

HistoireS de Particules

Yves Schutz

HistoireS de Particules

Résumé

4. Des particules élémentaires ... aux champs quantiques
 - Les champs quantiques entités élémentaires
 - Les particules excitations des champs quantiques
 - Les interactions entre champs quantiques
 - Des symétries

Lors du cours précédent nous avons appris comment la physique décrit les interactions entre particules élémentaires. Seulement 3 interactions fondamentales sont nécessaires pour rendre compte de tous les processus connus dont les particules élémentaires sont les acteurs : les interactions forte, électromagnétique et faible. L'interaction gravitationnelle bien plus faible que les 3 forces précédentes peut être ignorée tant que la densité de matière reste en dessous de la densité de l'Univers au temps de Planck.

Nous avons appris ce qu'est un champ, puis comment la physique a substitué aux particules élémentaires les champs quantiques comme entités élémentaires faisant des particules des excitations ou quanta de ces champs. Nous avons appris que les forces fondamentales sont décrites comme des interactions entre champs quantiques, entre champ de force et champ de matière. Nous avons ensuite appris que les principes premiers sont les symétries regroupées en des groupes mathématiques caractéristiques de chacune des interactions.

4. Des particules élémentaires ... aux champs quantiques

Le Modèle Standard de la physique des particules

Enfin nous avons appris que les physiciens ont construit une théorie cohérente et robuste qui décrit le monde des particules et des interactions, capable de rendre compte de tous les processus que l'on peut observer en laboratoire à condition de lui adjoindre un nouveau champ, le champ de Brout-Englert-Higgs, nécessaire pour expliquer l'origine de la masse des particules.

Avons-nous pour autant formulé la théorie ultime qui donne la réponse à toutes les questions que soulève la Nature. La réponse est non tant que nous ne saurons pas expliquer à partir de principes premiers l'origine des trop nombreux paramètres présents dans la théorie et qui interviennent non seulement dans l'organisation du monde microscopique mais dictent les propriétés de notre monde familier. C'est la quête à laquelle est consacrée la physique des particules. Et pour cette quête, les physiciens construisent des accélérateurs géants et des détecteurs monumentaux parce que c'est la seule façon de comprendre pourquoi notre monde et notre univers sont ce qu'ils sont.

Histoires de Particules

5 étapes

1. Du corpuscule et de l'onde ... à la particule quantique
2. De l'électron ... au zoo de particules
3. Du chaos ... au cosmos
4. Des particules élémentaires ... aux champs quantiques
5. Des histoireS ... vers l'Histoire ?

HistoireS de Particules

Des histoiresS ... vers l'Histoire

Yves Schutz

C'est à cette aventure qu'est consacré ce dernier cours. La question ultime étant : peut-on réduire toutes les histoires que je vous ai racontées en une seule, l'Histoire avec un grand H qui raconterait « le bout des choses ».

1953

Ma dernière « petite » histoire commence en 1953. Quel est le contexte de cette année remarquable, à plus d'un égard, quels sont les événements remarquables qui ont marqué cette année. En Alsace nous nous souvenons sans doute que c'est l'année (octobre) où le prix Nobel de la paix est remis à Albert Schweitzer (lauréat du prix 1952). Mais je ne suis pas certain que c'est l'événement qui a le plus marqué les esprits.



En avril, une jeune starlette fait sa première apparition à la sixième édition du Festival de Cannes

En juin , Elisabeth Windsor est couronné reine du Royaume Uni et des autres royaumes du Commonwealth

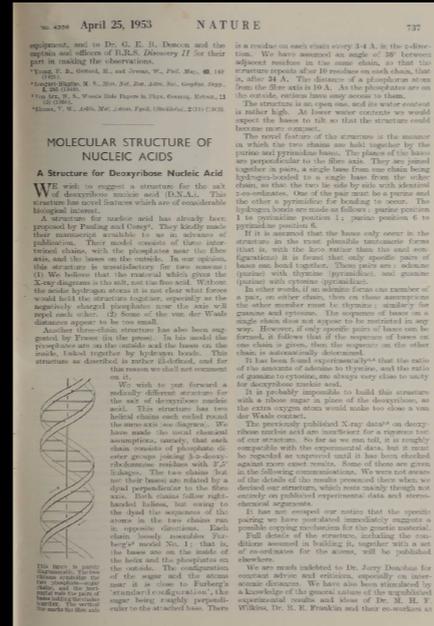
En septembre, Jacqueline Bouvier épouse John F. Kennedy

En décembre, Marilyn Monroe fait la couverture du tout premier numéro de Play boy

Des femmes remarquables qui feront l'actualité de la deuxième moitié du 20ème siècle.

Structure en double hélice de l'**DNA**

James Watson & Francis Crick



En sciences, l'événement majeur est sans conteste la découverte de la structure en double hélice de l'acide desoxyribonucléique, en anglais DNA (Desoxyribose Nucleic Acid), rien à voir avec notre quotidien préféré.

Naissance du CERN

Coopérer : faire à plusieurs ce que l'on ne peut pas faire seul

- 1951 : Conseil (provisoire) Européen pour la Recherche Nucléaire



C'est dans ce contexte, que va démarrer une des plus belles et des plus nobles aventures humaines, la création de ce qui est encore aujourd'hui le plus grand laboratoire de physique des particules au monde.

Mais commençons par le début. Après la deuxième guerre mondiale, la science européenne est sinistrée : les infrastructures sont détruites et elle est victime d'une fuite massive des cerveaux vers les puissances dominantes économiquement, principalement les USA et aussi (moins librement) l'URSS.

Il était urgent de remettre sur pied la science européenne. Pour cela, un petit nombre de physiciens imaginent de créer un laboratoire international dédié à la physique nucléaire et capable de rivaliser, intellectuellement mais aussi économiquement, avec les moyens mis en oeuvre par les USA et l'URSS. L'objectif est ainsi non seulement de rassembler les physiciens européens mais aussi de mutualiser les moyens nécessaires pour être compétitifs dans ce domaine : faire à plusieurs ce que l'on ne peut pas faire seul.

Les idées se mettent en place dès 1949, et le premier projet pour un laboratoire européen est soumis par Louis de Broglie. En 1951 est créé le Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire par 12 pays européens (Belgique, Danemark, France, Grèce, Italie, Norvège, Pays-Bas, République fédérale d'Allemagne, Royaume-Uni, Suède, Suisse et Yougoslavie)

Naissance du CERN

Coopérer : faire à plusieurs ce que l'on ne peut pas faire seul

- 1951 : Conseil (provisoire) Européen pour la Recherche Nucléaire
- 1952 : Genève site d'accueil



Il fallait d'abord trouver un site, un pays hôte, pour accueillir le laboratoire. Parmi les quelques pays candidats, la Suisse, pays neutre, fut choisit en 1952 ... et la France offrit un vaste terrain pour l'installation des infrastructures à venir.

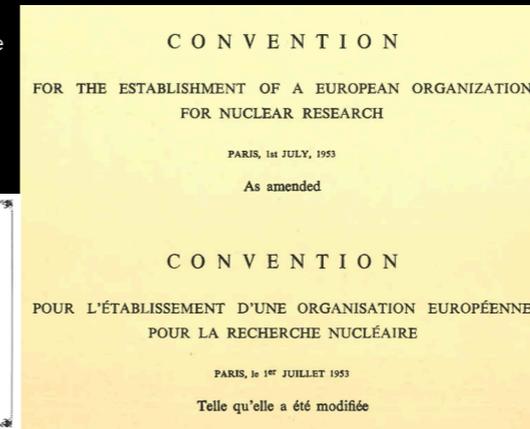
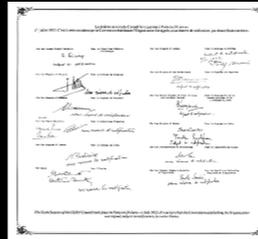
Francis Perrin, le fils de Jean, est le délégué français au Conseil provisoire. Il a travaillé avec les Joliot-Curie, notamment sur l'application de l'énergie nucléaire. Il est ancien élève de l'Ecole Alsacienne de Paris.

Photo : signature de la convention du CERN à Amsterdam

Naissance du CERN

Coopérer : faire à plusieurs ce que l'on ne peut pas faire seul

- 1951 : Conseil (provisoire) Européen pour la Recherche Nucléaire
- 1952 : Genève site d'accueil
- 1953 : Convention ratifiée



En juillet 1953, la convention du CERN est signée, marquant l'année 0 du CERN.

La même année presque jour pour jour, entrait en vigueur la Communauté Européenne Charbon Acier dont le but affiché par Robert Schuman était de rendre la guerre « non seulement impensable mais aussi matériellement impossible ». Le CERN devient ainsi chronologiquement la deuxième organisation européenne, mais contrairement à la CECA qui n'existe plus depuis 2002, le CERN est plus que jamais présent pour unifier l'ensemble du monde scientifique dans le domaine de la physique des particules non plus seulement l'Europe mais dans le monde entier.

Naissance du CERN

Coopérer : faire à plusieurs ce que l'on ne peut pas faire seul

- 1951 : Conseil (provisoire) Européen pour la Recherche Nucléaire
- 1952 : Genève site d'accueil
- 1953 : Convention signée

L'organisation s'abstient de toute activité à fins militaires et les résultats de ses travaux expérimentaux et théoriques sont publiés ou de toute façon rendus généralement accessibles

Le modèle du CERN est résumé dans cette phrase extraite de la Convention de 1953, Convention qui reste toujours d'actualité et scrupuleusement respectée.

Le mandat du CERN est de faire avancer la science dans le domaine de la physique nucléaire théorique et expérimentale en mettant à la disposition des chercheurs européens les moyens nécessaires (c'est-à-dire principalement des accélérateurs de particules de niveau mondial).

Recherche Nucléaire s'entend étude de la matière au niveau le plus élémentaire, d'abord le noyau de l'atome maintenant les particules élémentaires.

