

## Le LHC, un nouveau regard vers l'Infini

Une question posée par un journaliste à propos du LHC m'a beaucoup fait réfléchir : «Est-il vrai qu'avec le LHC on comprendra comment une particule peut avoir une masse nulle ?» A l'évidence, le message que les physiciens tentaient de faire passer avait été inversé. Le boson de Higgs, l'une des recherches majeures du *Large hadron collider* (LHC), a été imaginé par un théoricien pour permettre aux particules d'avoir une masse. Les physiciens veulent répondre à la question inverse du journaliste et comprendre, par l'expérience, «Comment une particule peut avoir une masse ?»

Qui sont donc ces chercheurs étranges qui se posent des questions « à l'envers » par rapport au sens commun, qui s'étonnent qu'une particule ait une masse mais pas qu'il existe des particules de masse nulle. La réponse est dans ce numéro de *Scintillations*. A l'heure où le LHC entre dans sa phase active, après un démarrage et une inauguration officielle très médiatisés il était normal que l'Irfu lui consacre ce numéro. Les physiciens, ingénieurs, techniciens, administratifs de l'Irfu, qui préparent le LHC depuis des années, y présentent leur travail, leurs contributions, leurs impressions aussi. Ce sont des hommes et des femmes dont la passion pour cette connaissance ultime de notre monde transparait dans leur enthousiasme et leur acharnement à comprendre. Les questions posées ne sont pas simples, les moyens pour y répondre non plus, mais ils sont maîtrisés de la manière la plus rigoureuse qui soit.

Nous vous invitons à partager l'aventure du LHC avec ceux qui l'animent, à comprendre l'enjeu culturel fondamental de ces questions «à l'envers», et à découvrir comment nous avons trouvé les moyens d'y répondre.

Yves Sacquin

### Sommaire

#### DOSSIER

- ▼ De la naissance du Cern au LHC p. 2
- ▼ Investissement de l'Irfu p. 2
- ▼ Une matière à penser p. 3
- ▼ La physique à remonter le temps p. 4-5
- ▼ Des détecteurs géants pour voir le minuscule p. 6-7
- ▼ Le magnétisme de l'Irfu p. 8-9
- ▼ Un, deux, trois, ... l'infini p. 10-11
- ▼ Le LHC, ... et après p. 12

#### ACTUALITÉS

- ▼ Dernières nouvelles du LHC p. 3

# De la naissance du Cern au LHC

Une interview de Robert Aymar par Ursula Bassler



Robert Aymar devant une section de l'accélérateur LHC.

**Robert Aymar :** Je suis actuellement Directeur général du Cern depuis quatre ans et demi. Je suis ravi de vous accueillir pour cette interview.

**Ursula Bassler :** Pouvez-vous nous dire ce qu'est le Cern et nous retracer son histoire ?

**RA :** En 1948, on sortait de la guerre, Louis de Broglie ainsi que d'autres scientifiques et philosophes comme Monsieur de Rougemont, ont milité pour la création d'un "centre d'excellence" unique qui permettrait de retrouver une position prééminente de l'Europe, notamment en sciences de base et en physique. Entre 1949 et 1952, ont été noués des contacts multiples dans lesquels les français se sont illustrés, fussent-ils des administrateurs comme Dautry ou des scientifiques comme Auger et Kowarsky. Cette volonté des scientifiques a abouti à la création du Cern par un traité signé en 1954 par douze pays européens. Depuis, huit autres pays ont ratifié ce traité. A l'époque, c'était un concept très nouveau avec une grande perspective d'avenir. Ces contacts ont facilité la création de la Ceca (Communauté du charbon et de l'acier) et, en 1956, le traité créant l'Union Européenne. Tout ceci montre le rôle éminent de la science dans le rassemblement autour des idées d'Europe unie.

