

Le boson de Higgs

Le Big Bang

Les points les plus chauds de la galaxie

L'Univers obscur

Le plus grand ordinateur du monde

La 5^e dimension

Science-fiction ou réalité

L'antimatière

Le vide

La matière noire

La plus grande infrastructure cryogénique

Les origines

Les univers parallèles

NOM DE CODE : LHC

LA MACHINE
À REMONTER LE TEMPS

Nom de Code : LHC

La machine à remonter le temps

A l'aube du démarrage du Large Hadron Collider, l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (CNRS/IN2P3) présente en simultané, dans 10 villes de France, une exposition destinée au grand public à l'occasion de la Fête de la Science 2007.

Peut-on vraiment remonter le temps ?

Pour les physiciens des particules, remonter le temps c'est revenir jusqu'à l'origine de l'Univers, il y a environ 14 milliards d'années. Quelques fractions de seconde après le Big Bang - l'explosion primordiale - l'Univers était extrêmement petit, chaud et dense. Un collisionneur de particules permet de reproduire ces conditions extrêmes.

Afin d'enquêter sur les mystères de l'Univers, les scientifiques ont donc construit l'instrument le plus grand et le plus complexe jamais conçu par l'homme : le Large Hadron Collider (LHC) et ses expériences. Plus complexe que l'aventure qui a conduit l'homme sur la lune, il est aussi plus international puisqu'une collaboration mondiale participe à cette aventure. Il est installé au laboratoire du Cern    Genève, à la frontière franco-suisse. La mise en route progressive de cette machine en 2008 aura un retentissement à travers toute la planète et sur tous les plans : scientifiques (avec d'importantes retombées cosmologiques) technologiques et humains.

Que s'est-il passé juste après le Big Bang ?

La 5   dimension : science-fiction ou réalité ?

L'antimatière, qu'est-ce que c'est ?

De quoi est fait le vide ?

De quoi est fait l'Univers ?

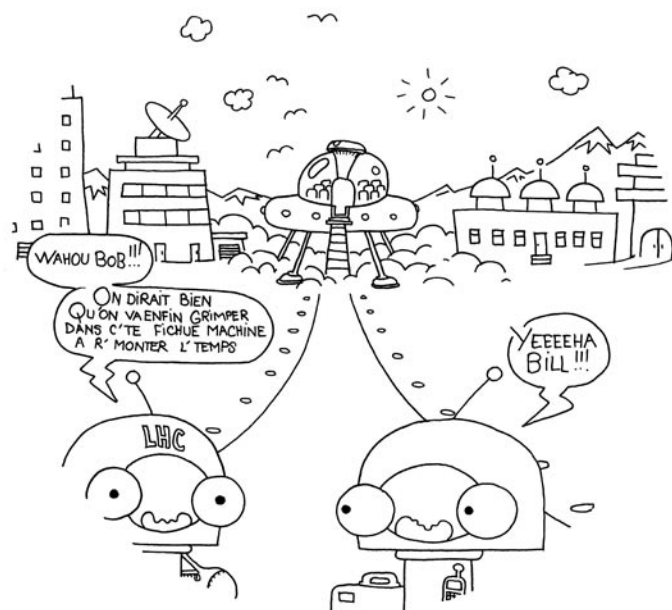
Grâce au LHC, des réponses seront apportées sur la nature de la matière, du vide, de l'espace et du temps et sur les lois qui régissent l'Univers, de son origine à nos jours et peut être même sur son avenir...

L'exposition « Nom de code : LHC - La machine à remonter le temps » a   t  e conçue par les laboratoires du CNRS/IN2P3 participant au projet LHC, avec le soutien des universités et écoles associées. Elle présente de façon simple et avec quelques touches d'humour, l'état actuel de nos connaissances, de nos interrogations et les réponses que le LHC pourrait apporter. Elle décrit également le rôle des laboratoires dans chacune des villes concernées.

Cette exposition grand public est visible en simultané à Annecy, Clermont-Ferrand, Grenoble, Lyon, Marseille, Nantes, Orsay, Palaiseau, Paris et Strasbourg, à partir de la Fête de la Science en 2007 et tout au long de l'année 2008.

Entrée libre et gratuite - Calendrier sur : <http://www.in2p3.fr/expoLHC>

Contact exposition : Perrine Royole-Degieux - tél : 04 73 40 54 59 - courriel : royole@in2p3.fr



(c) Lison Bernet

Pour le Fête de la Science 2007, découvrez cette exposition :

► En Ile de France

- **à Paris-5^e** : sur le campus de Jussieu - du 11 au 13 octobre 2007 10h00 - 18h00 - sur le parvis de l'université, entre les tours 33 et 43 - 4, place Jussieu - 75005 Paris
laboratoire associé : Laboratoire de physique nucléaire et de hautes énergies
- **à Palaiseau** : sur le campus de l'Ecole Polytechnique -samedi 13 octobre de 9h à 18h
route de Saclay -91120 Palaiseau
laboratoire associé : Laboratoire Leprince-Ringuet
- **à Bures sur Yvette** , à la mairie - du 6 au 13 octobre, 9h - 12h et 13h30 - 17h30 (du lun. au ven.) de 9h - 12h le sam. dans le hall d'accueil de la mairie - 45, rue Charles de Gaulle- Bures-sur-Yvette
laboratoires associés : Laboratoire de l'accélérateur linéaire et Institut de physique nucléaire d'Orsay

► En Alsace

- **à Strasbourg** : à la Chambre de Commerce et d'Industrie de Strasbourg et du Bas-Rhin
du lundi 8 au samedi 13 octobre de 10h00 à 18h00 - 10 Place Gutenberg – 67081 Strasbourg
laboratoire associé : Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien

► En Auvergne

- **à Clermont-Ferrand** : à l'Espace Multimédia Georges Conchon - du 8 au 31 octobre 2007, tlj (sauf dim.) de 14h à 19h, le samedi de 10h à 12h et 14h à 19h -Tramway : Maison de la Culture - 3, rue Léo-Lagrange -Clermont-Ferrand. 4 conférences sont programmées à 20h30 - Les 8, 17, 24 et 31 oct
laboratoire associé : Laboratoire de physique corpusculaire

► En Pays de la Loire

- **à Nantes** : au village des sciences Place royale - 11-14 oct de 10h à 18h (grand public) - 11-12 oct 10h à 18h (scolaires, réservation : n.chiron@cnam-paysdelaloire.fr – 0240161070) -
laboratoire associé : Subatech

► En Provence-Alpes-Côte d'Azur

- **à Aubagne** : au Village des Sciences (Espace Bras d'Or Quartier du Charrel)
les 11-12octobre 16h30 - 19h et le 13 octobre 2007 10h -19h
scolaires : 11-12 octobre 09h00 - 11h30 / 14h00 - 16h30
laboratoire associé : Centre de physique des particules de Marseille

► En Rhône-Alpes

- **A Lyon** : à la bibliothèque municipale de la Part-Dieu Métro/tram : Part-Dieu - 30 bd Vivier-Merle
du 09 au 13 octobre 2007 à 10h00 - 18h00
laboratoires associés : Institut de Physique Nucléaire de Lyon et le Centre de Calcul de l'IN2P3
- **A Grenoble** sur le site du Polygone scientifique, 25 rue des Martyres 04 76 28 41 93 berat@lpsc.in2p3.fr
11 oct. de 13h à 17h : collèges et lycées sur résa.- 12 oct. de 9h à 12h et 13h à 17h : collèges et lycées sur résa. - 13 oct. de 13h à 19h
laboratoire associé : Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie
- **A Annecy** : à la MJC Novel Place de l'Annapurna - Annecy
du 9 au 20 octobre- lundi-vendredi : 9h-12h / 14h-19h, samedi : 14h-19h - Conférence le 10 octobre à 18h30 - Rencontre et échanges avec des physiciens le 13 octobre de 14h à 19h
laboratoire associé : Laboratoire d'Annecy-le-vieux de physique des particules

DOSSIER DE PRESSE

Ce dossier de presse a initialement été rédigé par le CNRS/IN2P3 et le CEA/Dapnia

NOM DE CODE : LHC

LE LARGE HADRON COLLIDER

Contact communication
IN2P3/LHC
Perrine Royole-Degieux
T 04 73 40 54 59
royole@in2p3.fr

Le Large Hadron Collider

SOMMAIRE

- La participation française aux expériences du Cern
- Le Modèle standard
- Le LHC (Large Hadron Collider)
 - L'expérience Atlas
 - L'expérience CMS
 - L'expérience LHCb
 - L'expérience Alice
 - La grille de calcul LCG
- Au-delà du LHC, prospective en physique des hautes énergies
- Petit lexique

La participation française aux expériences du Cern

État fondateur du Cern (Organisation européenne pour la recherche nucléaire), la France contribue à toutes les grandes collaborations internationales de l'Organisation depuis sa création en 1954. La participation française est constituée exclusivement de laboratoires et équipes du CNRS (Institut national de physique nucléaire et de physique des particules IN2P3) et du CEA (Laboratoire de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers Dapnia). Forts de leurs compétences en physique théorique, physique expérimentale et instrumentation, les chercheurs, enseignants-chercheurs, ingénieurs et techniciens du CEA et du CNRS participent à la conception des expériences, à la fabrication des accélérateurs et des instruments sous tous leurs aspects (mécanique, électronique, informatique), à la réalisation des expériences et à l'acquisition et l'interprétation des données.