Naissance du CERN

Coopérer : faire à plusieurs ce que l'on ne peut pas faire seul

- 1951 : Conseil (provisoire) Européen pour la Recherche Nucléaire
- 1952 : Genève site d'accueil
- 1953 : Convention signée

Chaque Etat membre paye selon ses moyens



Signalons l'originalité du financement de l'organisation pour ce qui est de l'investissement et du fonctionnement. La Convention précise : la contribution des pays est calculée sur une base du produit intérieur brut. Ainsi chaque état membre paye selon ses moyens

Une brève histoire du CERN

- 1954 : premier coup de pelle

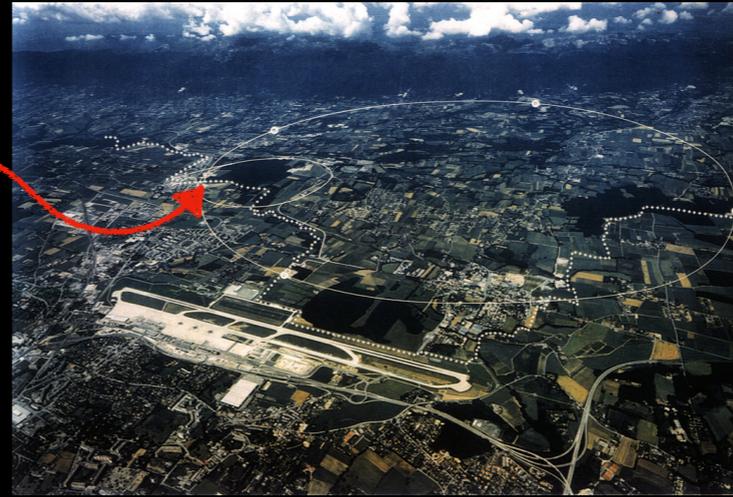
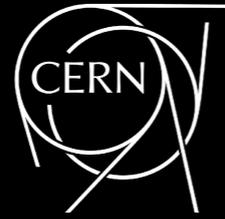


Le premier coup de pelle fut donné le 17 mai 1954 à Meyrin, banlieue de Genève à deux pas de la frontière française.

Le 29 septembre le conseil provisoire est dissout et naît officiellement l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire qui conserve le sigle CERN.

Une brève histoire du CERN

- 1954 : premier coup de pelle



Une brève histoire du CERN

$$E_p = 0,6 \text{ GeV}$$
$$v = 0,80 \times c$$

- 1954 : premier coup de pelle
- 1957 : premier accélérateur



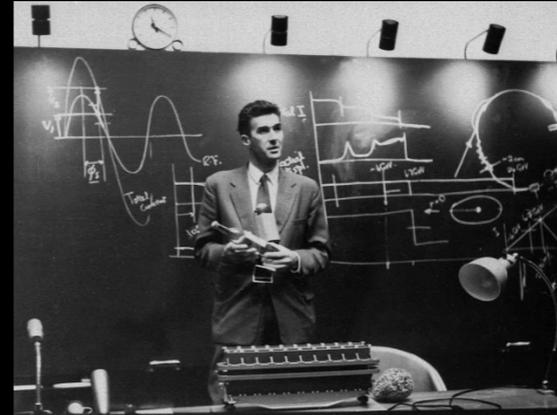
Pour se faire la main dans la construction d'accélérateurs et sans chercher à rivaliser dans un premier temps avec les USA ou l'URSS (on appela cela le réalisme pessimiste animé notamment par Niels Bohr), le CERN réalise un premier accélérateur relativement modeste et plutôt facile à construire : le synchrocyclotron de proton 600 MeV (80% de la vitesse de la lumière, 237.000 km/s) qui sera opérationnel jusqu'en 1990, soit 33 ans de bons et loyaux services pour un riche programme aussi bien en physique nucléaire qu'en physique des particules.

Un synchrocyclotron est un cyclotron dont la fréquence du champ électrique est changée (progressivement diminuée) pour compenser le gain de masse des particules accélérées pendant que leur vitesse commence à approcher la vitesse de la lumière.

Une brève histoire du CERN

$$E_p = 28 \text{ GeV}$$
$$v = 0,999 \times c$$

- 1954 : premier coup de pelle
- 1957 : premier accélérateur
- 1959 : premier champion du monde



Mais les ambitions des physiciens étaient et ne cessera jamais d'être de disposer de collisions de particules à des énergies toujours plus élevées. S'appuyant sur l'expérience acquise, ce qui servira jusqu'à nos jours de fil conducteur au CERN, un nouvel accélérateur, le synchrotron à proton, est conçu. Dès 1959 il accélère ses premiers protons à 28 GeV (un saut d'un facteur de près 50, 24 novembre, 99,9% de la vitesse de la lumière, 299.000 km/s). 6 ans après sa création, le CERN dispose ainsi de l'accélérateur le plus puissant au monde.

Aujourd'hui le PS est toujours opérationnel et fait partie de la chaîne d'accélérateurs du CERN.

Photo : John Adams (DG), bouteille de vodka envoyé par les russes de Dubna à boire lorsque le CERN dépassera l'accélérateur de Dubna (10 GeV)

Une brève histoire du CERN

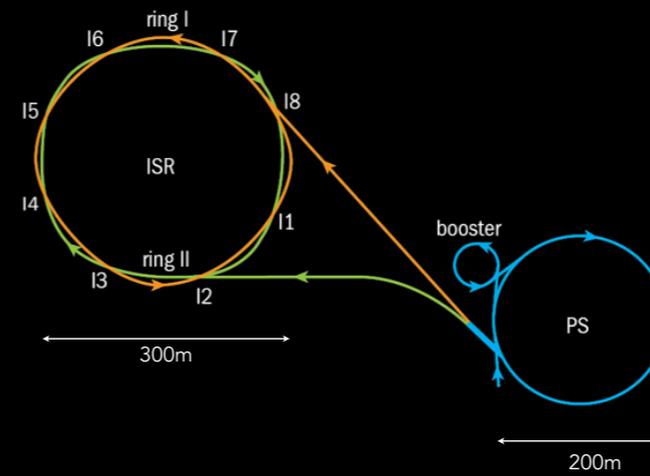
$$E_p = 2 \times 28 \text{ GeV}$$

$$v = 0,999 \times c$$

- 1954 : premier coup de pelle
- 1957 : premier accélérateur
- 1959 : premier champion du monde
- 1971 : des protons entre en collision

$$E_{CM} = \sqrt{2M_p c^2 E_{lab}}$$


$$E_{CM} = E_{lab} + E_{lab}$$

Un nouvelle étape est franchie, non pas en augmentant l'énergie des particules mais en modifiant le mode de collisions. Avec le PS seul, le faisceau de proton frappe une cible, par exemple de l'H₂, fixe. Dans ce mode de fonctionnement, pour atteindre une énergie disponible dans une collision entre deux protons il faudrait accélérer un des deux protons à 1000 GeV. Cependant, il est possible d'obtenir un important gain en énergie en réalisant des collisions frontales entre les deux protons, tous deux accélérés. Pour ce faire, les ingénieurs du CERN conçoivent un nouvel équipement : des anneaux de stockage. Les protons accélérés par le PS sont accumulés à énergie constante dans ces anneaux et lorsqu'un nombre suffisant de particules est accumulé on fait croiser les deux faisceaux pour obtenir des chocs frontaux. Ainsi il suffit d'accélérer les deux faisceaux de protons à 22 GeV pour disposer de la même énergie (2 x 22 GeV) que celle disponible avec le bombardement d'un seul faisceau accéléré sur une cible fixe. 27 janvier 1971

cible fixe : énergie utile pour un proton de 1000 GeV $E_{CM} = 43 \text{ GeV}$.

collisions : deux protons de $E_{lab} = 22 \text{ MeV}$ qui se rencontrent donnent $E_{CM} = 44 \text{ GeV}$.

Une brève histoire du CERN

$$E_{p,A} = 400 \text{ GeV}$$
$$v = 0,999998 \times c$$

- 1954 : premier coup de pelle
- 1957 : premier accélérateur
- 1959 : premier champion du monde
- 1971 : des protons entre en collision
- 1976 : une nouvelle référence

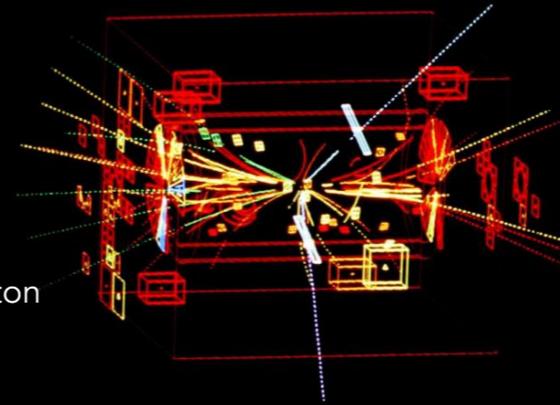


En 1976, un nouvel accélérateur est ajouté à la chaîne d'accélération du CERN, le SPS, super proton synchrotron. Dans cette anneau de 7km de circonférence les protons, accélérés jusqu'à 400 GeV, 14 fois plus que le PS, atteignent la vitesse vertigineuse de 299791,858 km/s (99,9998% de la vitesse de la lumière) et font le tour des 7 km 42827 fois par seconde. Très versatile, il permet d'accélérer des noyaux (soufre, oxygène), des électrons, des positrons des protons des antiprotons et d'élargir ainsi le programme de physique : le plus grand laboratoire de physique des particules au monde, s'adjuge un nouveau record et devient le plus grand laboratoire de physique des ions lourds. Un nouveau programme de physique ouvre ainsi l'exploration de la matière primordiale telle qu'elle existait pour un bref instant, quelques dizaines de microsecondes après l'instant initial du modèle du Big Bang.

