plus de mélasse à haute température. Ce **double état** changeant s'appelle **une brisure de symétrie**. Représenté par un chapeau mexicain où les particules du début vont glisser de haut en bas selon la température. La brisure de symétrie se dit aussi « **transition de phase** », phénomène analogue à l'eau qui passe de liquide en glace ou en vapeur.

En introduisant le champ de Higgs avec la bonne forme de l'énergie à haute et basse température, on crée la mélasse qui va freiner les bosons W et Z, et donc les agglomérer et donc leur donner de la masse par condensation. **En prime il donnera de la masse aux autres particules sauf pour le photon qui ne sera pas couplé avec le champ.**

Le processus est alors le suivant :

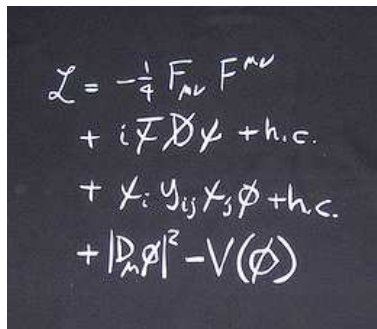
Le satellite Planck nous a dit que ce que l'on appelle improprement BB est à -13,87 milliards d'année avec une température inimaginable et inmesurable entre  $10^{30}K^{\circ}$  et  $10^{16}K^{\circ}$  (on aboutit à ces chiffres avec les équations de thermodynamique)

A  $t =$  un peu **avant 10-12 s** (un millième de nanoseconde) l'Univers se refroidit (l'histoire de l'U est un refroidissement), donc les particules actuelles sont sans masses car désordonnées (**quarks baladeurs, électrons baladeurs, neutrinos baladeurs**)

A  $t =$  **10-12s** entrée en action du mécanisme de Higgs, processus analogue à la condensation de vapeur d'eau quand la température baisse, le vide acquiert une tension interne

A  $t =$  **plus de 10-12s** après le mécanisme de Higgs le vide se condense autour des particules : elles ont une masse et ne vont plus à la vitesse de la lumière, **sauf les photons**

A t= **2012 ap JC** les physicien vont prouver ce mécanisme


$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi}\not{D}\psi + h.c. \\ & + \bar{\psi}_i \gamma_{ij} \psi_j \phi + h.c. \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi) \end{aligned}$$

Qu'a publié Higgs et les autres ?

Un Lagrangien (formule d'équations différentielles décrivant des mouvements) englobant les champs décrivant les champs de toutes les particules, le tout en 4 lignes figurant sur les muggs et les T-shirt que vous achèterez au Shop.

en 1 : **la dynamique des champs de bosons de jauge**

en 2 **dynamique des champs de fermions**

en 3 **interaction des champs de fermions avec le champ de Higgs (donnant la masse des fermions)**

en 4 **propagation du champ de Higgs ( cad masse des bosons de jauge) et potentiel de Higgs (le chapeau), c'est à dire la brisure de symétrie**

Sans les maths : pas possible d'expliquer ces phénomènes, il en est de même pour l'astronomie comme le mesure les gentils lecteurs de mes **astromaths** sur le site de Jean Pierre.

L'article original de Higgs est exposé dans la **sphère musée** où se trouve aussi le premier poste internet et la bouteille rouge d'H point du départ des protons. A visiter absolument.

Le modèle standard ne prévoit pas la masse exacte (seulement sa gamme de masse entre 115GeV et 140 GeV) du boson de Higgs, seulement ses propriétés de désintégration. Son spin est à zéro (puisque'il est en CDD).

Le boson de Higgs, se désintègre en 2 W et 2  $\gamma$  ou un quark top et 2  $\gamma$  ou 4 muons, etc...

Au LHC on va sélectionner à forte énergie 2 $\gamma$  ou 2 ZZ donnant 2 électrons <sup>et</sup> 2 muons.