L'IN2P3 et le Dapnia ont fortement contribué depuis 50 ans au succès du Cern, notamment à la découverte des courants neutres en 1973 (expérience Gargamelle) et des particules messagères W et Z en 1983 (expériences UA1 et UA2 installées auprès du SPS, le premier grand accélérateur souterrain du Cern). Ils ont aussi contribué, plus récemment, aux confirmations expérimentales du Modèle standard obtenues au LEP (Large electron positon collider), en fonctionnement de 1989 à 2000.

Au LEP va succéder le LHC (Large Hadron Collider), le collisionneur proton-proton le plus puissant du monde, dont la construction doit s'achever en 2008. Les divers enjeux sont la découverte du boson de Higgs, une particule qui constitue la clé de voûte du Modèle standard, la recherche de la physique au-delà du Modèle standard, l'étude approfondie du phénomène de violation de CP (voir lexique) et la mise en évidence d'un nouvel état de la matière, le « plasma quark-gluon ». Là encore, la France est très impliquée dans le projet, au niveau aussi bien de l'accélérateur que des quatre expériences, Atlas, CMS, LHCb et Alice, qui exploiteront l'énorme potentiel de physique du collisionneur. Ce projet constitue une priorité de l'IN2P3 et du Dapnia qui y consacrent une part importante de leurs moyens : 210 physiciens et 230 ingénieurs et techniciens des deux organismes y participent actuellement. Après sa mise en route en 2008, il faudra analyser l'énorme volume de données (1 milliard de Mégaoctets par an) produit par les expériences. La France participe à cet effort par la mise sur pieds d'un centre de ressources très important (le centre de calcul de Lyon) qui constituera un des nœuds de premier niveau (national) de la grille de calcul internationale LCG (LHC Computing Grid), ainsi que plusieurs nœuds de second et troisième niveaux (régionaux).

Le Modèle standard

Le « Modèle standard » est le cadre théorique de la physique des particules. Élaboré dans les années 1970, il rassemble toutes les connaissances théoriques, expérimentalement confirmées depuis, sur les constituants élémentaires de la matière et leurs interactions, à l'exception de l'interaction gravitationnelle. Il a été jusqu'à constamment vérifié par l'expérience, en particulier grâce aux mesures effectuées au LEP (Large Electron-Positron Collider), le grand collisionneur électron-positon du Cern à Genève.

Les particules de matière

Selon l'état actuel des connaissances, la matière est décrite à l'aide de douze particules élémentaires. Six quarks : bas (down, d), étrange (strange, s), haut (up, u), charme (charm, c), bas (bottom ou beauty, b) et haut (top, t). Six leptons : électron, muon, tau, neutrino électronique, neutrino muonique et neutrino tauique. Ces douze particules sont regroupées en trois familles (générations) similaires, mais de masses de plus en plus grandes. Chaque particule est caractérisée par une carte d'identité : sa masse, sa charge électrique et son *spin*. Par ailleurs, chaque particule de matière possède son antiparticule, entièrement identique mais de charge opposée, ce qui donne en tout 24 particules.

Le *spin* une propriété quantique interne des particules que l'on peut comparer, dans une première approximation, à une toupie tournant sur elle-même. Ainsi le spin d'un électron peut prendre deux valeurs $+1/2$ ou $-1/2$ selon que l'électron tourne dans un sens ou dans l'autre.

Trois familles de particules de matière

	1	2	3
Quarks	u d	c s	t b
Leptons	neutrino électronique électron	neutrino muonique muon	neutrino tauique tau

Les particules de la première famille, l'électron, le neutrino électronique, le quark u et le quark d, sont les particules massives les plus légères et sont stables. Elles sont les constituants exclusifs de la matière ordinaire. À l'exception des neutrinos, les particules des deux autres familles sont plus lourdes et instables. Elles ne peuvent être observées que dans le rayonnement cosmique, ou dans des accélérateurs lors de collisions de haute énergie. Ces particules de matière sont toutes caractérisées par un spin de $1/2$. On les appelle des fermions. Elles sont mutuellement impenétrables.

Les interactions et les particules messagères

Ces particules de matière interagissent entre elles selon 4 forces (ou interactions) fondamentales. Ces forces sont transmises par des particules dites messagères. Différentes des fermions, leur spin vaut 1. Ce sont des bosons.

L'interaction faible

Elle est responsable de certaines désintégrations radioactives et explique par exemple pourquoi le soleil brille. Elle est portée par trois particules, W^+ , W^- et Z^0 , qui ont été observées au Cern sur l'ancien collisionneur proton anti-proton au début des années 1980, puis caractérisées avec une très grande précision au LEP entre 1989 et 2000 ainsi que dans l'expérience SLD (SLAC) et au TeVatron (Fermilab).

L'interaction forte

Cette force attractive fait interagir entre eux les quarks constitutifs des protons et des neutrons. Elle est responsable de la cohésion des noyaux atomiques. Ses messagers sont les gluons.

L'interaction électromagnétique

Elle agit entre tous les objets qui possèdent une charge électrique. C'est elle, par exemple, qui lie les électrons et le noyau de l'atome. La particule messagère de l'interaction électromagnétique est le photon, cette particule familière constitutive du rayonnement électromagnétique quelle que soit sa longueur d'onde : ondes radio, micro ondes, lumière visible, ultraviolets, rayons X, etc...

L'interaction gravitationnelle

Elle est toujours attractive et s'exerce entre tous les objets qui ont une masse. C'est l'interaction dominante dans l'Univers à grande échelle. Mais, à l'échelle atomique, elle est négligeable comparativement aux autres forces.

Au-delà du Modèle standard

Si le Modèle standard répond à de nombreuses questions sur la structure et la stabilité de la matière, certains points fondamentaux demeurent encore inexpliqués. Les briques connues à ce jour sont-elles vraiment élémentaires ou contiennent-elles des sous-structures ? Pourquoi les particules connues peuvent-elles être classées en trois familles aux propriétés semblables mais aux masses différentes ? Pourquoi l'Univers observable est-il constitué de matière plutôt que d'antimatière ? Puisque seuls quelques pour cent de la masse de l'Univers sont observables, de quoi est constituée la masse manquante, appelée aussi matière noire ?

Toutes ces questions sont liées entre elles et peuvent être associées à la question de l'origine des masses des particules, que ce soit les particules de matière ou les particules messagères. Pourquoi la plupart ont-elles une masse ? Pourquoi ont-elles des masses différentes ?

Dans le cadre du Modèle standard, l'hypothèse actuelle expliquant pourquoi les particules ont une masse est le phénomène de Higgs, du nom du physicien écossais qui le proposa. Selon cette théorie, un champ, dit de Higgs, inonde tout l'espace. Les particules qui interagissent avec ce champ acquièrent une masse, déterminée par l'intensité de leur interaction avec ce champ. Or, aucune particule de Higgs n'a encore jamais été observée. La mise en évidence d'une particule de Higgs (de un ou plusieurs bosons de Higgs) est un défi expérimental et une épreuve de vérité pour le Modèle standard.

Les recherches effectuées au LEP ont montré que la masse du boson de Higgs standard est supérieure à 114 **GeV**. En fait, les toutes dernières mesures ont donné des indications en faveur de l'existence d'un boson de Higgs juste au-delà de cette limite, à 115 GeV, mais sans pouvoir conclure de façon définitive. Le LHC sera capable d'explorer un large domaine de masses pour le Higgs, donc de confirmer ou infirmer les signes trouvés au LEP et d'aller bien au-delà. L'accélérateur Tevatron aux USA (collisions proton-antiproton à 2 **TeV**) actuellement en fonctionnement serait à même, à partir de 2008 ou 2009, d'explorer un petit domaine juste au-delà de la limite du LEP et donc de confirmer le signal s'il est réel. La compétition avec le LHC sur ce sujet est donc d'ores et déjà engagée !

1 **TeV** ou Teraélectronvolt = 1 million de millions d'électronvolts
1 **GeV** ou Gigaélectronvolt = 1 milliard d'électronvolts ;
1 **MeV** ou Megaélectronvolt = 1 million d'électronvolts.

L'électronvolt est l'énergie nécessaire à un électron pour franchir une différence de potentiel de 1 volt.