Une brève histoire du CERN

- 1954 : premier coup de pelle
- 1957 : premier accélérateur
- 1959 : premier champion du monde
- 1971 : des protons entre en collision
- 1976 : une nouvelle référence
- 1983 : un proton rencontre un anti-proton

$$E_p = 2 \times 400 \text{ GeV}$$
$$v = 0,999998 \times c$$

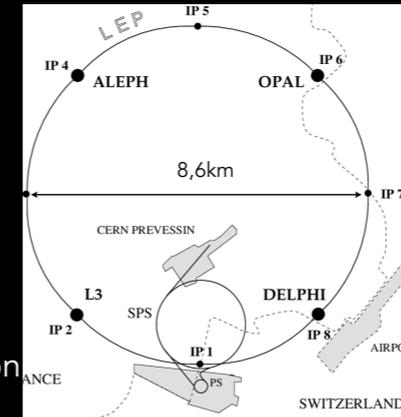


Comme je l'ai déjà raconté, en 1981 vint l'idée géniale de Carlo Rubia de transformer l'accélérateur SPS en un collisionneur proton-antiproton grâce à une technologie innovante tout aussi géniale (refroidissement stochastique) pensée par Simon Vande Meer qui permit en 1983 la découverte des bosons W et Z vecteurs de l'interaction faible (voir le cours de la semaine dernière). C'est la première particule découverte par le CERN, mais quelle particule ! Elle confirme la théorie électrofaible, l'unification des forces faible et électromagnétique, et valide l'histoire de l'Univers que la physique sait raconter à partir du moment où l'Univers n'était âgé d'à peine un millionième de milliardième de seconde. Cette découverte fondamentale a été saluée par le comité Nobel, le premier prix Nobel du CERN, exactement 30 ans après sa création.

Une brève histoire du CERN

- 1954 : premier coup de pelle
- 1957 : premier accélérateur
- 1959 : premier champion du monde
- 1971 : des protons entre en collision
- 1976 : une nouvelle référence
- 1983 : un proton rencontre un anti-proton
- 1989 : rencontre violente d'un électron et d'un positon

$$E_p = 2 \times 209 \text{ GeV}$$
$$v = 0,99999 \times c$$



Et ce n'est pas fini ! La course à la recherche du boson de Higgs, dont l'existence a été suggérée en 1964, est lancée en 1989, le 14 juillet (cocorico) avec la mise en route du plus grand accélérateur jamais construit au monde. Cette fois, ce sont des électrons et des positons, particules élémentaires contrairement au proton, qui sont accélérés à une énergie de 209 GeV et se rencontrent violemment et fatalement à la vitesse de ... à peine moins que la vitesse de la lumière. Pendant 11 ans, des centaines de chercheurs fouilleront scrupuleusement et sans succès la masse de données accumulées jour et nuit sur de longues périodes pour à la recherche du boson de Higgs qui jouait à l'Arlésienne. Malgré ce demi-échec, la moisson fut néanmoins fructueuse : elle permit de consolider le MS avec une précision inédite.

Une brève histoire du CERN

- 1954 : premier coup de pelle
- 1957 : premier accélérateur
- 1959 : premier champion du monde
- 1971 : des protons entre en collision
- 1976 : une nouvelle référence
- 1983 : quand un proton rencontre un anti-proton
- 1989 : rencontre violente d'un électron et d'un positon

$$E_e = 2 \times 209 \text{ GeV}$$
$$v = 0,99999 \times c$$

Où se cache le boson de Higgs ?

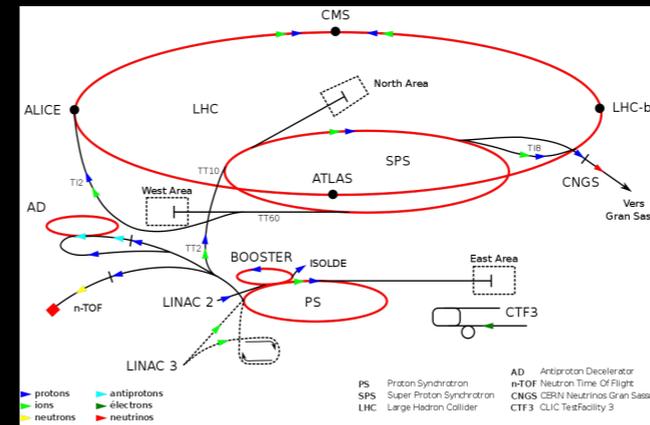
The image shows a complex mathematical expression for the Higgs potential, $V(\phi)$. It includes terms for the Higgs field ϕ , gauge fields W and Z , and fermions f . The equation is highly technical and represents the full Lagrangian of the Standard Model, specifically the part related to the Higgs mechanism and mass generation.

Quant au boson de Higgs, le seul endroit où l'on pouvait le trouver était dans les équations des théoriciens.
Mais patience, le LEP fut arrêté en 2000 (2 novembre, jour des morts) pour laisser la place à son successeur

Une brève histoire du CERN

- 1954 : premier coup de pelle
- 1957 : premier accélérateur
- 1959 : premier champion du monde
- 1971 : des protons entre en collision
- 1976 : une nouvelle référence
- 1983 : quand un proton rencontre un anti-proton
- 1989 : rencontre violente d'un électron et d'un positon
- 2008 : le seigneur des anneaux

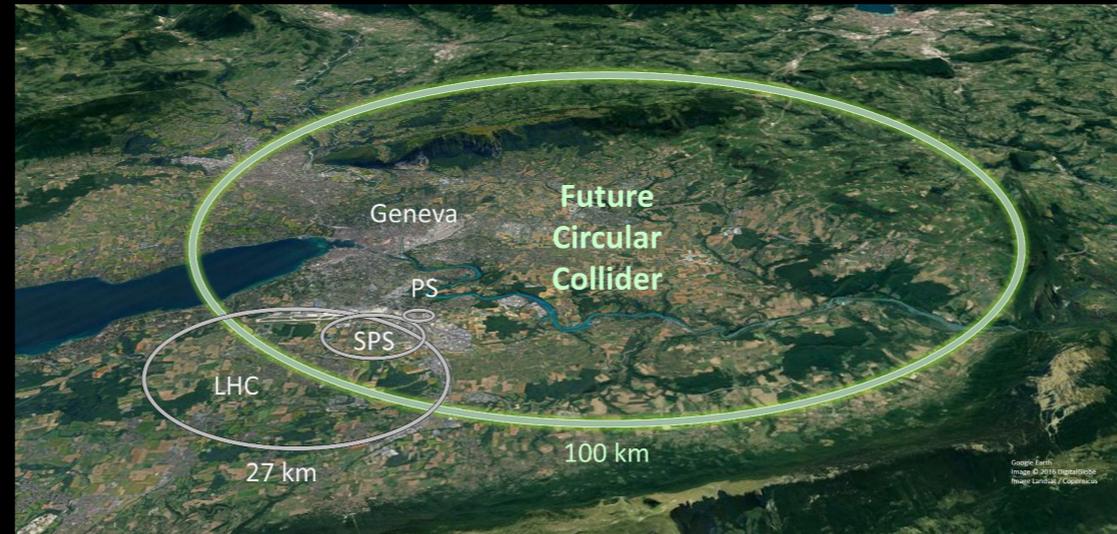
$$E_p = 2 \times 7000 \text{ GeV}$$
$$v = 0.9999991 \times c$$



Le plus récent des accélérateurs, aujourd'hui encore en pleine activité, tel le coucou, fait son nid dans le tunnel du LEP, épargnant ainsi aux contribuables le coût d'une onéreuse opération de génie civil. Le tour de chauffe reste le même, là aussi source de substantiels économies. On revient aux protons que ce nouvel accélérateur, le LHC, propulse à une énergie encore jamais atteinte et aujourd'hui encore inégalée de 7 TeV (les protons parcourent 11245 fois par seconde une boucle de 27 km de circonférence à une vitesse quasiment égale à celle de la lumière). Des milliers de scientifiques accumulent 24h/24, 300 jours/an une quantité de données au volume hallucinant (l'équivalent d'une pile de DVD de la hauteur du Mont Blanc chaque année) et en 2012, 2 ans après le démarrage, débusquent le boson de Higgs, le briseur de symétrie qui donne de la masse aux particules, 48 ans après que son existence a été postulée pour la première fois. C'est le triomphe du MS... et du CERN. L'existence de la transition de phase qu'a subit l'univers âgé d'à peine 1 pico seconde est empiriquement prouvée.

Le CERN en 2040 ?

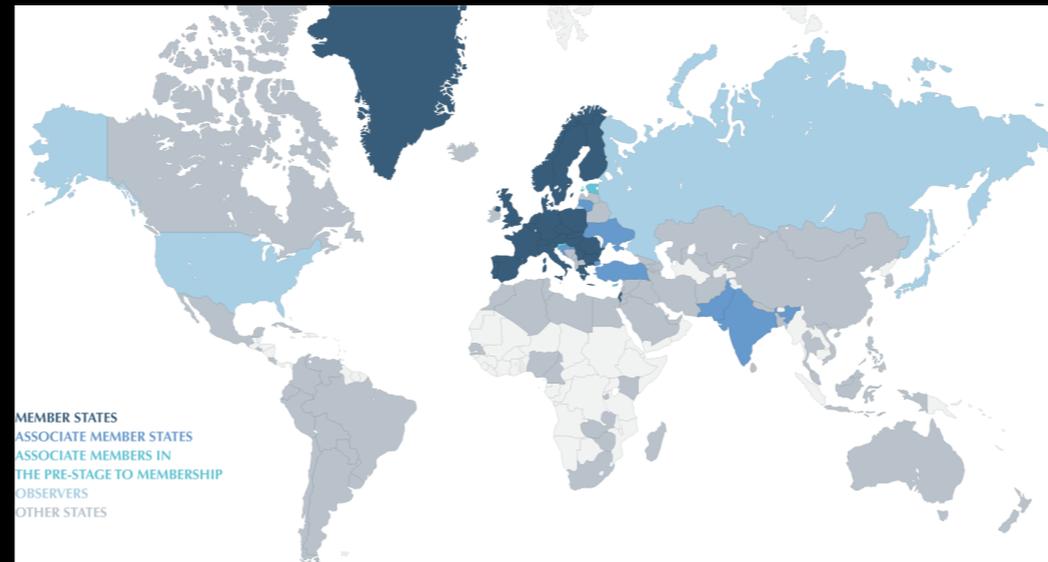
$$E_{p,e} = 2 \times 100 \text{ TeV}$$
$$v = 0.999999999995 \times c$$



Le CERN pourrait reprendre à son compte la devise olympique : « citius, altius, fortius ». Alors que d'importantes améliorations du LHC sont d'ors et déjà programmées pour augmenter ses performances et enrichir son programme de physique, les études pour un nouvel accélérateur sont déjà en cours, pour l'horizon 2040 ? Délirant ? Les paris techniques sont osés mais non irréalistes, reste à savoir ce qu'en dit le contribuable ?