Pour cela on va **éclater par collision frontale** 2 protons (encore appelés hadrons, d'où le nom LHC, L pour très grand, C pour collision, H pour Hadron- lourd en grec) lancés à presque la vitesse de la lumière sous ultra vide à travers deux tubes parallèles de 1m en diamètre qui se croiseront dans des détecteurs. On applique les 2 principes : un champ électrique accélère une particule chargée, un champ magnétique courbe sa trajectoire. Les protons tourneront donc en sens inverse dans un anneau gigantesque de **27 km de long à 100 m** sous terre afin de protéger l'expérience des perturbations extérieures. La collision s'effectuera dans la chambre centrale d'un détecteur où la température de collision sera **100.000 fois** supérieure à celle régnant au centre du Soleil. Ce détecteur sera constitué d'une **structure cylindrique à pelure**

**d'oignon.** Chaque pelure sera dédiée à la détection d'une particule particulière lorsque celle-ci la traversera à chaque collision. Cette pelure émettra alors un signal qui sera stocké dans un ordinateur. Les types de pelure sont : trajectographe, calorimètre magnétique, calorimètre hadronique, aimants supraconducteur, chambres à muons. Les éléments les plus spectaculaires sont les chambres à muons. Chaque pelure est reliée à un ordinateur qui analysera les caractéristiques de la particule (énergie, position, type). Le logiciel contient 5 millions de lignes de code, 20 ans de développement.

### **Les détecteurs :**

En fait on va donc construire 2 grands détecteurs de collision de technologie différente afin d'être sûr que le boson ne soit pas fabriqué par un détecteur unique. Les différences de technologie porteront sur la production du champ magnétique nécessaire pour piéger les muons. Pour **CMS (Solénoïde Compact à Muons)** (11.000 tonnes) le champ sera celui d'un solénoïde géant, pour ATLAS le champ sera toroïdal. Il y aura sur l'anneau 2 autres détecteurs : ALICE (collision d'ion de plomb pour étudier le plasma et les gluons du BB) et LHCb pour l'étude de l'antimatière, tous deux de conception française.

**ATLAS, (A Toroidal LHC ApparatuS)** de conception française, par exemple, regroupe plusieurs types de détecteurs rassemblés dans un cylindre de 40 m de haut, 55 m de long (la nef de la cathédrale ND de Paris à 100 m sous terre, pesant 7.000 tonnes; c'est un assemblage de plus de 100 millions d'éléments de détection, qui fourniront chacun 40 millions de mesures par seconde. Près de 2 000 physiciens et ingénieurs travaillent depuis dix ans sur ATLAS, dont le coût est de 350 millions d'euros. Le coût total du LHC, lui, est d'environ 3 milliards d'euros. Budget de fonctionnement 700 millions €.

Le grand atout du LHC : la puissance de la **grille de calcul** (les Américains ont échoué par manque de puissance de calcul). Il y a 25.000 PC au LHC reliés par internet à 12 gros centres de calcul dont le plus gros est en France à Lyon (IN2P3). Il est impossible de sélectionner un seul proton (en fait : on injecte 2808 paquets de 100 milliards de particules). Le CERN au cours de son histoire a construit plusieurs accélérateurs avant le LHC et ceux-ci sont mis à contribution pour monter en accélération en se passant les paquets d'accélération en accélération. Car l'expérience de collision de protons **est aléatoire, donc non reproductible**, dont on va **travailler par statistique** et le **résultat final sera une courbe de probabilité** de présence voisine de 1 à 5 sigmas, c'est à dire **99,99999%**. Aujourd'hui on dépasse 7 sigmas (**99,9.999.999%**). Il faudra donc un très grand nombre de collisions et sachant qu'isoler un seul proton est impossible on va travailler par essaim et il faudra trier les bonnes collisions et éliminer sur place les mauvaises (**le LHC est une gigantesque poubelle informatique**). En 2 micro s il faut éliminer 99,9% des événements, en quelques millisecondes il faut éliminer 99,99.999%. C'est à dire enregistrer 1 événement et en rejeter 10 millions. Isoler le bon signal est donc le plus difficile, la sensibilité des détecteurs et du logiciel est le rapport signal/bruit de fond (le quark top est un vrai parasite). Le bruit de fond ce sont les événements similaires à ce que l'on cherche. Les détecteurs ATLAS et CMS ont 150 millions de capteurs enregistrant 40 millions de mesures par seconde. Filtrées par logiciels il restera 100 collisions analysables. Après les bons événements sont transmis aux analystes dans différents labos.