Vers une grande unification des forces

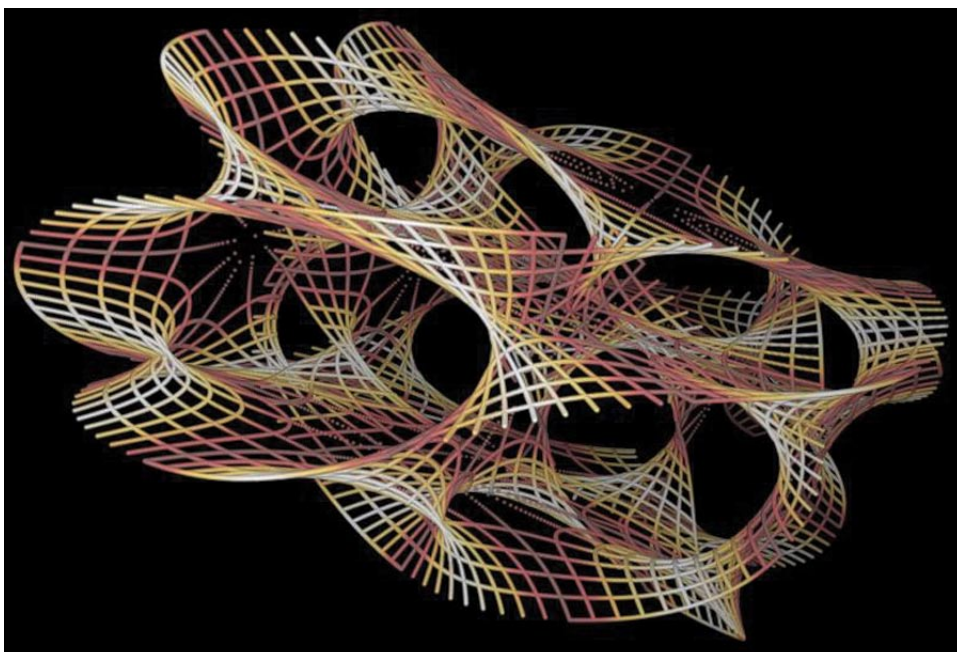
Les physiciens voudraient pouvoir démontrer que les 4 interactions (gravitationnelle, électromagnétique, forte et faible) sont en fait des expressions différentes d'une force unique, celle qui était à l'oeuvre aux premiers instants de l'Univers. Au moment du big-bang, le monde pouvait être décrit avec des lois parfaitement symétriques. Quand l'Univers s'est refroidi, plusieurs brisures de symétrie se seraient produites et les 4 forces se seraient alors différenciées : leurs effets sur les particules devenant très différents à courte et longue distance, de même que les masses de leurs messagers.

Les physiciens des particules cherchent à mettre en place un cadre théorique unique pour décrire cette grande unification. Le Modèle standard a déjà permis d'unifier les forces faible et électromagnétique en montrant qu'au-delà de 1015 degrés elles n'en formaient plus qu'une, la force électrofaible. Les messagers de la force faible (W^+ , W^- et Z^0) acquièrent une masse en interagissant avec le champ de Higgs, mais pas le photon, ni les gluons.

Pour des raisons théoriques très profondes, la plupart des physiciens s'accorde à penser que l'unification des forces fait intervenir une nouvelle symétrie fondamentale encore jamais observée : la supersymétrie, qui relierait fermions et bosons. Ce type de théorie prédit l'existence de nombreuses nouvelles particules, partenaires supersymétriques des particules standards. Ces nouvelles particules auraient des masses de quelques centaines de GeV. Le LHC sera l'outil idéal pour découvrir ces nouvelles particules et comprendre leurs interactions.

Une recherche très ouverte

Les théoriciens ne manquent pas d'imagination pour compléter et dépasser le Modèle standard. Si la supersymétrie reste la théorie favorite, d'autres possibilités sont évoquées, dont certaines pourraient avoir des manifestations spectaculaires au LHC. Une des plus fascinantes est la présence de dimensions supplémentaires d'espace-temps, atteignables à l'énergie du LHC. On verrait ainsi certaines particules produites lors d'une collision disparaître dans des dimensions supplémentaires de l'espace ! Encore plus exotiques, certains modèles évoquent la production de micro-trous noirs dans les collisions. Leur durée de vie serait extrêmement brève, après quoi ils s'évaporerait dans une grande production de particules...



Le LHC

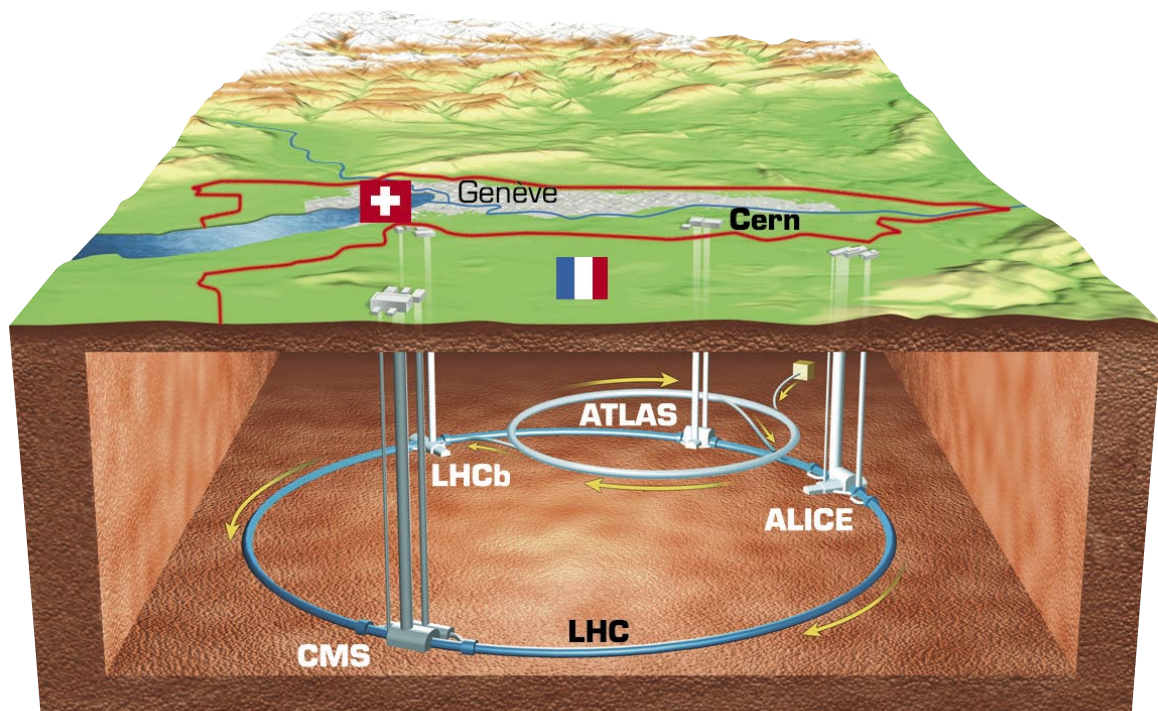
Construit dans le même tunnel souterrain que le LEP, le LHC (Large Hadron Collider) est un collisionneur de protons, de 27 kilomètres de circonférence. Sept fois plus puissant que l'accélérateur proton antiproton de Fermilab aux USA, il permettra d'atteindre des énergies de 14 TeV. Le LHC sera alors le plus puissant collisionneur du monde.

Son objectif est de répondre aux questions que pose le Modèle standard et de tenter de découvrir le cadre plus général dans lequel il s'inscrit. De nombreuses propositions théoriques seront ainsi mises à l'épreuve. Notamment :

- le LHC devrait apporter une réponse à l'existence d'un ou de plusieurs bosons de Higgs ;
- il sera aussi en mesure de "traquer" les particules supersymétriques, jamais observées à ce jour, et ainsi de tester le cadre théorique de la grande unification des forces.
- il devrait aussi aider à résoudre l'énigme de la matière noire et peut-être même celle de l'énergie noire.

Le LHC est constitué du collisionneur et de 4 détecteurs, Atlas, CMS, LHCb et Alice :

- le collisionneur permet de faire entrer les protons en collisions à haute énergie, ces collisions générant des centaines de particules ;
- les détecteurs analysent les particules ainsi générées pour sonder les interactions entre les particules.



[c] CERN, illustration de Philippe Mouche

L'accélérateur

Le LHC étant construit dans un tunnel préexistant, l'énergie maximale des faisceaux est déterminée par l'intensité du champ magnétique que l'on peut fournir pour maintenir ces faisceaux sur leur trajectoire circulaire. Les aimants supraconducteurs du LHC produisent un champ magnétique exceptionnellement élevé, ce qui en fait les éléments les plus complexes de la machine. La supraconductivité de haute performance nécessite de refroidir la totalité des 27 kilomètres de l'anneau à des températures de 1,8 K (-271,2°C), ce qui fait du LHC la plus grande installation supraconductrice et cryogénique du monde.

Aujourd'hui, les 1624 aimants principaux ont été livrés au Cern. A la fin 2006, 80% environ des aimants étaient déjà installés en souterrain. Un secteur complet de la machine se prépare actuellement à sa mise au froid pour atteindre sa température d'exploitation. Le dernier aimant en souterrain a été descendu fin avril 2006. La mise en service de l'accélérateur est prévue pour le printemps 2008.

Les détecteurs

Les deux détecteurs Atlas et CMS permettront de déterminer et caractériser les produits des collisions entre protons. Ils sont destinés à la recherche de premier plan du Cern, déterminer l'existence d'un ou de plusieurs bosons de Higgs, « traquer » les particules supersymétriques... Ils seront capables de traiter autant d'informations que tout le réseau de télécommunication européen actuel.

Deux autres détecteurs destinés à des études particulières, Alice et LHCb, seront aussi installés. L'expérience Alice doit pouvoir mettre en évidence et étudier un état particulier de la matière, le plasma quark-gluon, un état où quarks et gluons n'étaient pas encore « emprisonnés ». En traquant spécifiquement les mésons B (particules composées d'un quark b et d'un antiquark), l'expérience LHCb s'intéressera à l'antimatière, l'objectif étant de mieux comprendre pourquoi l'Univers est constitué de matière plutôt que d'antimatière.

La participation française au LHC

La France est fortement engagée dans le projet du LHC. Dans le cadre de sa « contribution exceptionnelle », elle finance 16,33 % du LHC. 210 physiciens et 230 ingénieurs et techniciens de l'IN2P3 et du Dapnia participent au projet LHC. La majorité d'entre eux (400) travaillent sur les expériences Alice, Atlas, CMS et LHCb, les autres sur le collisionneur. Ils participeront ensuite à la réalisation des expériences et à l'acquisition et l'interprétation des données.