Le CERN aujourd'hui

Une collaboration mondiale



Justement à propos de contribuable ...

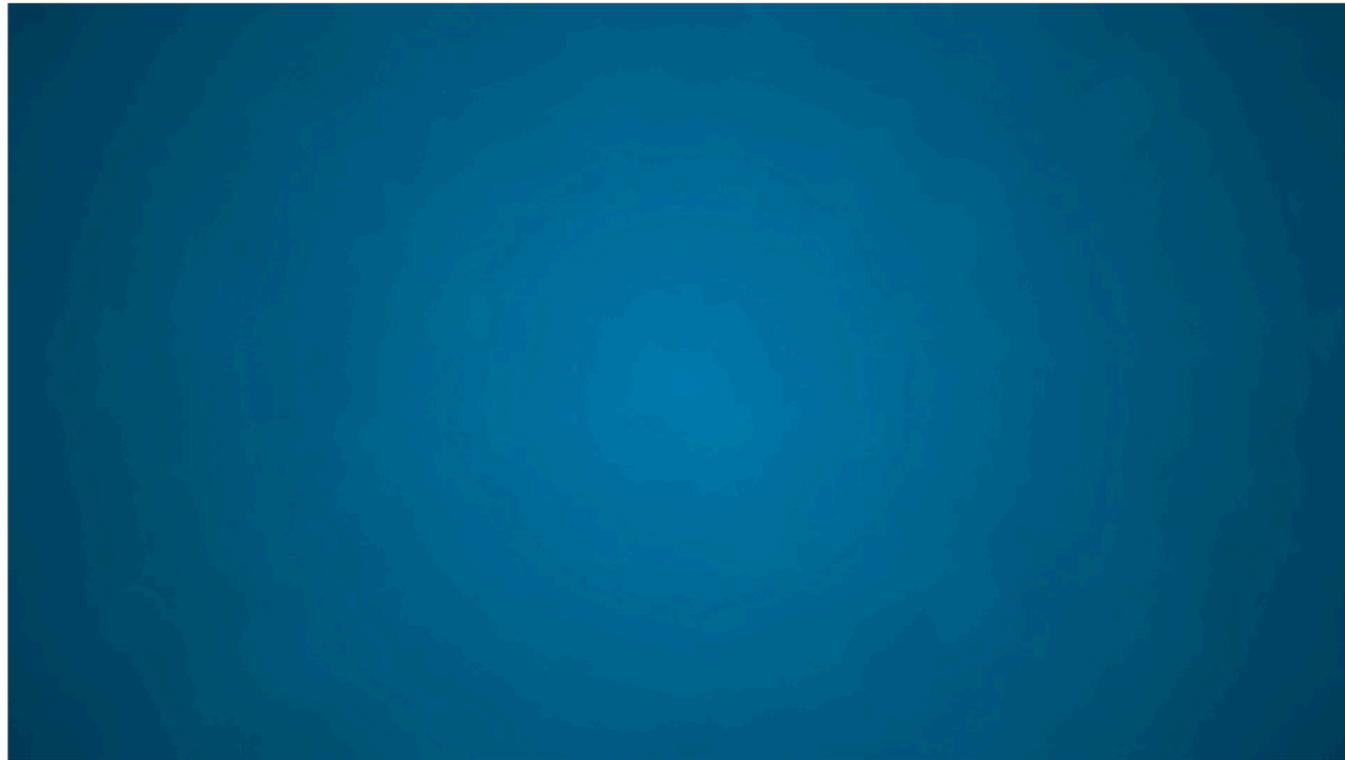
Le budget annuel du CERN est de l'ordre de 1,2 milliards d'€ ce qui est équivalent au coût d'une tasse de café (à Genève) par habitant des 23 pays membres.

Ce budget permet au CERN d'accomplir sa mission principale : construire des accélérateurs, maintenance du site, coût de l'énergie consommée, salaire des personnels....

En plus des états membres et associées, tout pays peut participer aux activités scientifiques du CERN au travers de collaborations (mise en commun de moyens financiers et humains pour la réalisation d'un programme scientifique donné).

Comment ça marche : vous avez une idée, trouvez des collaborateurs, montez un projet, chiffrez le projet, persuadez un comité impartial de l'intérêt scientifique et de la faisabilité de votre projet, si OK réalisez le montage financier, démarrez la R&D, convainquez sans cesse des experts impartiaux de la validité technique du projet, démarrez la construction jalonnée par des expertises extérieures, entourez vous de suffisamment de compétences scientifiques, techniques et en diplomatie pour gérer une communauté internationale, et une vingtaine d'années plus tard votre projet devrait porter ses premiers fruits.

Environ 15000 collaborateurs dans le monde travaillent régulièrement avec le CERN.



40 millions de collisions par seconde

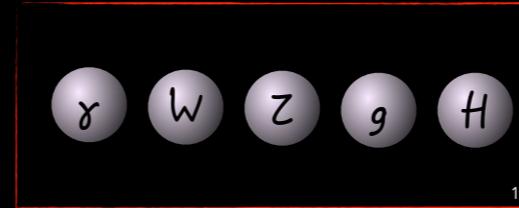
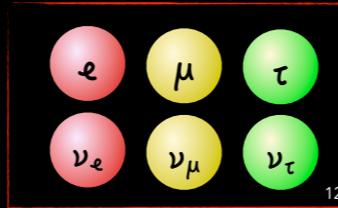
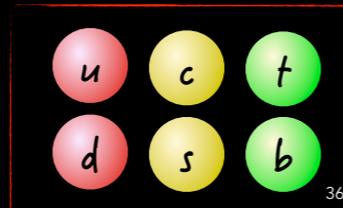
Pourquoi accélérer ?

- Comprendre la vraie nature des lois fondamentales
- Les collisions à très haute énergie recréent les conditions de l'univers primordial

La question que vous ne manquerez pas de poser est de savoir quel est le vrai objectif exigeant d'investir tant de moyens humains, techniques et financiers. Le but ultime est-il de réaliser des collisions de particules avec des énergies toujours plus incroyablement élevées simplement pour étudier dans les moindres détails avec le plus de précision possible tout ce qui peut émerger d'un processus aussi violents ? Comme vous pouvez vous en douter, la motivation est bien plus profonde et certainement autrement plus ambitieuse : découvrir la vraie nature des lois fondamentales qui sont à l'oeuvre dans l'Univers, et pourquoi pas essayer de savoir pourquoi l'Univers existe, (Leibnitz : pourquoi existe-il quelque chose plutôt que rien ?), et pourquoi l'Univers est tel qu'il est, le seul Univers possible qui nous permet aujourd'hui de nous poser ces questions (Leibnitz : le meilleur des Univers possible).

Grâce aux collisions nous pouvons créer dans un tout petit volume et pendant une durée très brève des conditions physiques extrêmes, très hautes températures et très grandes densités d'énergie, précisément les conditions physiques qui étaient celles de l'univers primordial. Plus importante est l'énergie disponible dans ces collisions, plus nous nous rapprochons de l'instant initial de l'Univers : un vrai voyage dans le temps. Et puisque les lois de la physique n'ont pas changé au cours du temps, les phénomènes que les physiciens voient se dérouler sous leurs yeux sont exactement ceux qui se sont déjà produits dans le passé très lointain de l'univers. Les particules créées lors des collisions revivent brièvement les phénomènes auxquels elles participaient dans la prime jeunesse de l'univers.

Ce que nous savons

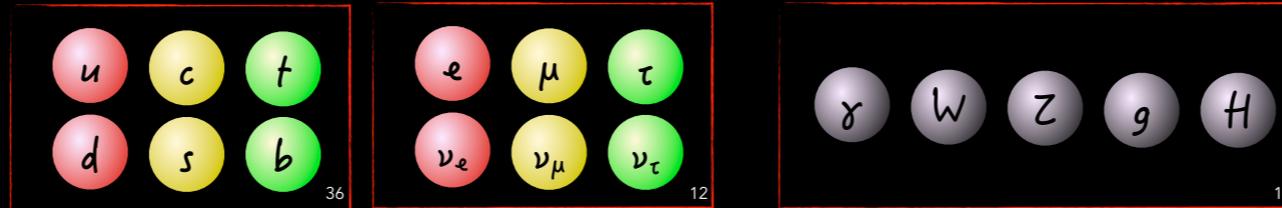


$$\mathcal{L}_{MS} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}D\psi + \text{h.c.} + \bar{\psi}_i\gamma_{ij}\psi_j\phi + \text{h.c.} + |D_\mu\phi|^2 - V(\phi)$$

Revenons une dernière fois sur ce tableau qui résume tout ce que nous savons aujourd'hui sur la structure la plus intime de la matière. Il y a des particules élémentaires de matière et des particules élémentaires de force qui sont, comme nous l'avons vu la semaine dernière, l'émanation, on parle de quanta, d'entités encore plus élémentaires, les champs quantiques.

La dynamique de ces particules est décrite par une théorie s'appuyant sur les principes premiers (principes qui ne s'expliquent pas par quelque chose d'encore plus fondamental) que sont les symétries, le MS, chef d'oeuvre de l'esprit humain. Jamais pris en défaut, le MS a résisté jusqu'à présent à tous les tests expérimentaux dans le domaine d'énergie accessible actuellement. Mais au delà, c'est-à-dire lorsque les énergies plus élevées nous permettront de regarder davantage encore dans le passé de l'Univers, le MS aura-t-il encore réponse à tout ? La question reste ouverte. Mais malgré ses indéniables succès, le MS soulève bien trop de questions pour oser affirmer que nous savons tout.