La grande difficulté, et donc l'originalité, sera d'atteindre une énergie gigantesque voisine de celle du BB. Pour cela on va accélérer dans le grand anneau 2 faisceaux de protons hadrons tournant chacun en sens inverse de l'autre dans 2 petits tubes

parallèles et voisins jusqu'à que l'on **provoque une collision**. Toute la difficulté vient de l'atteinte d'une vitesse très proche de celle de la lumière (300.000 km/s).

Pour atteindre la vitesse de la lumière : les protons passent à travers 4 grosses enceintes argentées qui délivrent **500.000 volts** pour **accélérer** les protons (d'où le **nom d'accélérateur**) à chaque passage dans le grand anneau. L'avantage d'un anneau est le **passage cyclique** à l'accélération électrique : pour un accélérateur linéaire il faut des accélérateur tout le long du parcours. L'anneau n'est pas un cercle mais 8 arcs octants avec des circuits d'injection à chaque départ d'octants. C'est analogue au périphérique parisien : les véhicules circulent en sens inverse et en 4 point on croise la circulation provoquant des collisions. 100 m sous terre est une moyenne, en fait il est à 175 m en France et 45 m près du lac Léman. La **grande difficulté est la focalisation** (la collimation) des faisceaux car si celui ci dévie des protons arracheraient des particules aux parois. Bien collimatés les faisceaux produisent **d'avantage de collisions** car il faut un maximum de collision pour avoir la chance d'en trouver **une d'analysable (des centaines de chercheurs à travers le monde par internet vont interpréter les analyses)**. C'est la mise en lumière concentrée par des aimants quadripôles. Il y a **9.600 aimants** disposés sur l'anneau. 392 aimants quadripôles vont concentrer les faisceaux. Les aimants sont fabriqués sur place, transportés et descendus par des cavités spéciales avec des grues spéciales. Nous visiterons l'usine sur place. Un proton fait 11.245 tours du LHC par s. Les aimants sont placés dans des cavités cryogéniques à  $-271,3$  pour faciliter la supraconductivité du courant électrique circulant autour des anneaux et aussi éviter l'échauffement. Le moindre dysfonctionnement (sur 27 km !) provoque la congélation du système (incident de septembre 2008 sur 200m). Chaque faisceau est composé de **2800 (1400 dans chaque sens) paquets de 100 milliards de particules tellement petites qu'une vingtaine de collisions pour 200 milliards a lieu**. En tournant les paquets font 7 cm mais à l'approche de la collision on les réduit à 20 microns pour avoir le plus de collisions possible. Chaque seconde 2 à 300 événements sont analysés, d'où l'on retiendra 25 collisions PP parmi un bruit de fond gigantesque représentant des collisions ou des particules parasites comme les gluons. Par chance il peut y avoir un candidat Higgs par expérience. Un faisceau peut tourner pendant 10H après il est éjecté dans un tunnel poubelle de 350 m avec au bout un bloc de graphite de 8 m de long tenu par 35 bloc de béton. L'énergie alors est celle d'un TGV à 150 km/s.

Au départ les protons libérés d'une bouteille d'H passent successivement dans le LHC contient un **9600 d'aimants** supraconducteurs **pour guider en tournant** les essais de protons, pour atteindre un champ magnétiques de 8,33 telsa, chacun d'eux refroidis à  $1,9^{\circ}$  kelvin, soit  $-271,25^{\circ}$  celsius, faisant du LHC le plus grand système de refroidissement jamais réalisé. Des températures aussi basses, nécessitant 120 tonnes d'hélium liquide pour être obtenues, sont nécessaires **pour atteindre la supraconductivité**, c'est-à-dire, une résistance nulle au passage du courant électrique. Les forts courants électriques produisent alors les puissants champs magnétiques requis. **Le LHC est l'endroit le plus froid de l'Univers**. Le bobinage des câbles est le point le plus sensible (1 câble a 36 brins torsadés de 6400 filaments de 7 microns de diamètre : c'est là où se situe les pannes). La prouesse technologique réside dans la conception et la construction de l'anneau plus que dans les détecteurs.

Donc pour courber la trajectoire des protons autour de l'anneau, l'accélérateur utilise 1232 dipôles magnétiques de 15 m de long de couleur bleue, et **392 quadripôles de focalisation** sont utilisés pour concentrer les rayons avant la collision. Les ondes radio poussent les protons autour de l'anneau et les « rassemblent » en groupes d'environ 100 millions chacun. Le budget le plus important fut porté sur la construction des aimants dont on visitera l'usine. Sur

un budget total de 3 milliards d'euros, seuls chaque détecteurs coûtera 500 millions, le reste sera affecté pour une large part aux aimants, point fort du LHC jamais souligné.