L'accélérateur

Des ingénieurs et techniciens de l'IN2P3 et du CEA ont contribué à la conception des aimants supraconducteurs et d'une partie du système cryogénique de l'accélérateur en cours d'installation. L'IN2P3 a également étudié et étalonné plus de 6000 thermomètres pour mesurer et contrôler tous les éléments supraconducteurs du LHC. Le service des basses températures du CEA a participé à la conception du sous-ensemble cryogénique nécessaire au maintien de l'ensemble de l'accélérateur à des températures proches du zéro absolu.

Les expériences

Les physiciens du Dapnia et de l'IN2P3 ont été impliqués dans la conception des expériences dès leur origine, à partir des exigences de la physique. Des éléments clé de ces grands détecteurs portent la marque de cette contribution, qui s'est appuyée sur un fort potentiel technique, d'ingénierie et de réalisation. La participation française aux 4 expériences et à la grille de calcul est détaillée dans les 5 fiches suivantes.

L'expérience Atlas

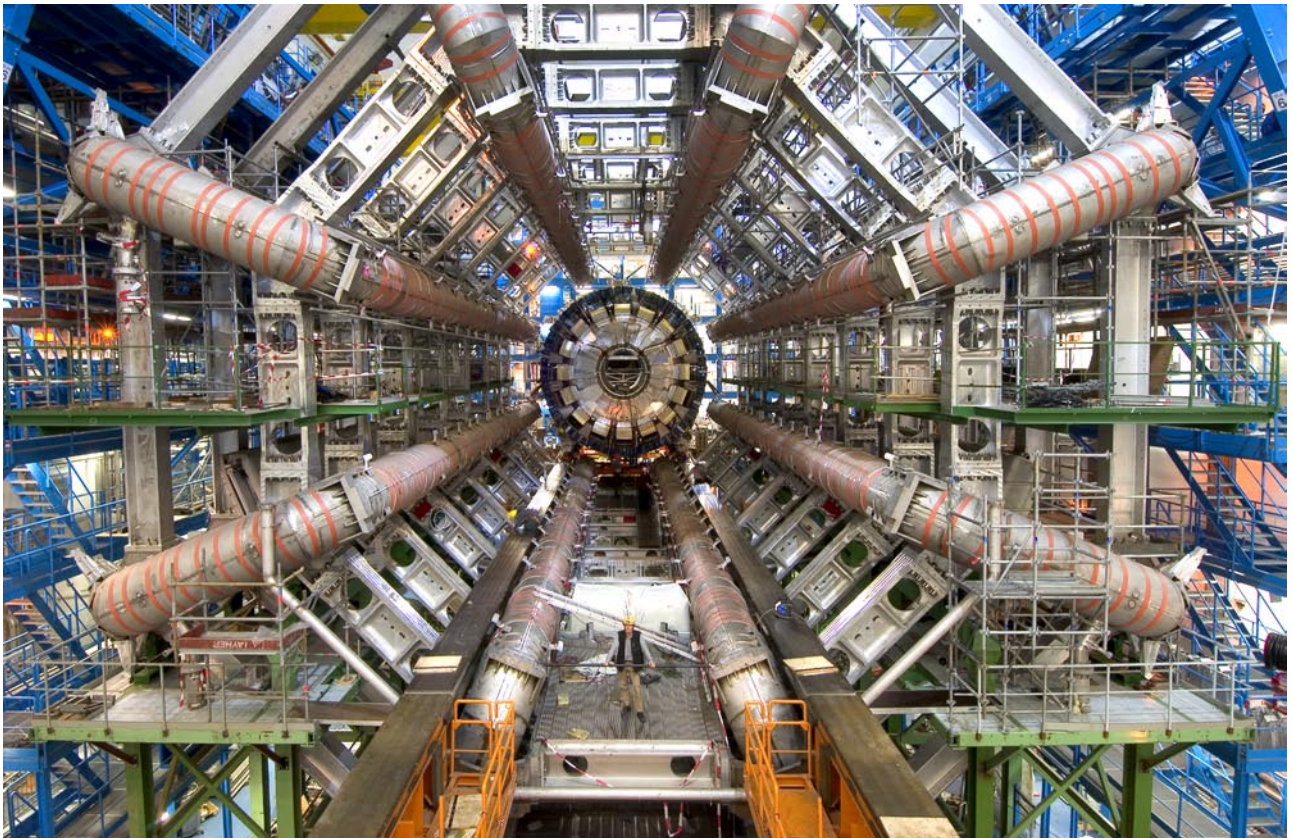
Les objectifs

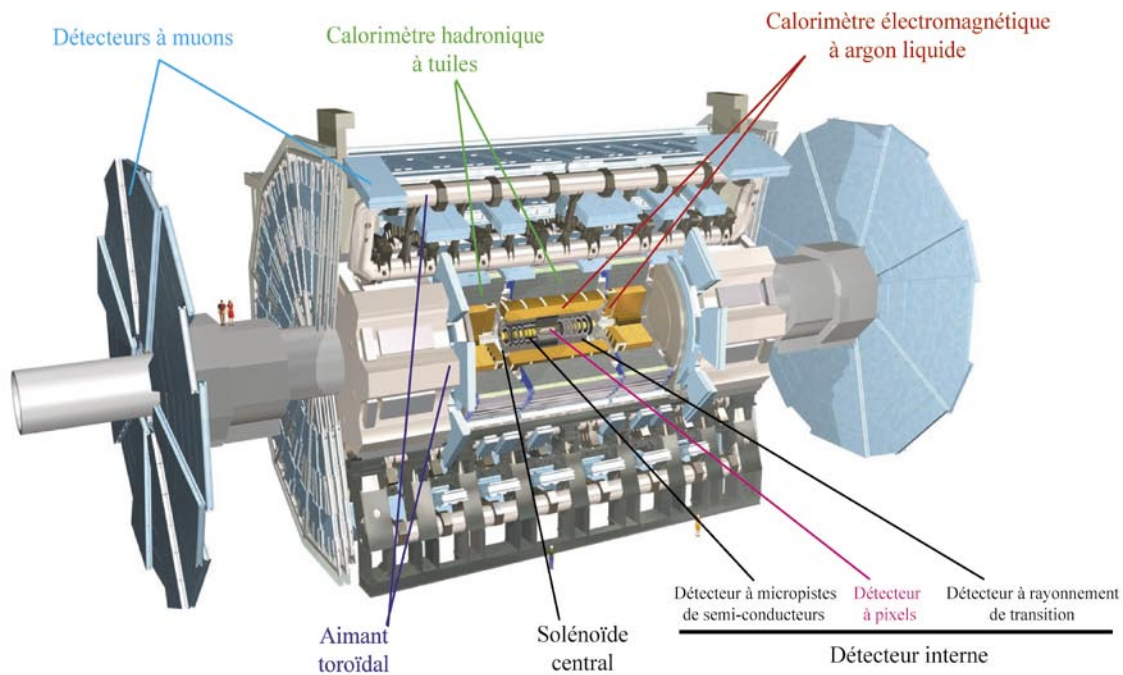
L'expérience Atlas (A Toroïdal LHC Apparatus) est conçue pour étudier les collisions proton-proton à 14 TeV d'énergie et jusqu'aux luminosités les plus élevées que pourra fournir le LHC. Son objectif principal est l'élucidation du mécanisme de brisure de la symétrie électrofaible dont la manifestation la plus simple est la production du boson de Higgs, une particule vainement recherchée jusqu'à ce jour. Cependant, la nature pourrait être plus complexe et faire intervenir plusieurs bosons de Higgs, des particules supersymétriques, des dimensions supplémentaires...

Si les interactions proton-proton produisent surtout des particules hadroniques (jets de quarks ou de gluons), les particules nouvelles attendues pourront être signées par des leptons de grande impulsion transverse (électrons, muons ou taus), émis par exemple avec un grand angle et une grande énergie.

Le détecteur

Le détecteur a été optimisé pour la reconnaissance et la reconstruction précise, parmi un bruit de fond moyen de 20 interactions toutes les 25 nano-secondes, des événements portant les signatures intéressantes. Il couvre tout l'angle solide autour du point d'interaction, à l'exception de deux cônes étroits le long du faisceau. Ses éléments sont certifiés pour résister au flux intense de radiations généré par les collisions. Organisé en couches successives, il comprend notamment un trajectographe à pixels et micropistes de silicium et tubes gazeux, un calorimètre électromagnétique à argon liquide, un calorimètre hadronique à tuiles scintillantes et un spectromètre à muons à champ toroïdal. Pour ce dernier, le champ magnétique est créé dans l'air par des aimants supraconducteurs de très grande taille.





La contribution française

Actives dès la phase initiale, les équipes de l'IN2P3 et du Dapnia ont été à l'origine des principaux choix novateurs d'Atlas, tels le toroïde supraconducteur pour le spectromètre à muons et le calorimètre à argon liquide d'un type nouveau dit « accordéon » autorisant une granularité élevée et des signaux rapides. Leur potentiel technique a permis à la France de contribuer aux fournitures en « nature » (ingénierie du toroïde, cryostats et cryogénie pour l'argon liquide). Toutes se sont investies dans la production et l'assemblage des détecteurs (notamment des calorimètres) et dans la conception et la réalisation de circuits pour l'électronique frontale, le traitement du signal et la calibration.

Une centaine de chercheurs et enseignants-chercheurs travaillent pour Atlas dans les laboratoires français. Au plus fort de la construction, une centaine d'ingénieurs était impliquée.