Ce que nous ne savons pas



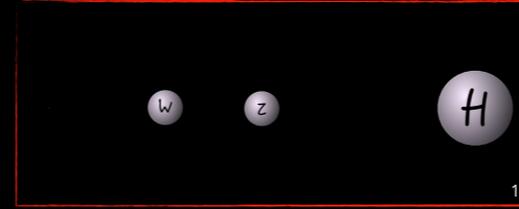
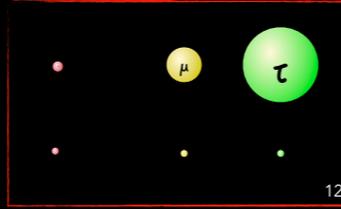
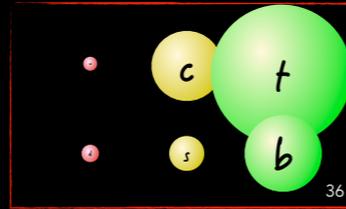
- 3 générations de fermions
- Des symétries arbitraires
- Des neutrinos à part

Trop d'ingrédients du MS proviennent de faits empiriques : le MS inclut des boutons d'ajustement dont le seul but est de reproduire les résultats de l'expérience. Tant que l'on n'aura pas compris pourquoi ces variables d'ajustement ont les valeurs qu'elles ont, on ne saura rien du pourquoi de l'Univers et on ne saura pas quel est le génial mécano qui a su si finement ajuster tous ces paramètres. Ou alors le mécano aurait-il aléatoirement fait un grand nombre d'essais d'Univers chacun avec des ajustements différents et dont un seul, le notre, aurait été une réussite.

Il y a les 3 générations de fermions, les symétries arbitraires sur lesquelles le modèle repose, symétries qui de plus sont brisées par l'existence du champ de Higgs, les neutrinos des particules pas tout à fait comme les autres (le modèle standard dit que leur masse est nulle, l'expérience que la masse n'est pas nulle mais très petite ... 0.01-0.1 eV, 10.000 à 100.000 fois plus petite que la masse de l'électron) Finalement il reste 26 paramètres dans le modèle (quand on ne sait pas, on introduit de façon arbitraire ce qu'il faut dans le modèle pour reproduire l'expérience).

Ce que nous ne savons pas

Hiérarchie des masses - symétries brisées

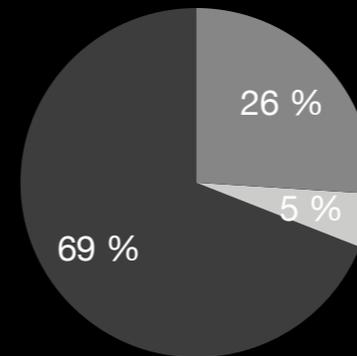


Parmi ces paramètres, ceux qui paraissent les plus arbitraires sont les valeurs des masses acquises par les particules par interaction avec le champ de BEH qui non seulement brisent une symétrie mais encore sont toutes très différentes les unes des autres.

Ce que nous ne savons pas

De quoi l'Univers est-il fait ?

● Matière Noire ● Matière ordinaire
● Energie Noire ●



Et puis ce au sujet de quoi nous nous posons encore tant de questions ne représente qu'une toute petite partie de l'univers. Nous pensons en effet aujourd'hui que l'univers n'est composé que de 5% de cette matière qu'on va appeler matière ordinaire. A laquelle il faut ajouter un type de matière dont nous ne savons rien et qu'on appelle la matière noire (on ne la voit pas mais on observe ses effets gravitationnels) et qui représenterait, selon nos observations, 26% de la matière. Le restant soit 69% de la masse totale de l'univers serait attribué à quelque chose de plus mystérieux encore et qu'on appelle l'énergie noire dont l'existence a été postulée suite à des observations expérimentales (accélération de l'expansion de l'univers). Les faits sont là, mais on ne sait pas les expliquer dans le cadre des modèles existants.

Ce que nous ne savons pas

Asymétrie matière-antimatière dans l'univers

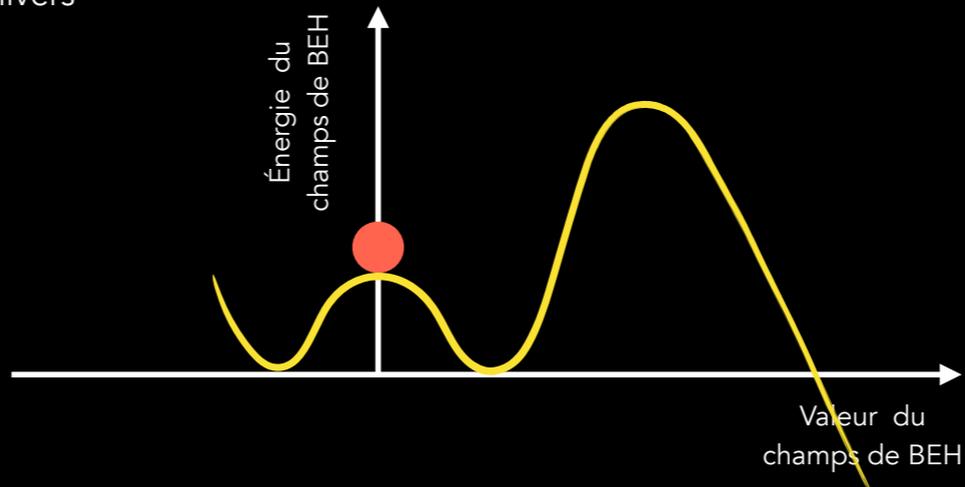


Parmi les mystères que nous ne savons toujours pas dévoiler, quelques uns peut-être pourront être résolus par les mesures à venir auprès du LHC.

- pourquoi la matière de l'univers existe-elle exclusivement sous forme de matière avec une absence totale d'anti matière. Comment l'anti matière a-t-elle disparue alors que la théorie du BB nous suggère que matière et anti-matière existaient à part égale Au tout début de son histoire ?

Ce que nous ne savons pas

Stabilité de l'univers



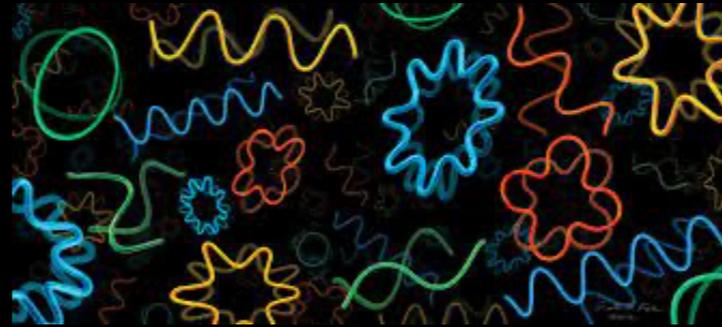
Nous avons vu la semaine dernière comment l'Univers a choisi de se mettre dans un état plus stable et de plus basse énergie : le coup du sombrero. Cette transition de phase a brisé la symétrie électrofaible, a dissocié l'interaction faible et l'interaction EM et a donné de la masse aux particules.

D'après le modèle standard la valeur actuelle du champ de Higgs (246 GeV) n'a pas l'énergie la plus basse et n'est donc pas le vrai état de vide de l'univers. Il se pourrait donc que par effet tunnel l'univers pourrait un jour changer d'état pour adopter son vrai état de vide. Ce qui condamnerait inévitablement l'existence de l'Univers. Mais pas de panique, avant que cela n'arrive les calculs indiquent que l'univers pourrait rester dans son état actuel pour une durée supérieure de quelques ordres de grandeur à son âge actuel. Mais nos calculs pourraient aussi bien être faux et qu'il n'existe pas d'autre état du vide.

Définition du vide : l'état de plus basse énergie qui puisse être atteint en l'absence de particules physiques.

Ce que nous ne savons pas

Particules élémentaires ... vraiment ?



Le MS nous décrit la matière telle que nous avons pu la sonder aux échelles accessibles avec les accélérateurs existants (10^{-17} cm avec LHC). Il néglige des phénomènes actuellement inconnus qui pourraient apparaître si nous étions capables de sonder les distances plus courtes. Il existe une relation inverse entre l'échelle des longueurs et l'énergie en physique quantique, qu'on doit au principe d'incertitude. Pour être capables de sonder à une certaine échelle de longueurs, nous avons besoin de particules ou de rayonnement dont l'énergie dépasse un certain seuil. Pour aller à des distances toujours plus courtes, nous avons besoin de particules de plus en plus haute énergie.

Les phénomènes nous échappant encore pourraient concerner non seulement des sortes de particules élémentaires mais aussi des forces jusqu'ici inconnues. Ou il pourrait s'avérer que les principes de base de la mécanique quantique sont faux et appellent des modifications pour décrire correctement des phénomènes restant tapis dans les longueurs plus courtes et les énergies plus élevées.

Ce que nous ne savons pas

Infiniment petit et infiniment grand ... irréconciliables ?

Et puis, il y a peut être le plus gros des problèmes : le MS n'inclut pas la gravité ou la RG n'inclut pas la MQ ! En terme savant, on dit que la théorie classique de Einstein ne peut pas être fondue en une théorie quantique des champs renormalisable (i.e. une théorie dont les termes infinis ne peuvent pas être mathématiquement supprimés). Sans cette théorie, nous sommes incapables de dire à quoi ressemblait l'Univers à l'échelle de Planck, c'est-à-dire lorsque la taille de l'Univers (visible) n'était que de 10^{-35} m ce qui est arrivé lorsque l'Univers n'était âgé que 10^{-43} secondes en supposant bien sûr que l'univers ait une origine au temps 0. Il existe des pistes qui pourraient résoudre ce problème (théorie des cordes/supersymétrie), aucune n'a pus être validée jusqu'à récent par l'expérience (existence d'un nouveau type de particules, les particules symétriques, existence de dimensions supplémentaires au delà des 3 dimensions d'espace et du temps, ...)