Dans un premier temps, des atomes d'hydrogène, qui sont normalement constitués d'un unique électron et d'un unique proton, sont expulsés d'une petite bouteille (dont on verra un exemplaire dans la sphère musée à l'entrée). Ils sont débarrassés de leur électrons et accélérés dans un accélérateur linéaire appelé LINAC 2, ils sont ensuite accélérés à nouveau dans une structure composée de quatre anneaux appelée le Booster Protons-Syncrotron qui débouche dans le synchrotron à protons de 628 mètres de circonférence. Puis sont injectées dans le grand anneau dont le but est de passer de 99,9.997.828% à **99,9.999.991% en 20 minutes en tournant.**

Les protons traversent les détecteurs en groupes de 100 millions chacun. Les essaims de protons sont espacés de 7,48 m. Sur les **200 millions** de protons présents dans la zone de collision prévue, seule une **vingtaine** vont réellement entrer en collision, en raison de la petite taille des protons. Les autres passent entre les gouttes. Cependant, les paquets de protons voyagent principalement en impulsions, à la fréquence d'une toutes les **25 nanosecondes**, ce qui signifie que les collisions dans le détecteur se produiront en moyenne **80 millions** de fois par seconde. Les détecteurs doivent enregistrer chaque morceau en moins de 100 nano s sur des millions de voies (trafic supérieur à l'ensemble des communications tel de la planète).

Des **logiciels éliminent les évènements inintéressants** (400 par s) (ne comportant pas les particules requises ou des phénomènes connus donnant  $2\gamma$ ), éliminent le bruit de fond très importants des parasites dus au système. La présence d'un boson enrichi une statistique et le degré de fiabilité est calculé. 25 bosons ont été sélectionnés de masse 125 GeV sur la désintégration 4 leptons (muons) en 2011 et 2012, 13 ont été retenus.

Les résultats officiels ont été donnés le 4 juillet 2012 à 9H lors d'un séminaire normal sans sujet, par les 2 portes paroles du CMS et d'ATLAS en présence de Higgs et Englert, Brout étant décédé l'an passé.

Le prix Nobel a été attribué à Higgs et Engert le 8 octobre 2013. Il ne pouvait pas être attribué à Brout, décédé en 2011, le comité a laissé sa place vide dans l'annonce. Le CERN, en tant qu'organisation, ne pouvait pas recevoir de prix à son grand regret comme nous l'a écrit Yves Sirois (seules les organisations internationales sont proposées pour le prix Nobel de la Paix, exemple MSF.)

**La découverte du boson de Higgs est fondamentale dans l'explication de la naissance de l'U.**

Il est **le point central** qui change l'orientation de l'évolution l'U en changeant sa densité. C'est le point dur des **fluctuations de l'énergie du vide**. On ne sait pas pourquoi les particules ont récupéré des masses différentes. On ne sait pas pourquoi avant il n'y avait que les quarks, des électrons et des photons. Les Américains l'appellent « **the God Particule** », la particule de Dieu. Il s'agit d'une erreur volontaire d'un éditeur d'un texte de Léon Lederman initialement « The Goddamn Particule », « cette foutue particule ». Mais vu son rôle central certains commencent à s'interroger.

La suite des recherches sera la découverte d'autres particules grâce à la puissance du LHC (aujourd'hui 4 X 2 Tev, en 2015 7 X 2 Tev) impliquant peut être 1 ou plusieurs modèles, un autre boson de Higgs à plus grande énergie. Le Modèle dit Standard

pourrait être étendu à des énergies bien plus grandes dès que le LHC fonctionnera à son maximum. Selon Michel Spiro il pourra même avoisiner les 10 puis 15 GeV, échelle de la grande unification et de l'inflation. Peut être qu'un autre boson de Higgs serait l'inflaton ?

Alice pourra peut être expliquer la matière initiale au tout début de l'U où les gluons ne pouvaient plus retenir les quarks .Après il faudra chercher l'origine des quarks, des photons et ... du boson de Higgs lui même.

Merci de m'avoir écouté,