Les équipes françaises impliquées

Équipes CNRS/IN2P3

- Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique des particules (LAPP – CNRS/IN2P3/Université de Savoie, Annecy-le-Vieux)
- Laboratoire de physique corpusculaire (LPC Clermont – CNRS/IN2P3/Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, Aubière)
- Laboratoire de physique subatomique et cosmologie (LPSC – CNRS/IN2P3/Université de Grenoble 1 / INP Grenoble, Grenoble)
- Centre de physique des particules de Marseille (CPPM – CNRS/IN2P3/Université de Marseille 2, Marseille)
- Laboratoire de l'accélérateur linéaire (LAL – CNRS/IN2P3 Université de Paris 11, Orsay)
- Laboratoire physique nucléaire et hautes énergies (LPNHE – CNRS/IN2P3/Universités de Paris 6 et 7, Paris).

Équipes Dapnia (CEA, Saclay)

- Service de physique des particules (SPP)
- Service d'électronique des détecteurs et de l'informatique (SEDI)
- Service des accélérateurs, de cryogénie et de magnétisme (SACM)
- Service d'ingénierie des systèmes (SIS)

Centre de Calcul de l'IN2P3 (CNRS en association avec le CEA/DSM/Dapnia, Lyon)

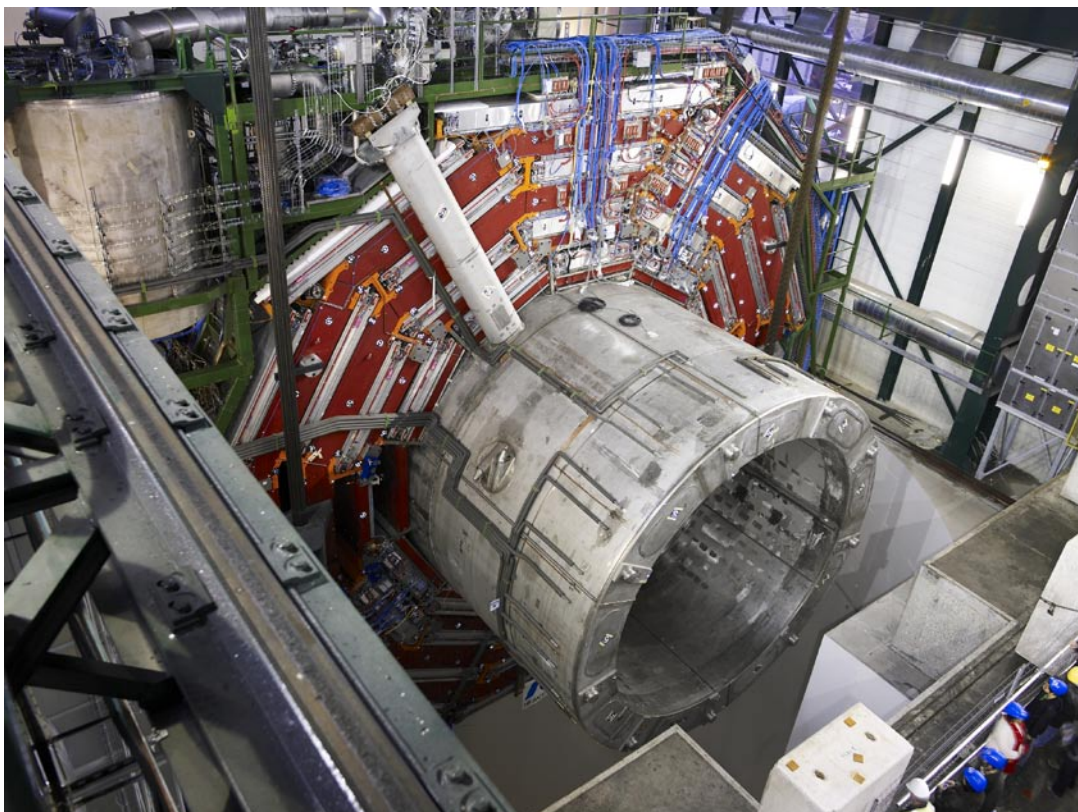
L'expérience CMS

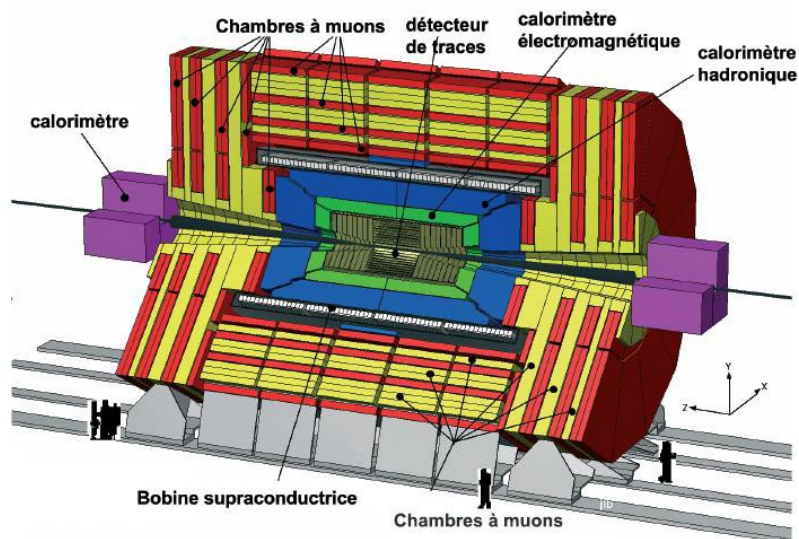
Les objectifs

L'expérience CMS (Compact Muon Solenoid) va étudier les interactions fondamentales connues et rechercher une nouvelle physique dans des collisions de protons ou d'ions lourds au coeur du LHC. Elle pourra opérer aux luminosités les plus hautes délivrées par cet accélérateur. Le détecteur de CMS a été optimisé pour la recherche de bosons de Higgs, comme celui prédit par le Modèle Standard, dans un domaine de masse allant jusqu'à 1 TeV. Il est également bien adapté à l'étude des quarks lourds comme le quark top. Par ailleurs, il devrait permettre la découverte de la supersymétrie, si elle existe, dans une large gamme de signatures, ou donner accès à d'autres phénomènes plus exotiques prévus par certaines théories (nouveaux nombres quantiques, nouvelles particules, dimensions supplémentaires de l'espace-temps, trous noirs). Il permettra aussi de couvrir de nombreux aspects de la physique des ions lourds, comme l'étude du plasma de quarks et de gluons.

Le détecteur

CMS a choisi de privilégier la détection très précise des muons, des photons et des électrons. La résolution des mesures de leur énergie sera meilleure que 1% à 100 GeV. Un élément essentiel du détecteur est un grand solénoïde générant un champ magnétique de 4 teslas, le plus puissant aimant supraconducteur jamais construit. Le choix d'un champ magnétique aussi élevé a permis de concevoir un spectromètre à muons particulièrement compact, sans sacrifier la précision sur la mesure du moment des muons et ce jusqu'à un angle proche du faisceau (9,4 degrés). Un trajectomètre en couches formées de pixels et de bandes de silicium, un calorimètre électromagnétique, constitué de cristaux scintillants de tungstate de plomb ainsi qu'un calorimètre hadronique très hermétique sont situés à l'intérieur de la bobine. Le calorimètre électromagnétique permet la détection des deux photons de désintégration d'un Higgs de masse faible. L'herméticité du calorimètre hadronique qui enferme la région de l'interaction jusqu'à un degré, permet une bonne mesure de l'énergie transverse manquante. Le fait de pouvoir contenir les deux calorimètres grâce au grand diamètre du solénoïde évite une dégradation de la mesure de l'énergie des particules qui n'ont pas à traverser la matière de l'aimant.





La contribution française

Les participations à la construction du détecteur des groupes français de l'IN2P3 et du Dapnia ont porté sur la conception de l'aimant solénoïde supraconducteur, la partie cylindrique du calorimètre électromagnétique et sur le détecteur de traces chargées. Les contributions englobent la réalisation de systèmes mécaniques et électroniques complexes. L'électronique tant analogique que numérique assure le transfert des mesures fournies par les détecteurs. Des contributions liées au système de déclenchement utilisent les dernières techniques numériques disponibles. Elles permettront entre autres d'assurer la sélection des électrons dans CMS. Les physiciens et informaticiens français contribuent aux développements de logiciels de reconstruction des données de CMS.

L'aimant solénoïde supraconducteur a pu être testé à plein courant et avec succès à l'automne 2006. Les super-modules (1700 cristaux chacun) de la partie centrale du calorimètre électromagnétique, équipés du système électronique complet d'acquisition des données et de suivi, ont été testés avec succès en faisceau en 2006. L'assemblage et le test des milliers d'éléments du détecteur de traces en silicium sont en voie de complétion. Les physiciens préparent aussi activement les programmes de traitement, de reconstruction et d'analyse des données pour la physique.

Quatre laboratoires de l'IN2P3 et le Dapnia sont membres de CMS représentant au total un effectif d'une centaine de physiciens et ingénieurs.