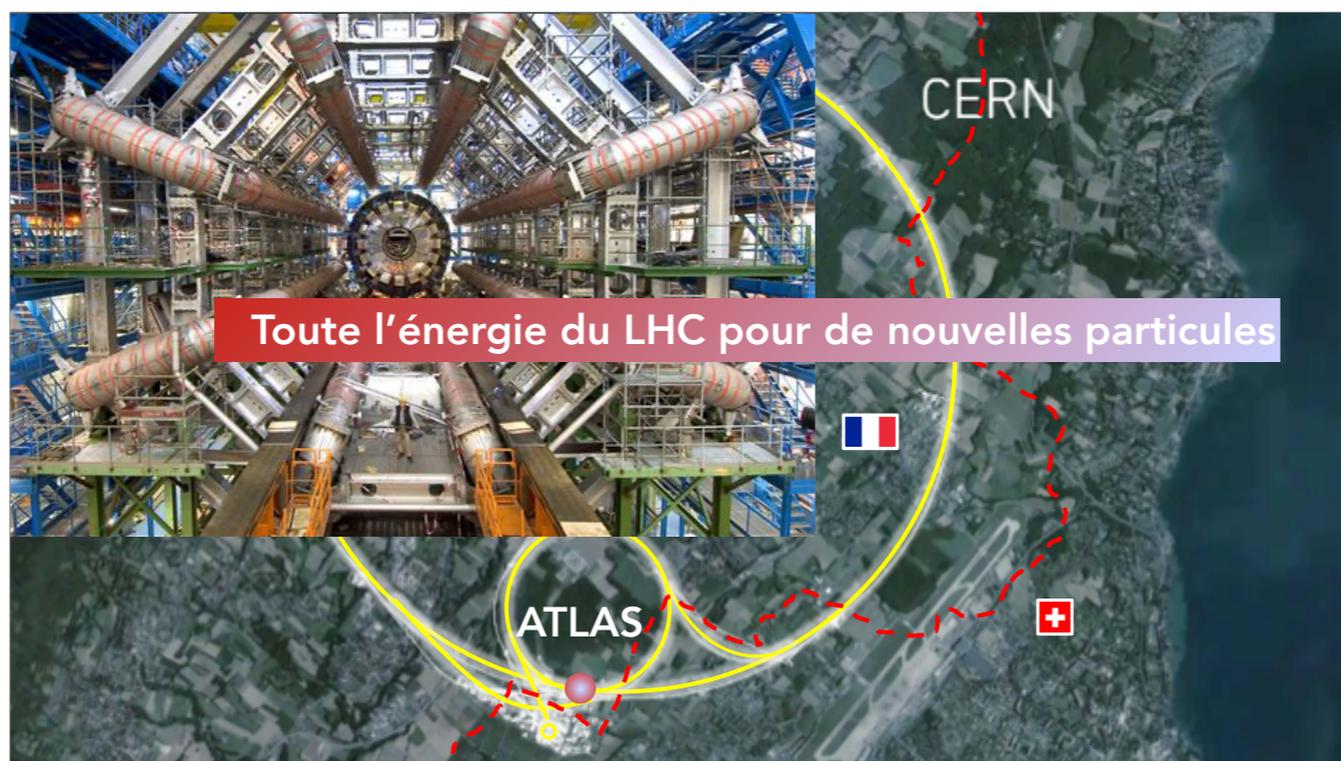
Ce que nous ne savons pas

Particle Physics Origin Story



"We Have No Idea!"
Book available now!
wehavenoidea.com

Et voilà pourquoi les hommes consacrent tant d'efforts et de moyens à la construction d'accélérateurs toujours plus puissant depuis le début du XXème siècle.

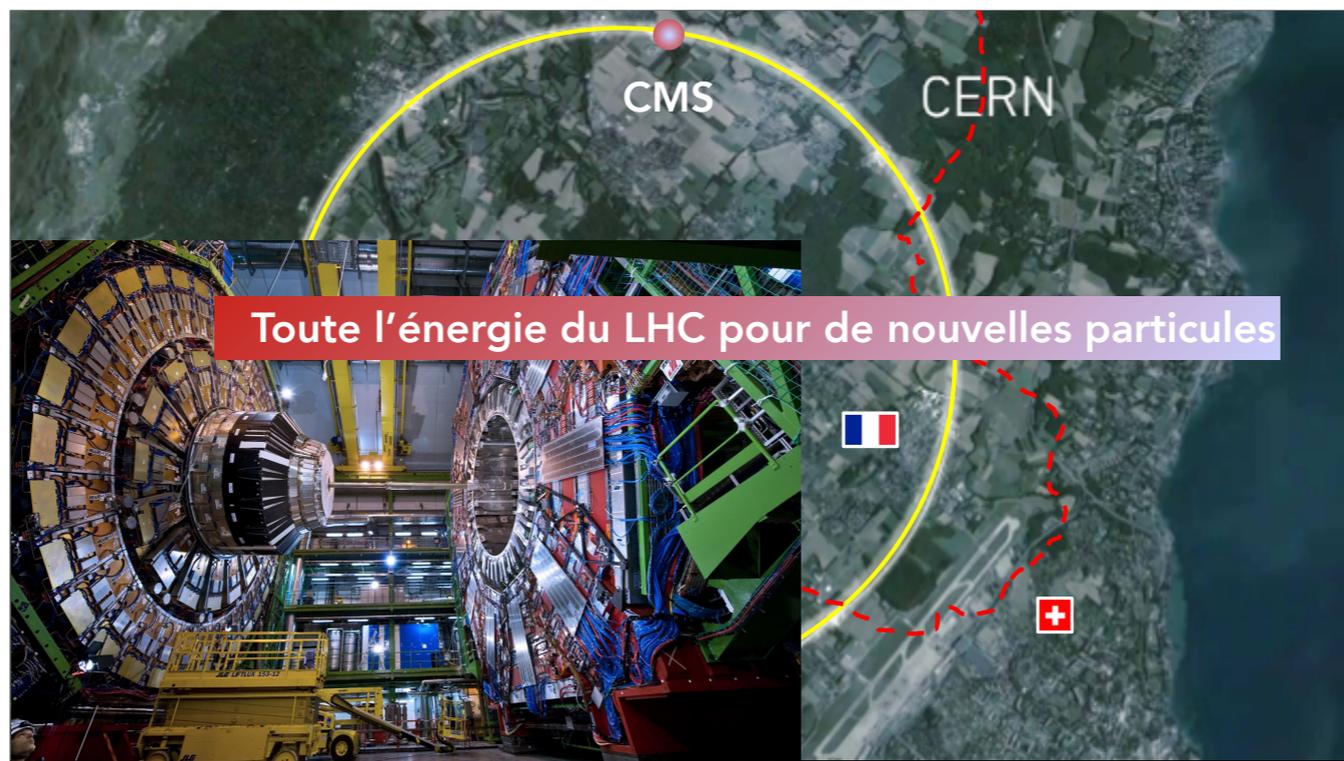


Trois stratégies sont développées au CERN pour tenter de lever le voile sur certains de ces mystères.

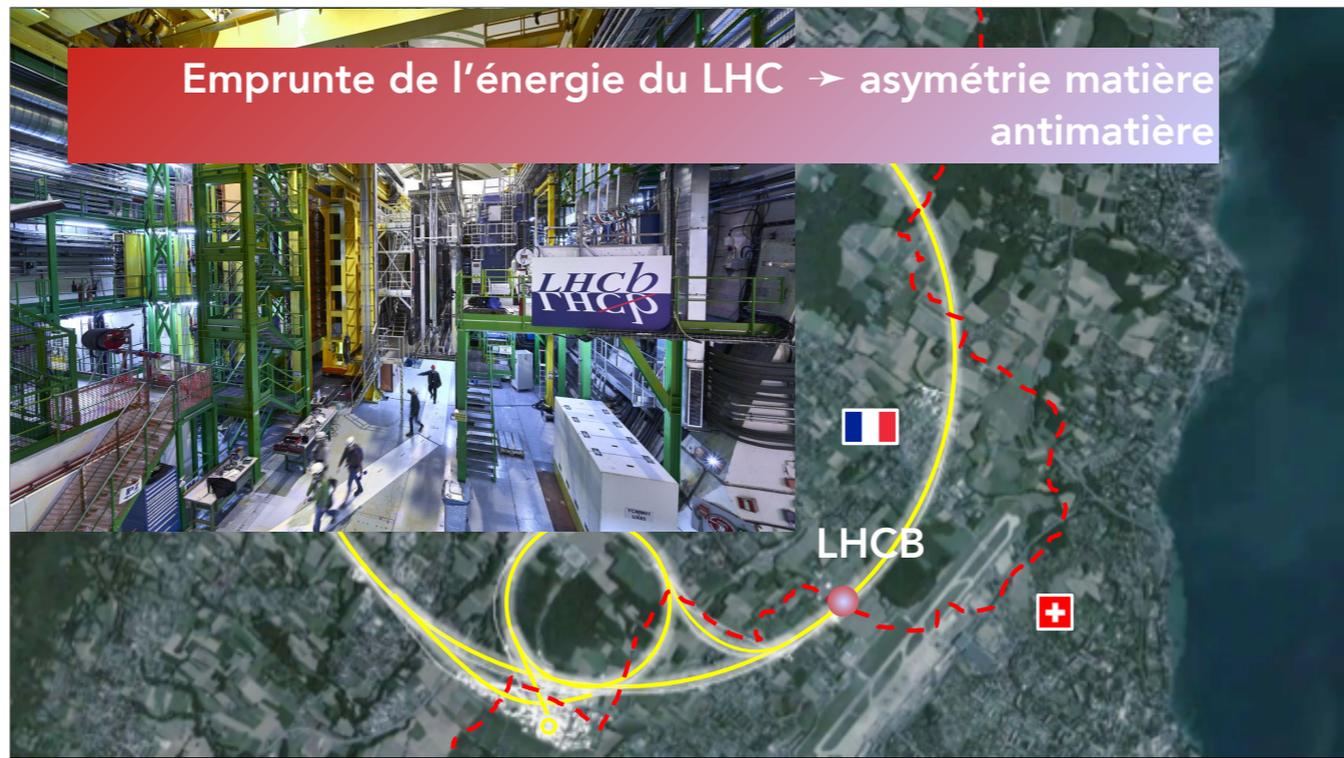
Pour faire simple elles consistent soit à utiliser toute l'énergie disponible dans les collisions pour créer de nouvelles particules.