**UB :** Pourquoi avoir décidé la construction du Large hadron collider (LHC) ?

**RA :** Nous sommes arrivés à la compréhension des briques élémentaires de l'Univers (et des forces qui les lient) sur la base d'un modèle dit «standard». Il est en remarquable accord avec tous les résultats expérimentaux accumulés à ce jour, notamment ceux obtenus auprès du Large electron positron collider (LEP). Cependant, il est certain qu'il ne pourra pas reproduire les processus à des échelles d'énergie plus hautes que celles que nous avons testées jusqu'à présent. D'autre part, ce modèle comporte des lacunes. Par exemple, nous savons qu'il existe dans l'Univers une matière que nous appelons «noire» que nous ne connaissons pas et qui n'est pas identifiée dans le modèle standard.

Pour avancer, il a fallu concevoir cet accélérateur unique, le LHC, qui permettra une compréhension d'un niveau supérieur à celle du modèle standard. Cet accélérateur n'a pas pour vocation de valider tel ou tel point, mais de «découvrir». On ne sait pas ce que l'on va obtenir et c'est un aspect essentiel et excitant de ce projet ! Nous savons qu'il nous manque des maillons pour comprendre l'Univers. Sans le LHC, nous n'aurions aucun moyen sur terre pour en connaître la nature.



Genève, 10 septembre 2008, le premier faisceau de protons fait le tour de l'anneau de 27 km du LHC. Robert Aymar, à droite, en compagnie de Carlo Rubbia et de Lynn Evans, applaudit ce moment historique.

En 1996, le Conseil a donc décidé la construction du LHC et, à présent, nous allons vivre les premières collisions. Ces expériences vont être poursuivies sur une dizaine ou une vingtaine d'années avec des améliorations successives. Le LHC va donc non-seulement décrire l'inconnu, mais aussi aider à déterminer les expériences futures. Ce besoin de compréhension, ce caractère unique, a attiré les scientifiques du monde entier et suscité l'intérêt, je l'espère, des citoyens.

**UB :** Comment expliquez-vous que des gens du monde entier travaillent ensemble ?

**RA :** le LHC est une expérience unique au monde et tous les scientifiques désireux de mieux comprendre les origines de l'Univers veulent venir travailler au Cern. Leur accueil est rendu possible par une grande ouverture du Cern sur le plan international. Le Cern a cette particularité d'avoir réussi à rendre pacifiques, par simple osmose, les relations entre des scientifiques en compétition, de cultures très différentes. Le laboratoire est un exemple de richesse par la diversité car c'est en rassemblant de petits moyens qu'on aboutit à une grande cohésion.

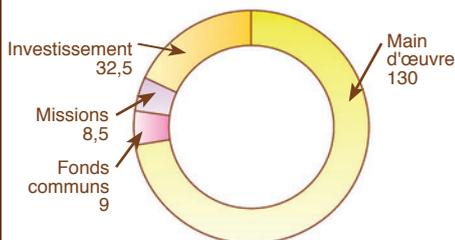
Ursula Bassler est responsable du Service de physique des particules de l'Irfu et membre de l'expérience DØ au Fermilab.



Extrait d'un témoignage sur le LHC destiné à l'internet (8prod-CEA-CNRS).

BILAN

Participation de l'Irfu à la construction du LHC (en M€)  
1995-2008  
1300 hommes.an soit 13 hommes.siècle



La contribution de l'Irfu au LHC pour les années 1995-2008 s'élève à 180 M€ en coût semi complet (base 2008 compte tenu des taux moyens d'inflation sur la période).

Cette contribution tient compte de l'implication de l'Institut dans la réalisation des dispositifs expérimentaux Atlas (détecteur, toroïde), CMS (détecteur, solénoïde), Alice, et des quadripôles ainsi que dans la grille de calcul.

Aux investissements de 32,5 M€ il convient d'ajouter les dépenses directement engagées par le Cern et pilotées par l'Irfu d'un montant de 2,5 M€.

Au total ce sont 1300 hommes.an, techniciens, ingénieurs et physiciens qui ont contribué à ces réalisations. Enfin on peut ajouter que plus de 20 M€ ont donné lieu à des contrats avec le Cern.