Les laboratoires et équipes impliqués

Équipes CNRS/IN2P3

- Institut de physique nucléaire de Lyon (IPNL – CNRS/IN2P3 / Université de Lyon 1, Villeurbanne)
- Laboratoire Leprince-Ringuet (LLR – CNRS/IN2P3 / Ecole Polytechnique, Palaiseau)
- Institut pluridisciplinaire Hubert Curien (IPHC – CNRS/IN2P3 / Université de Strasbourg 1, Strasbourg)
- Laboratoire d'Annecy le Vieux de physique des particules (LAPP – CNRS/IN2P3 / Université de Savoie, Annecy le Vieux)

Équipes Dapnia (CEA, Saclay)

- Service de physique des particules (SPP)
- Service d'électronique des détecteurs et de l'informatique (SEDI)
- Service des accélérateurs, de cryogénie et de magnétisme (SACM)
- Service d'ingénierie des systèmes (SIS)

Centre de Calcul de l'IN2P3 (CNRS en association avec le CEA/DSM/Dapnia, Lyon)

L'expérience LHCb

Les objectifs

L'expérience LHCb (Large Hadron Collider beauty experiment) est dédiée à l'étude de l'asymétrie matière-antimatière en traquant spécifiquement les mésons B (particules contenant un quark b, appelé «beauté») et leurs antiparticules. L'objectif ultime est de mieux comprendre pourquoi l'Univers est constitué exclusivement de matière, alors qu'à sa naissance matière et antimatière étaient présentes à parts égales. Le taux élevé de production de particules «belles» et la haute précision de l'expérience, permettront d'approfondir l'étude de la violation de la **symétrie CP** dans des modes très variés et même rares de désintégration du méson B et de mieux comprendre le seul mécanisme, connu à ce jour, pouvant distinguer une particule de son antiparticule. Grâce à la précision et au large spectre de ses mesures, LHCb pourrait aussi mettre en évidence une nouvelle physique, non prévue par le Modèle Standard des particules élémentaires et de leurs interactions.

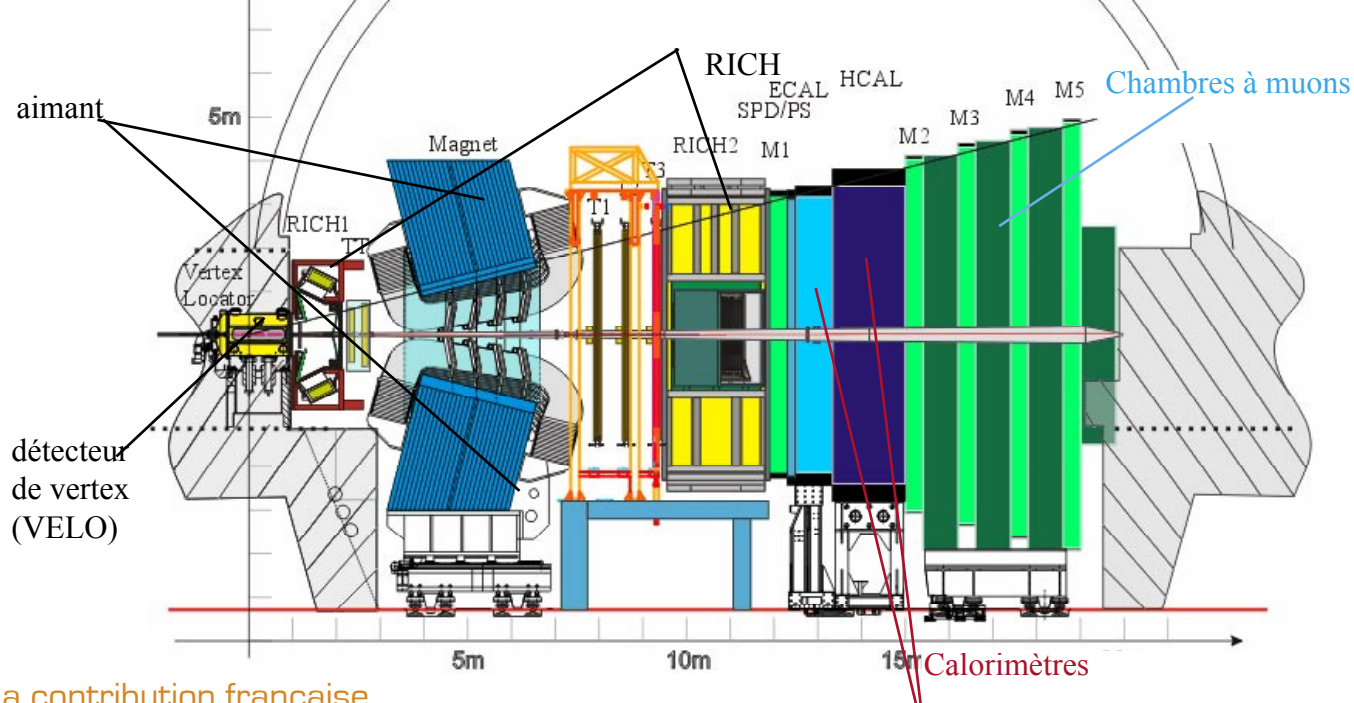
La **symétrie^{*} CP** correspond au produit de deux symétries :

la conjugaison de charge C qui associe une particule à son antiparticule, de même masse mais de charge opposée, **et la parité P** qui transforme une particule en son image dans un miroir.

Le détecteur

Contrairement aux grands détecteurs polyvalents que sont Atlas et CMS, LHCb est un outil spécialisé, destiné à réaliser la meilleure détection possible de mésons B et de leurs produits de désintégration. Ces particules étant émises, lors des collisions des faisceaux, préférentiellement dans des directions voisines du faisceau, le détecteur LHCb est spécialement conçu pour les observer à « petit angle ». Il est disposé autour du tube à vide de l'accélérateur, dans une seule direction par rapport au croisement des faisceaux. Il permet de mesurer les trajectoires des particules émises, leur impulsion, leur énergie et d'identifier ces particules avec une très grande précision. L'ensemble des détecteurs participe à une logique de décision complexe qui, toutes les 25 nanosecondes, sélectionne les collisions intéressantes. Une ferme de microprocesseurs permet ensuite d'analyser toutes les informations du détecteur en temps réel, afin de reconnaître les événements intéressants.





La contribution française

Cinq groupes de l'IN2P3 sont engagés dans l'expérience. Ils sont impliqués dans la conception et la construction de la structure mécanique et de toute la chaîne électronique des calorimètres, allant des détecteurs de lumière à l'électronique de lecture et de traitement des informations. Ils sont également chargés de la conception et de la réalisation du déclenchement rapide de premier niveau (système électronique qui, sur la base des premières informations fournies par le détecteur, décide de l'intérêt d'un événement), comprenant une sélection calorimétrique, l'identificateur de muons et la logique de décision. Les équipes sont également engagées dans la préparation des analyses de physique. Elles participent à l'écriture des logiciels généraux : visualisation des événements, génération de données de *Monte-Carlo*, développement du calcul sur grille LCG (voir pages suivantes), élaboration des outils d'analyse et étude des performances de l'expérience dans plusieurs canaux de désintégration.

Les groupes français jouent un rôle de premier plan et assurent des responsabilités importantes dans la construction du détecteur, sa mise en route et son exploitation.

En physique des particules, un *Monte-Carlo* est une simulation complète des propriétés du détecteur et des phénomènes physiques à étudier. Cette simulation est basée sur une génération « au hasard » des quantités qui interviennent. C'est grâce à cette modélisation que l'on peut à l'avance prévoir les performances du détecteur et étudier diverses hypothèses théoriques sur les résultats de physique attendus.

Une cinquantaine de chercheurs, enseignants-chercheurs et ingénieurs travaillent sur LHCb dans les laboratoires français.

Les laboratoires impliqués

Équipes CNRS/IN2P3

- Centre de physique des particules de Marseille (CPPM, CNRS/IN2P3 - Université de la Méditerranée, Marseille)
- Laboratoire de l'accélérateur linéaire (LAL, CNRS/IN2P3 - Université de Paris 11, Orsay)
- Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique des particules (LAPP, CNRS/IN2P3 - Université de Savoie, Annecy-le-Vieux)
- Laboratoire de physique corpusculaire (LPC, CNRS/IN2P3 - Université de Clermont 2, Aubière)
- Laboratoire de physique nucléaire et hautes énergies (LPNHE, CNRS/IN2P3 - Universités de Paris 6 et 7, Paris)

Centre de Calcul de l'IN2P3 (CNRS en association avec le CEA/DSM/Dapnia, Lyon)