Rappelons que lorsque deux protons (sacs de billes) se rencontrent, la vraie collision a lieu entre quarks (billes).

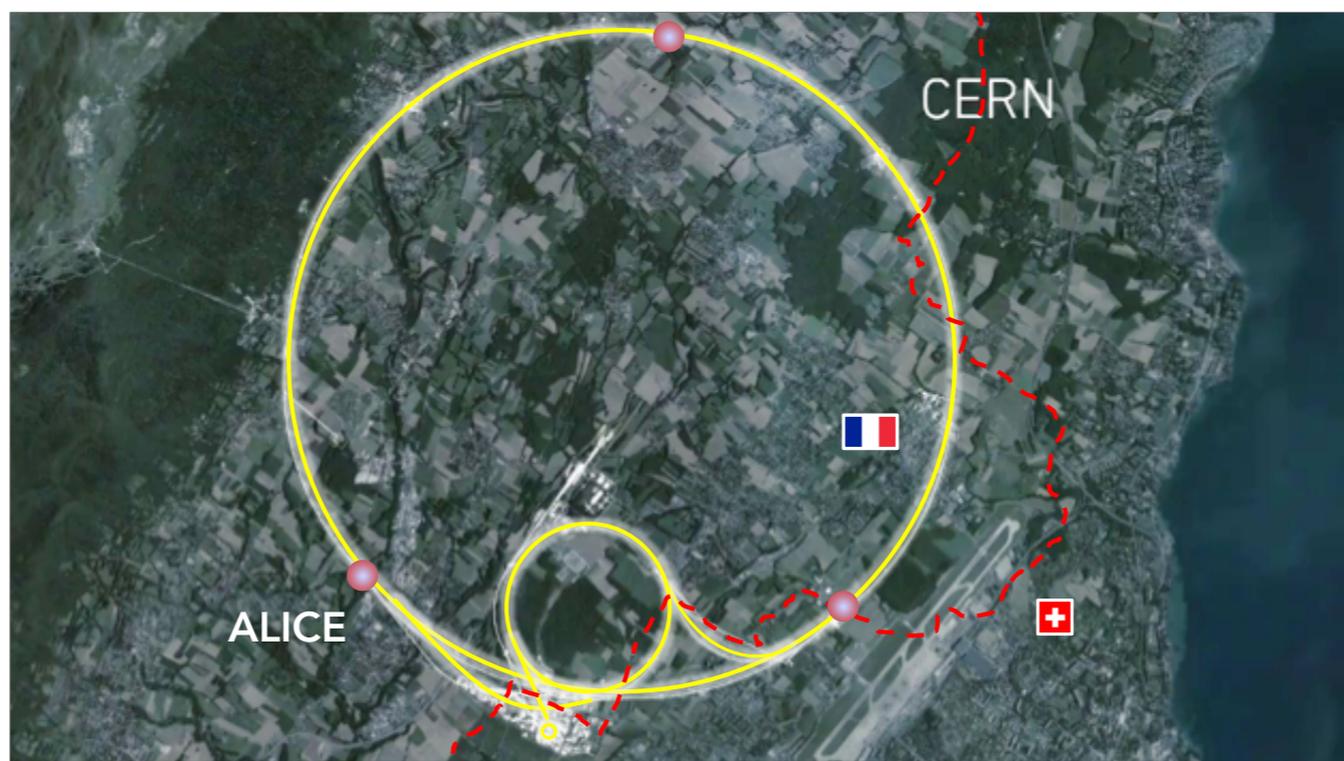
C'est l'option retenue par les deux expériences généralistes ATLAS et CMS. Ce sont des expériences visant une découverte (ex. Boson de Higgs). Il vaut mieux être à deux à faire une même découverte, l'une pouvant confirmer de façon indépendante la découverte de l'autre.



Toute l'énergie du LHC pour de nouvelles particules



Une autre stratégie consiste à emprunter de l'énergie disponible dans les collisions, pour créer à part égale des particules de matière et des particules d'anti-matière et rechercher d'éventuelles ruptures de symétrie qui pourrait expliquer l'absence d'anti-matière dans l'univers actuel.

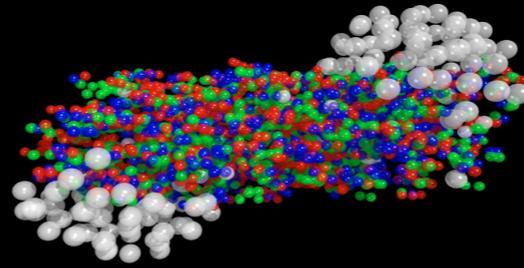


La troisième stratégie est celle pour laquelle l'expérience ALICE a été optimisée.



Recréer la matière primordiale

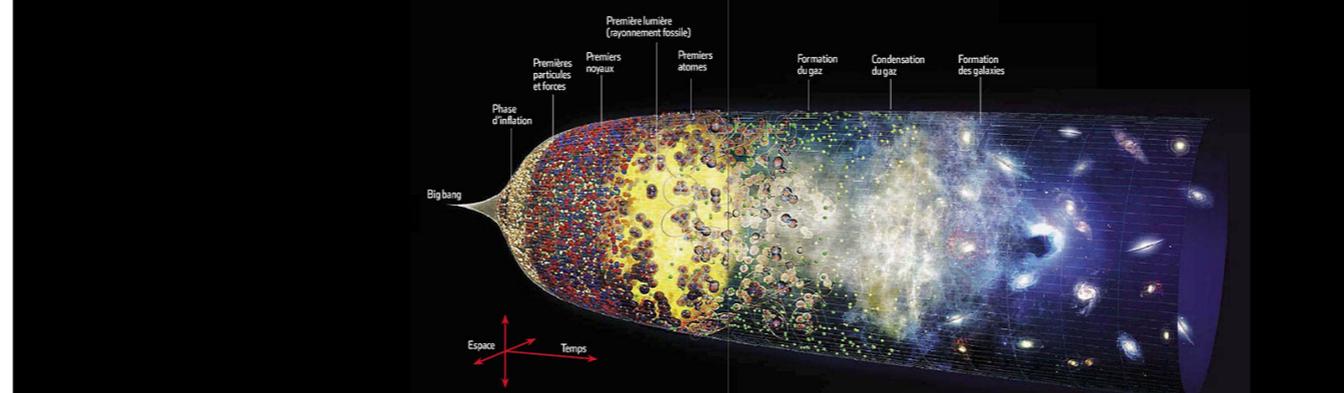
- Distribue l'énergie du LHC dans un « grand » volume



La stratégie consiste à distribuer l'énergie disponible dans un grand volume, grand par rapport à la taille d'un quark. Le volume est celui d'un noyau de Plomb que le LHC sait accélérer à l'énergie record de 2.68 TeV et des poussières.

Recréer la matière primordiale

- Distribue l'énergie du LHC dans un « grand » volume
- Densité d'énergie de l'univers primordial, $t = 10\mu\text{s}$ $T > 10^{15-13}\text{K}$

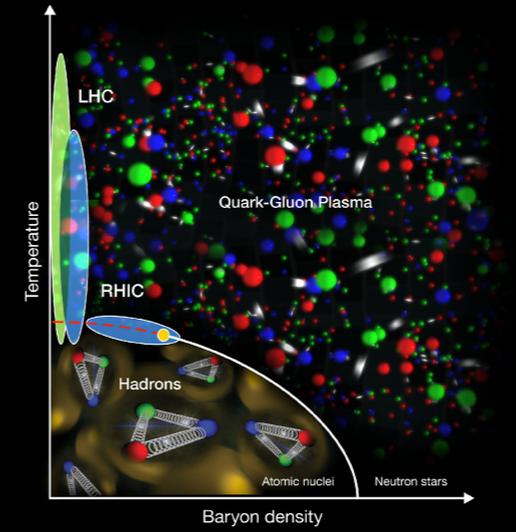


L'objectif est de réaliser les densités d'énergie suffisantes pour recréer de la matière telle qu'elle a existé pendant la première dizaine de microsecondes de l'univers lorsque les températures étaient encore trop élevées pour permettre à la matière de se structurer, laissant libre cours aux quarks. ALICE est ainsi une véritable machine à remonter le temps pour retrouver ce temps définitivement révolu où les quarks étaient encore libres.