# Une matière à penser

Par Étienne Klein

**Au cours de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, les «conquérants du minuscule» que sont les physiciens des particules ont accompli des progrès spectaculaires. Ils ont mis sur pied leur «modèle standard», qui reproduit remarquablement bien tous les résultats expérimentaux obtenus à ce jour, même les mesures les plus précises.**

La messe est-elle dite pour autant ? Non, pour deux raisons. La première tient à ce que des questions pressantes demeurent sans réponse claire : d'où vient que les particules ont une masse ? Qu'est-il advenu de l'antimatière présente dans l'univers primordial ? De quoi est constituée la matière noire ? La seconde raison tient à ce que des problèmes d'ordre conceptuel ont été identifiés. D'abord, à très petite distance, les principes sur lesquels le modèle standard s'appuie entrent en collision les uns avec les autres, de sorte que les équations ne fonctionnent plus. C'est l'indice qu'un nouveau cadre conceptuel devient nécessaire pour décrire les phénomènes qui se sont déroulés à plus haute énergie, dans l'univers primordial. Ensuite, le modèle standard laisse à la marge la quatrième force, la gravitation, décrite par la relativité générale. Comment l'intégrer ? Ou, si on ne peut pas l'intégrer, comment construire un cadre synthétique permettant de décrire à la fois la gravitation et les trois autres forces ? L'affaire, on le sait, s'avère fort délicate, car l'espace-temps de la physique des particules est plat et rigide tandis que celui de la relativité générale est souple et dynamique. Des théoriciens tentent de relever ce défi. Ces gens qui calculent comme les rossignols chantent n'hésitent plus à formuler d'étranges hypothèses, par exemple que l'espace-temps possède plus de quatre dimensions ou bien qu'il est discontinu plutôt que lisse. Faudra-t-il un jour reconnaître que l'espace des petits oiseaux et le temps de la pendule ne sont que des notions commodes, qui émergeraient de structures ne les contenant pas à toute petite échelle ?

Du côté expérimental, c'est du LHC qu'on doit s'attendre à des surprises dans les années qui viennent. Simple affaire de récurrence : tout au long de son histoire, la physique des particules a régulièrement détruit des préjugés, démonté des certitudes, ouvert des perspectives inédites. Il lui est même arrivé de faire des «découvertes philosophiques négatives», pour reprendre une expression inventée par Fritz London et Edmond Bauer, deux des pères de la physique quantique : certains de ses résultats modifient les termes en lesquels certaines questions philosophiques se posent, et s'invitent ainsi dans des débats qui leur sont a priori extérieurs. Ils entrent ainsi de plain-pied dans l'histoire des idées et cela les rend intellectuellement irremplaçables. Qui oserait de nos jours disserter de la matière en en restant à Aristote, sans jamais évoquer la découverte de l'atome auquel le philosophe ne croyait pas ? Ou discuter de la nature du «réel» sans faire référence aux leçons révolutionnaires de la physique quantique ? Certaines avancées scientifiques obligent la réflexion philosophique à se remobiliser, à ouvrir de nouveaux chemins de pensée, parfois à carrément se corriger.



© CEA Imag'In Ifru-Alain Porcher

Cette envergure philosophique de la physique des particules (mais aussi celle du reste) n'est pas assez mise en avant. Qu'elle le devienne davantage, et l'image de la *big science* en sera transformée. Perçue comme une entreprise coûteuse, opaque et largement dominée par les lourdeurs organisationnelles, celle-ci apparaîtra aussi comme une occasion de penser, de penser vertigineusement.

Car dans les contrées nouvelles que la physique des particules explore pas à pas, grâce à des méthodes particulières dont l'efficacité est sans concurrence, nos connaissances et nos ignorances se frôlent, se parlent, se touchent presque.