L'expérience Alice

Les objectifs

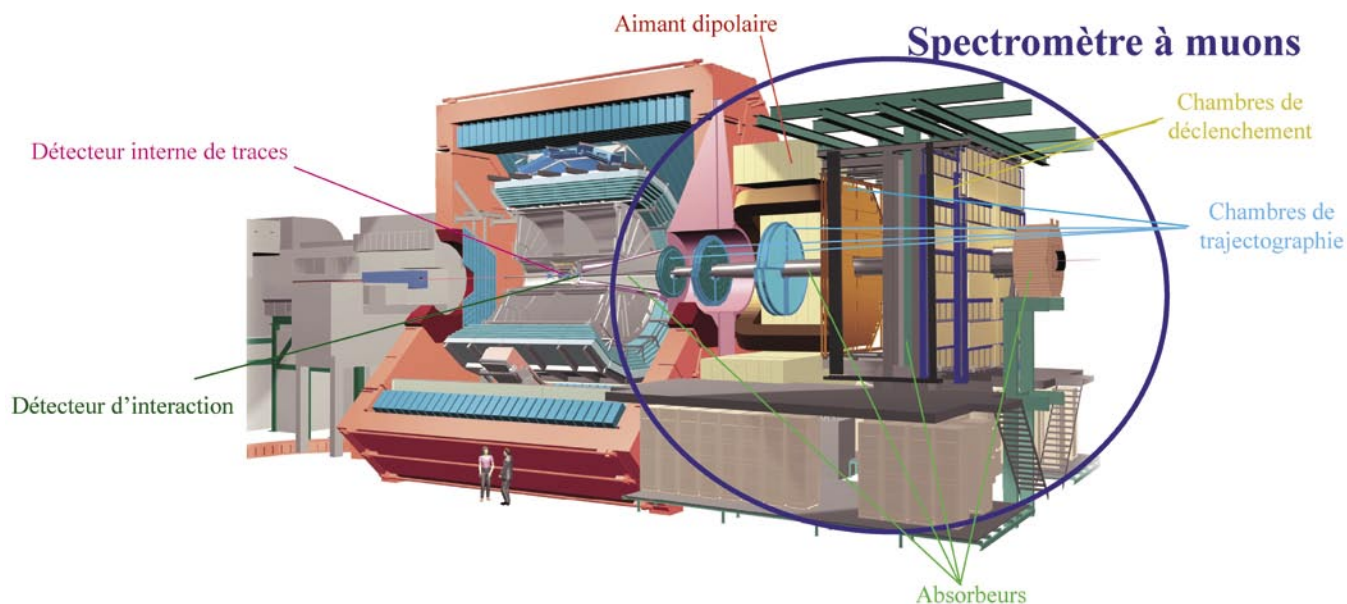
L'objectif d'Alice (A Large Ion Collider Experiment) est de produire et d'étudier en laboratoire le plasma de quarks et de gluons, un état de la matière dans lequel ses constituants les plus élémentaires s'organisent librement, comme les électrons et les ions dans un plasma électronique. Cet état de la matière est considéré comme l'ancêtre de la matière nucléaire actuelle, dans la mesure où quelques microsecondes après le Big Bang, l'Univers tout entier aurait été dans cet état.

La chromo-dynamique quantique, qui est la théorie de l'interaction forte, explique le confinement des quarks au sein des protons et des neutrons dans la matière nucléaire ordinaire (prix Nobel 2004) et prédit la formation de cet état quand la matière nucléaire est portée à des températures suffisamment élevées. Les collisions d'ions lourds, accélérés par le LHC, permettront d'atteindre ces températures. Le détecteur Alice détectera et identifiera la plupart des particules produites dans chaque collision. Les caractéristiques de l'état de la matière formée telles sa température, sa taille, sa durée de vie, la nature des constituants en seront déduites. À partir de ces données, les physiciens pourront apporter des éclairages nouveaux sur les questions fondamentales telles que l'organisation ultime de la matière soumise à l'interaction forte, l'état de la matière à son origine, l'origine de la masse des particules composites actuelles ou la nature du vide.

Le détecteur

L'expérience Alice est actuellement en cours de montage. Elle est constituée de plusieurs systèmes de détection plongés dans un champ magnétique produit par un imposant aimant solénoïde. Un spectromètre de muons complète l'expérience. La tâche de ces détecteurs est d'identifier une à une la plupart des particules produites en grand nombre (autour de 20 000) par chaque collision.





La contribution française

Les groupes français de l'IN2P3 et du Dapnia sont largement impliqués dans la conception et la réalisation de plusieurs ensembles de détection :

- Les 2 couches externes du système de trajectographie interne (ITS) au silicium (5 m² de détecteurs double face, 2,6 millions de signaux analogiques) entourant le point de croisement des faisceaux. ITS mesurera les premiers décimètres des traces des particules chargées avec une précision de l'ordre du dixième de millimètre.
- Le spectromètre de muons, avec ses absorbeurs, ses blindages et son dipôle magnétique, équipé de 4 plans de chambres à plaques résistives (140 m², 21 000 signaux) pour l'identification des muons et de 10 plans de chambres à fils (100 m², un million de signaux) pour la mesure de leur trajectoire, avec une précision de quelques millièmes de millimètre, et de 300 lignes de visées optiques (1 200 images).
- Le détecteur à scintillation V0 (32 voies de détection) avec son électronique assurant le déclenchement des prises de données.
- La participation de certains laboratoires français au projet de calorimètre électromagnétique (EMCAL) est en cours de discussion.

La France contribue également aux ressources de calcul intégrées dans une grille de calcul mondiale avec un site de type Tier-1 au Centre de calcul de Lyon et 4 sites de type Tier-2, à Nantes, à Clermont-Ferrand, Strasbourg et dans la région Ile-de-France. Environ 40 chercheurs, enseignants chercheurs et post-doc, et autant de personnels techniques contribuent dans les laboratoires français à la construction de l'expérience Alice.

Les laboratoires et équipes françaises impliqués

Équipes CNRS/IN2P3

- Laboratoire de physique corpusculaire (LPC Clermont – CNRS/IN2P3/Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, Aubière)
- Institut de physique nucléaire de Lyon (IPNL – CNRS/IN2P3/Université de Lyon 1, Villeurbanne)
- Subatech (CNRS/IN2P3, École des Mines et Université de Nantes)
- Institut de physique nucléaire (IPNO – CNRS/IN2P3 / Université de Paris 11, Orsay)
- Institut pluridisciplinaire Hubert Curien (IPHC – CNRS/IN2P3 / Université de Strasbourg 1)
- Laboratoire de physique subatomique et de Cosmologie (LPSC – CNRS/IN2P3/ Université Joseph Fourier / Institut National Polytechnique de Grenoble)

Équipes Dapnia (CEA, Saclay)

- Service de physique nucléaire (SPhN)
- Service d'électronique des détecteurs et de l'informatique (SEDI)
- Service d'ingénierie des systèmes (SIS)

Centre de Calcul de l'IN2P3 (CNRS en association avec le CEA/DSM/Dapnia, Lyon)

La grille de calcul LCG

Avec 40 millions de collisions par seconde et 1012 collisions enregistrées par an (quelques *pétaoctets*), les données générées par le LHC (Large Hadron Collider) et leur exploitation représentent un véritable défi informatique par le débit et le volume des données à traiter. C'est pour répondre à cette problématique qu'est né le projet de grille W-LCG (WorldWide LHC Computing Grid) qui permettra, à tout instant, à 10 000 chercheurs de traiter les données issues du LHC.

La grille de calcul LCG est un réseau de centres de calcul répartis dans le monde entier. Lorsqu'une demande est énoncée à un point d'entrée du système sur l'ordinateur de l'un des centres de calcul, la grille est capable d'identifier les endroits du réseau disponibles pour fournir des ressources (stockage sur disques, stockage permanent sur bandes, capacité de calcul, logiciels adaptés...), et de les utiliser pour satisfaire la demande de l'utilisateur au point d'entrée.

La grille LCG est développée spécifiquement pour les quatre expériences installées auprès du collisionneur LHC : Alice, Atlas, CMS et LHCb, qui devraient permettre de répondre aux questions les plus fondamentales de la physique.

Constituée seulement de 12 centres de calcul lors de son lancement en septembre 2003, la grille de calcul du LHC est aujourd'hui un réseau de près de 200 sites opérationnels distribués sur les 4 continents (voir carte page suivante).

La grille LCG se présente comme un ensemble de centres de calcul hiérarchisés en trois niveaux : au niveau 0, appelé Tier-0, le centre de calcul auprès de l'accélérateur LHC produit les données brutes, les stocke et les redistribue au second niveau appelé Tier-1 ; ce dernier est constitué d'une dizaine de centres de calculs dits «centres névralgiques», dans lesquels seront réparties puis traitées les données primaires directement issues des expériences du LHC ; au niveau Tier-2 et Tier-3, on retrouve ensuite plus de 100 centres qui fournissent principalement des ressources pour l'analyse et le stockage des données.

La France héberge l'un des 11 centres Tier-1 du LCG au Centre de Calcul de l'IN2P3 à Lyon - Villeurbanne (CNRS-CEA) et plusieurs sites de niveau Tier-2 (Ile-de-France, Clermont-Ferrand, Lyon, Nantes) et Tier-3 (Marseille, Annecy, Strasbourg, Grenoble, Lyon).

Les différents centres, selon leur rôle dans l'architecture de la grille de calcul, doivent impérativement fournir un certain nombre de services. Les centres névralgiques devront ainsi fournir chacun une capacité de calcul de l'ordre de 12 millions de *SpecInt 2000* (soit l'équivalent d'environ 6000 processeurs actuels), une capacité de stockage sur disques de l'ordre de 8 pétaoctets et une vitesse de transfert des données avec le Cern d'un minimum de 10 gigabits par seconde.

Les premières expériences de validation de la grille LCG ont été lancées en 2003. Un travail indispensable qui a testé par des données de simulation, le logiciel des expériences et les capacités de gestion des diverses technologies de grilles associées au LHC. Ce type d'opération « d'épreuve par les données », « data challenge » en anglais, va se poursuivre jusqu'à la mise en service du LHC.

Environ 20 millions d'événements simulés ont ainsi déjà été produits, traités, et stockés sur les ressources distribuées des grilles.