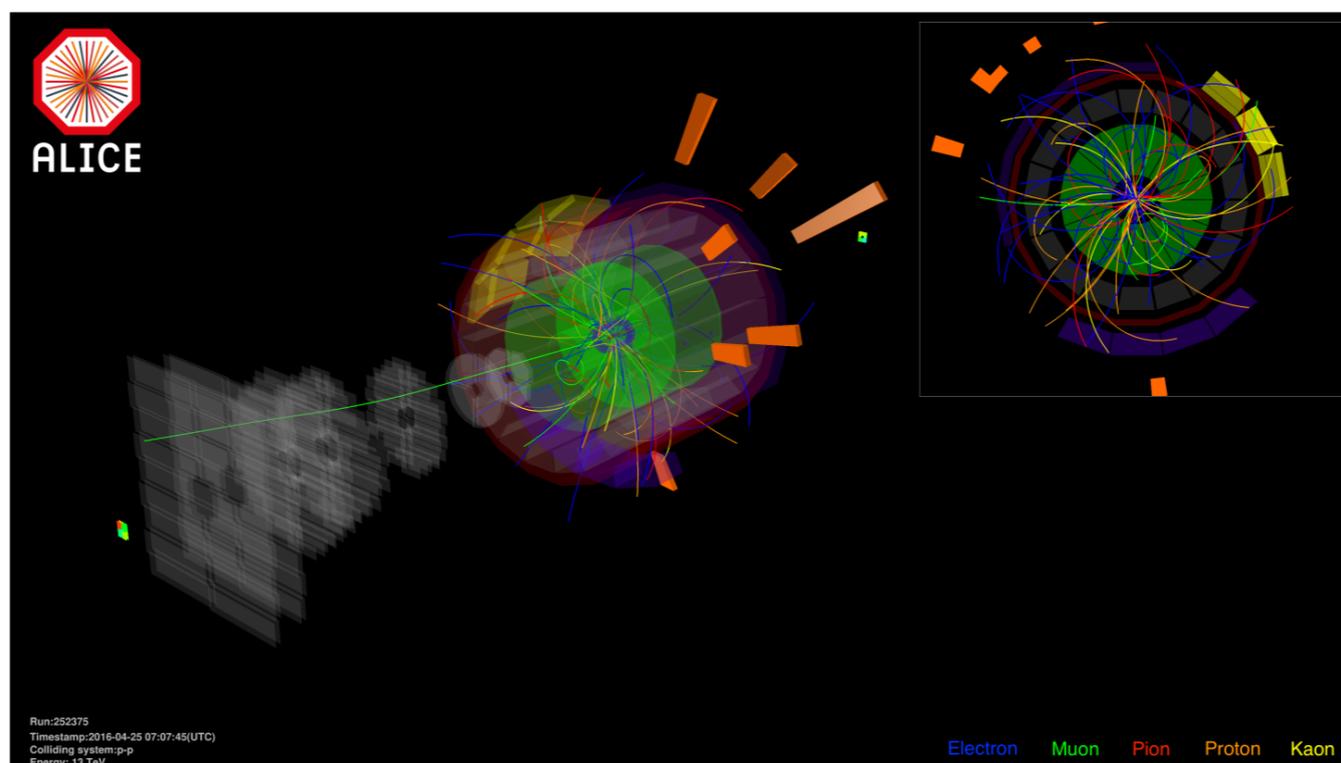
Température coeur soleil $15 \times 10^9 \text{ K}$, 100,000 fois

Recréer la matière primordiale

- Distribue l'énergie du LHC dans un « grand » volume
- Densité d'énergie de l'univers primordial, $t = 10\mu\text{s}$ $T > 10^{15-13}\text{K}$
- Matière sans structure :
des quarks et des gluons



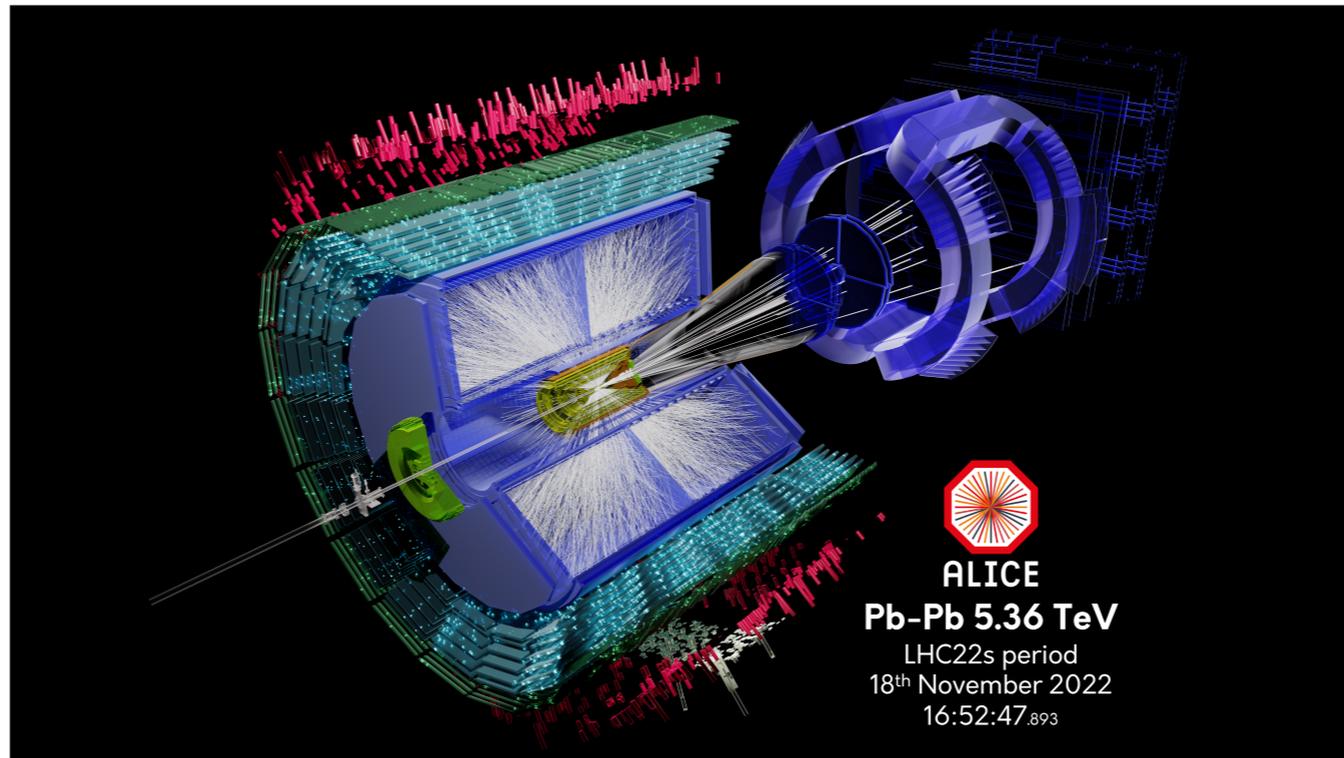
Cet état de la matière est représenté par un diagramme des phases, température vs pression, où l'on peut localiser les deux états de la matière, la matière ordinaire telle que nous la connaissons aujourd'hui et la matière primordiale aussi appelée QGP.



La matière primordiale créée dans les collisions entre noyaux de Pb est instable et reste très éphémèrement dans son état, bien trop peu de temps pour être observé directement. Les seuls témoins sont les particules « ordinaires » qui émergent de cet état.

En les observant toutes, c'est-à-dire en les identifiant une par une, les comptant, déterminant leur répartition dans l'espace, analysant comment l'énergie est distribuée entre les particules produites, on peut raconter une histoire sur l'éphémère morceau de matière primordiale produite et raconter la fraction de l'histoire de l'Univers pendant laquelle la matière structurée a émergé hors du chaos.

Tout cela est relativement facile lorsque peu de particules sont produites comme dans cette image



Mais devient beaucoup plus compliqué lorsqu'on a affaire à des images comme celle-ci où beaucoup de particules sont produites ce qui constitue justement les événements les plus intéressants.

Petit à petit, le LHC reconstruit l'histoire de l'univers, peut être l'Histoire, mais n'oublions pas ce Voltaire disait de Histoire qui raconterait le bout des choses.

Mais il y avait là, par malheur, un petit animalcule en bonnet carré qui coupa la parole à tous les autres animalcules philosophes ; il dit qu'il savait tout le secret, ... ; il leur soutint que leurs personnes, leurs mondes, leurs soleils, leurs étoiles, tout était fait uniquement pour l'homme.

Micromegas, Voltaire (1752)

Micromegas de Voltaire

Micromegas est un conte philosophique rédigé pendant le séjour à Cirey chez Mme du Châtelet (1736-1737), témoignage de l'intérêt que Voltaire a porté à l'œuvre de Newton, et sur le long terme.

Micromégas raconte le voyage interstellaire d'un géant sage et épris de sciences et de mathématiques, Micromégas, qui vient d'une planète gravitant autour de l'étoile Sirius.

Voltaire y souligne que l'homme est insignifiant, dérisoirement petit dans l'Univers, une mite philosophique, un animal chétif.

Le conte s'achève par le mémorable fou rire des géants, causé par l'intervention d'un théologien disciple de Saint Thomas d'Aquin, et qui affirme qu'«il savait tout le secret» et que «leurs personnes, leurs mondes, leurs soleils, leurs étoiles, tout était fait uniquement pour l'homme ». En cadeau final, les géants offrent aux hommes un livre censé leur expliquer le bout des choses : un livre tout blanc. Voir le bout des choses n'est pas à la portée des hommes et le livre qui pourra les éclairer définitivement restera pour toujours à écrire.

I leur promet de leur faire un beau livre de philosophie, écrit fort menu pour leur usage, et que, dans ce livre, ils verraient le bout des choses. Effectivement, il leur donna ce volume avant son départ : on le porta à Paris à l'académie des sciences ; mais, quand le vieux secrétaire l'eut ouvert, il ne vit rien qu'un livre tout blanc: «Ah! dit-il, je m'en étais bien douté».

Micromegas, Voltaire (1752)

Micromegas de Voltaire

Micromegas est un conte philosophique rédigé pendant le séjour à Cirey chez Mme du Châtelet (1736-1737), témoignage de l'intérêt que Voltaire a porté à l'œuvre de Newton, et sur le long terme.

Micromégas raconte le voyage interstellaire d'un géant sage et épris de sciences et de mathématiques, Micromégas, qui vient d'une planète gravitant autour de l'étoile Sirius.

Voltaire y souligne que l'homme est insignifiant, dérisoirement petit dans l'Univers, une mite philosophique, un animal chétif.

Le conte s'achève par le mémorable fou rire des géants, causé par l'intervention d'un théologien disciple de Saint Thomas d'Aquin, et qui affirme qu'«il savait tout le secret» et que «leurs personnes, leurs mondes, leurs soleils, leurs étoiles, tout était fait uniquement pour l'homme ». En cadeau final, les géants offrent aux hommes un livre censé leur expliquer le bout des choses : un livre tout blanc. Voir le bout des choses n'est pas à la portée des hommes et le livre qui pourra les éclairer définitivement restera pour toujours à écrire.