Étienne Klein, *physicien et philosophe des sciences, dirige le Laboratoire de recherche sur les sciences de la matière du CEA.*

## ACTUALITÉS

### Dernières nouvelles du LHC

Genève, 10 septembre 2008, 10h28, le premier faisceau injecté dans le Grand collisionneur de hadrons (LHC) du Cern a fait un tour complet de l'anneau de 27 kilomètres. Malheureusement, un incident s'est produit le vendredi 19 septembre lors de la mise en service, sans faisceau de particules, du dernier secteur du LHC, le secteur 3-4. L'incident, dû à une connexion électrique défectueuse entre deux aimants, impose un réchauffement de ce secteur pour que les réparations puissent être effectuées. Cela implique un arrêt d'au minimum deux mois du fonctionnement du LHC, qui sera suivi de l'arrêt hivernal programmé. Les faisceaux reviendront au printemps et la montée en puissance pourra reprendre. Il faudra de toute façon plusieurs mois pour atteindre un fonctionnement régulier et fiable de cette machine complexe et commencer à récolter la moisson des découvertes scientifiques promises par l'accélérateur de particules le plus puissant du monde.

# La matière remonte le temps

Les physiciens de l'Irfu se sont focalisés sur deux grandes thématiques : l'exploration et de gluons. Au-delà de leur intérêt pour la connaissance de la matière et des interactions jusqu'aux premiers instants de notre Univers, quand les particules ont acquis une masse, les premières particules composites.

## Atlas et CMS, aux limites du modèle standard

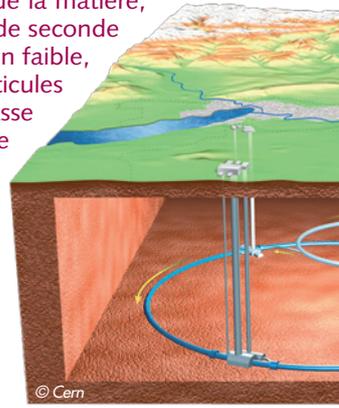
Atlas et CMS vont étudier les interactions fondamentales entre constituants ultimes de la matière, à des énergies de l'ordre de celles qui prévalaient quelques fractions de milliardièmes de seconde après le Big-Bang. À ce moment de l'histoire de l'Univers, les messagers de l'interaction faible, appelés W et Z, ont acquis des masses parmi les plus élevées du monde des particules alors que le messager de l'interaction électromagnétique, le photon, restait de masse nulle. Ce phénomène aura des conséquences importantes sur la structure de la matière puisque l'interaction électromagnétique, de portée infinie, va régner sur l'atome et les propriétés macroscopiques de la matière alors que l'interaction faible verra sa portée limitée à des distances bien plus petites que celles d'un noyau atomique.

**L**e modèle standard propose un scénario explicite pour la génération des masses des particules W et Z, faisant intervenir le fameux boson de Higgs. Mais à ce jour, aucune indication expérimentale ne nous permet d'affirmer que ce scénario soit le bon. Le LHC devrait combler cette lacune et permettre une compréhension plus profonde des interactions fondamentales en explorant le modèle standard jusqu'à ses limites.

LHC espère bien mettre ces nouvelles théories à l'épreuve de l'expérience.

### Comment va-t-on faire ces découvertes ?

Lors de la collision des deux faisceaux circulant dans l'anneau du LHC, une partie de la colossale énergie mise en jeu est convertie en nouvelles particules qui jaillissent du point d'interaction. Certaines d'entre elles, trop instables, se désintègrent en d'autres particules avant d'atteindre les détecteurs.



### Le modèle standard

Le modèle standard de la physique des particules est une théorie qui décrit les interactions forte, faible et électromagnétique, ainsi que l'ensemble des particules élémentaires qui constituent la matière. Développé dans les années 60/70, c'est une théorie quantique des champs qui est naturellement compatible avec les principes de la mécanique quantique et de la relativité. L'ensemble des tests expérimentaux des trois forces fondamentales décrites par le modèle standard a révélé un très bon accord avec les prédictions.

### Qu'espère-t-on observer ?

Dans le modèle standard, la génération des masses repose sur l'existence d'une nouvelle particule, le boson de Higgs, dont la masse se situerait entre 100 et 200 GeV. S'il existe, il devrait être découvert par Atlas et CMS car la grande énergie du LHC permettra de le produire et de l'observer.