Une série d'épreuves liées au « Service » de la grille mondiale, appelés « service challenge » en anglais, a été mis en place dès 2005, dont le quatrième du genre est actuellement en route et va durer près de 6 mois. Une série de validation de l'ensemble du calcul, « commissioning » en anglais, s'est mis en place

1 *pétaoctet* = 10¹⁵ octets

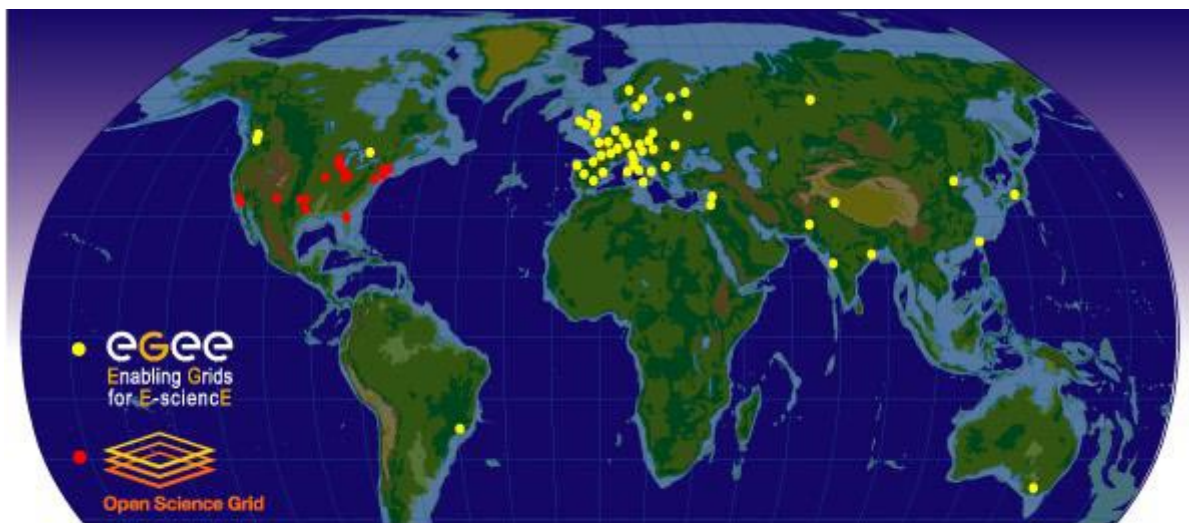
Le *SPEC* est l'unité de mesure de la puissance de calcul d'un ordinateur. On rencontre deux unités, les « SpecInt » et les « SpecFp », désignant respectivement les performances en calcul entier et en calcul réel.

début 2007. Tous ces tests de validation sont faits dans le but de préparer l'infrastructure, les ressources et les logiciels au service des expériences et de la science à l'automne 2007.

La mise en place de la totalité de l'infrastructure est estimée à 200 millions d'euros, personnel inclus, dont 80 millions sont à la charge du Cern, les 120 millions restants étant répartis entre les partenaires hébergeant des sites Tier-1. Le coût total pour la France est estimé à 26 millions d'euros sur la période 2005-2008, en incluant le personnel.

Cette infrastructure mondiale de grille repose sur les avancées issues de différents projets européens (*Enabling Grids for E-Science*, NorduGrid, etc.), américains (Grid3 /Open Science Grid) et sur les possibilités de transfert qu'offrent les réseaux à très haut débit, tels que le Réseau National de télécommunication pour la Technologie, l'Enseignement et la Recherche (RENATER) et le Gigabit European Academic Network (GEANT).

Financé par la commission européenne à hauteur de 32 millions d'euros, et rassemblant plus de 70 partenaires issus de 27 pays, le projet *Enabling Grid for E-science in Europe (EGEE)* a pour objectif de mettre en place l'infrastructure d'une grille pluridisciplinaire.
<http://public.eu-egee.org>



A map of the worldwide LCG infrastructure operated by EGEE and OSG.

Sites Tier-0, Tier-1 et Tier-2 de la grille LCG ; En jaune et rouge on distingue respectivement les projets européen et américain. Le contrôle (monitoring) en temps réel de cette grille peut-être trouvé à cette adresse :

http://gridportal.hep.ph.ic.ac.uk/rtm/running_frame.html

Quelques sites

NorduGrid : www.nordugrid.org

Grid3 : www.ivdgl.org/grid3

Open Science Grid : www.opensciencegrid.org

Au-delà du LHC

Prospective en physique des hautes énergies

Le Cern est en pleine phase de construction du LHC dont l'achèvement en 2008 est la priorité. Au-delà, les perspectives sont ouvertes et plusieurs options sont possibles. La communauté internationale est en train de faire ses choix, réflexion à laquelle les physiciens français du Dapnia et de l'IN2P3 prennent une part active.

Les objectifs du Cern à court terme : 2008-2010

- 1) L'achèvement du LHC en 2008, incluant l'accélérateur, les expériences et les logiciels d'exploitation, est la priorité absolue du Cern.
- 2) Le Cern définit de nouvelles expériences sur cible fixe, sur des sujets comme la violation de la symétrie CP, la structure du proton... qui pourront fonctionner en parallèle avec le LHC.
- 3) Le Cern effectue des études prospectives sur les accélérateurs :
 - il étudie les solutions pour une augmentation de la luminosité du LHC dans les années 2012-2015 (étude d'un nouvel accélérateur source pour le LHC, adaptation des détecteurs à l'augmentation de la luminosité du LHC...);
 - Tout comme l'ensemble de la communauté internationale, il participe activement au projet mondial de collisionneur linéaire électron-positon d'une énergie de 500 GeV à 1 TeV : l'ILC (International Linear Collider). À plus longue échéance, il étudie la faisabilité d'un collisionneur linéaire révolutionnaire électron-positon de plus haute énergie (plusieurs TeV) : le Clic ;
 - il est aussi impliqué dans plusieurs programmes européens d'accélération d'ions lourds pour la physique nucléaire, dont Eurisol (source d'ions lourds radioactifs). Outre son intérêt pour la physique nucléaire, Eurisol peut être envisagé comme source pour un faisceau intense de neutrinos.

Les programmes envisagés à plus long terme

Plusieurs réflexions sont menées pour permettre au Cern de prendre des décisions sur les objectifs scientifiques vers 2009-2010.

- 1) Le collisionneur linéaire électron-positon. La stratégie du Cern dépendra du degré d'avancement de la R&D sur Clic mais rien n'exclut que le Cern puisse accueillir le projet international ILC. Si ce projet est construit ailleurs dans le monde, le Cern peut alors décider de concentrer ses efforts sur Clic ou d'être un partenaire majeur de la machine mondiale ILC.
- 2) Une série de programmes sont envisagés à partir d'un accélérateur de protons de haute intensité :
 - plusieurs projets touchent à la physique des neutrinos, qui a vu un renouveau spectaculaire avec la découverte récente des oscillations des neutrinos. Sont envisagées notamment des expériences sur la violation de symétrie CP sur les neutrinos, la création de super faisceaux de neutrinos... (années 2007-2015) ;
 - un projet " Beta-beams ", accélération d'ions radioactifs, pour la physique nucléaire et la physique des neutrinos (après 2016) ;
 - un projet d'accélérateur de muons permettant de produire un faisceau de neutrinos encore plus brillant (Neutrino Factory). Ce projet est un défi technologique car la désintégration des muons est si rapide que leur accumulation dans un accélérateur est rendue très difficile (après 2020) ;
 - en fonction de la maîtrise acquise dans la phase de R et D de Neutrino Factory, un projet de collisionneur de muons est envisagé (après 2025).

Petit lexique

Modèle standard

Théorie qui décrit l'Univers comme étant constitué de particules élémentaires de matière, les fermions. Ils interagissent par l'échange de particules appelées « messagers », les bosons de jauge. Cette théorie est remarquablement précise dans son domaine d'application, mais on la sait incomplète et limitée.

Fermions

Les fermions sont :

3 leptons chargés (électron, muon, tau) ; 3 leptons neutres (neutrinos associés aux leptons chargés) et 6 quarks (up, down, strange, charm, bottom et top)

Boson de Higgs

Le modèle standard prévoit l'existence d'une autre particule, le boson de Higgs qui n'a jamais encore été observé. Son rôle serait fondamental pour comprendre pourquoi les particules ont une masse et pourquoi celle-ci est différente selon le type de particule.

Symétrie CP

La symétrie CP correspond au produit de deux symétries : la conjugaison de charge C qui associe une particule à son antiparticule, de même masse mais de charge opposée, et la parité P, qui transforme une particule en son image dans un miroir.

Violation de symétrie CP

Lors du Big Bang, l'Univers contenait autant de matière que d'antimatière. Aujourd'hui, l'Univers n'est constitué que de matière. Des différences de comportement entre matière et antimatière – une violation de symétrie CP – pourrait être responsable de l'écart qui s'est établi, au cours de l'histoire de l'Univers, entre les proportions de matière et d'antimatière.

Matière et énergie noire

Les observations astronomiques ont depuis longtemps montré l'existence d'une matière « noire », dont on voit l'influence mais pas le rayonnement. Des mesures cosmologiques récentes ont précisé que cette matière constitue 23% de l'énergie de l'univers. La surprise a été que 72 % provient d'une « énergie noire », d'une forme totalement inconnue. La matière « ordinaire », décrite par le modèle standard, ne constituant que 5 % de l'énergie de l'univers... Cette nouvelle énigme est probablement reliée aux autres questions de la physique des particules.

Au-delà du Modèle Standard

De nombreuses théories sont proposées pour compléter le Modèle Standard et résoudre certains de ses problèmes, parmi lesquelles la Supersymétrie ou les Dimensions Supplémentaires. La découverte d'une particule ou d'un effet confirmant l'une de ces théories ouvrirait une ère entièrement nouvelle pour la physique.