L'observation du boson de Higgs serait une immense découverte

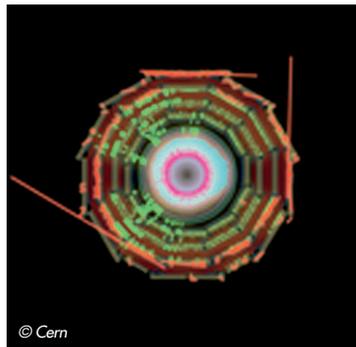
scientifique mais ce n'est pas le seul but du LHC et une «nouvelle physique» pourrait se manifester dans la gamme d'énergie accessible. Malgré la solidité de ses bases expérimentales, le modèle standard souffre de problèmes conceptuels. En particulier il n'explique pas la grande diversité des masses des particules élémentaires. De plus il n'aborde pas l'un des problèmes centraux de la cosmologie : la matière noire qui constitue 80% de la matière de l'Univers d'après ses effets gravitationnels, mais dont on ne connaît pas la nature. Les explications sont à chercher «au-delà» du modèle standard. Les théories candidates ne manquent pas. La supersymétrie, par exemple, d'une grande élégance conceptuelle, comble certaines lacunes du modèle standard et prédit l'existence de nouvelles particules, dont certaines pourraient constituer la matière noire de l'Univers. D'autres théories font intervenir des dimensions d'espace supplémentaires afin d'expliquer la faiblesse de la gravitation par rapport aux autres interactions dans le monde microscopique. En réalisant pour la première fois des collisions à des énergies jamais atteintes, le



Atlas et CMS (ici le détecteur Atlas) ont été conçus comme des détecteurs polyvalents, cherchant à mesurer les caractéristiques des particules produites lors des collisions proton-proton.

Chaque processus à l'œuvre lors de la collision laissera donc une signature spécifique. On recherchera ainsi le boson de Higgs par ses produits de désintégration typiques : par exemple, deux bosons Z donnant par désintégration quatre leptons (électrons ou muons) identifiables dans le détecteur. La production de particules d'un type nouveau devrait conduire à des signatures spécifiques dans les détecteurs qu'on peut espérer distinguer de celles prédites par le modèle standard.

Une fois cette étape franchie, les résultats d'Atlas et CMS, associés à ceux d'autres expériences de physique des particules, astrophysique ou cosmologie, indiqueront la voie à suivre dans notre voyage vers les premiers instants de l'Univers !



Premières particules détectées dans le calorimètre et les chambres à muons de CMS lorsque le faisceau a été envoyé dans un collimateur, le 10 septembre 2008 à 9 h 50.

*CMS : Compact muon solenoid*

*Atlas : A toroidal LHC apparatus*

*Alice : A large ion collider experiment*

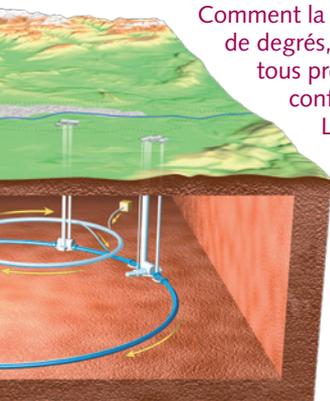
*LHCb : Large hadron collider beauty experiment. Cette expérience étudiera l'asymétrie entre matière et antimatière.*

Par Hervé Borel, Anne-Isabelle Etievre et Gautier Hamel de Monchenault

du modèle standard jusqu'à ses propres limites et l'étude du plasma de quarks  
tions fondamentales, ces deux questionnements nous font remonter le temps  
asse ou, un peu plus tard, lorsque la soupe originelle de quarks et de gluons formait

## Alice, à la rencontre de la matière primordiale

Comment la matière se comporte-t-elle lorsqu'elle est chauffée à une température de 2000 milliards de degrés, 100 000 fois plus grande que celle au cœur du Soleil, conditions qui auraient prévalu aux tous premiers instants de l'Univers ? Peut-on rendre libres les quarks alors qu'ils sont aujourd'hui confinés à l'intérieur des protons et neutrons ? Quelle est l'origine de ce confinement ? L'expérience Alice va apporter des réponses à ces questions.



Les faisceaux du LHC se croiseront toutes les 25 ns ( $10^{-9}$  s) aux quatre points d'expérimentation : leur collision donnera lieu à la création de milliers de particules. Autour de chaque point de collision se développent les différentes couches des détecteurs géants, Alice, Atlas, CMS et LHCb. L'Irfu a participé à la construction des trois premiers.

accélérera pour cela des ions de plomb à des énergies encore jamais atteintes, de 2,75 TeV ( $10^{12}$  eV) par nucléon, pour chacun des deux faisceaux. Le plasma qui n'excédera pas une taille de l'ordre du femtomètre cube ( $10^{-15}$  m  $\times$   $10^{-15}$  m  $\times$   $10^{-15}$  m) vivra quelques  $10^{-23}$  s. Cet état va refroidir puis subir une transition de phase vers la matière hadronique ordinaire, comme lors de l'expansion de l'Univers, créant de nombreuses particules qui atteindront les détecteurs. A partir des informations reçues, nous devons remonter au moment de la collision afin de comprendre les caractéristiques si particulières de cet état de la matière.

La chromodynamique quantique (QCD), théorie décrivant l'interaction forte qui lie les quarks pour former les protons et neutrons, prédit une transition de phase entre la matière qui nous entoure et le plasma de quarks et de gluons, un état de la matière dans lequel les quarks ne sont plus confinés dans les nucléons. L'univers primordial tout entier serait passé par cet état quelques millièmes de seconde après le Big Bang.

Pour recréer ces conditions de température et de densité en laboratoire, nous devons faire entrer en collision des ions lourds de très haute énergie. Le LHC

NDLR) et du  $\Upsilon$  (upsilon), formées d'une paire de quark et d'antiquark lourds, respectivement de charme et de beauté. Le nombre de ces particules, produites très tôt après la collision, est modifié si un plasma est formé. Il s'agit alors de comparer leur production entre des collisions d'ions qui sont les seules susceptibles de créer un plasma et des collisions entre protons (et entre protons et noyaux) qui servent de référence et permettent d'étudier la matière nucléaire ordinaire.

Alice reconnaîtra ces particules grâce aux produits de leur désintégration, paires  $e^+e^-$  détectées dans le bras central et  $\mu^+\mu^-$  dans le spectromètre à muons. Ce dernier comprend des absorbeurs, dix plans de chambres de trajectographie, un dipôle magnétique chaud de 0,7 tesla et quatre plans de chambres de déclenchement. L'ensemble de la détection et les physiciens sont prêts. Ils n'attendent que les premières collisions pour plonger dans l'étude de ce plasma originel.

Attente des premiers événements dans la salle de contrôle d'Alice.

### Le plasma quark gluon

En portant la matière à très haute température, quelques milliers de degrés, les atomes «surchauffés» finissent par se dissocier : les électrons et le noyau de chaque atome, rompent les liens par lesquels la force électromagnétique maintenait la cohésion de l'atome. Cet état spécifique de la matière est appelé plasma.

Le plasma que cherche à observer Alice correspond à une dissociation supplémentaire, celle des noyaux atomiques en leurs constituants élémentaires : les quarks et les gluons. La force qui règne en maître ici est la force forte, qui confine ces particules à l'intérieur des protons et des neutrons du noyau. Comprendre le mécanisme de ce confinement est un enjeu majeur de la recherche fondamentale. La violence des collisions qui auront lieu au centre d'Alice doit permettre d'atteindre la formation de ce plasma de quarks et de gluons, un état extrême de la matière prédit par la théorie mais jamais observé jusqu'à présent.



Alice est destiné à la mesure des produits de désintégration des particules fugaces créés lors des collisions d'ions lourds.

### Des collisions aux résultats de physique

Les particules générées par les collisions interagissent dans les détecteurs. Les signaux électriques résultant de ces interactions sont mis en forme et numérisés par une électronique rapide. Les codes de reconstruction utilisent ces informations pour identifier ces particules et fournir une « photographie » de chaque collision. Lors de l'analyse, les physiciens comparent les données à des simulations qui incluent à la fois les processus physiques en jeu lors de la collision et les interactions des particules dans les détecteurs. On pourra ainsi étudier l'ensemble des observables mesurées dans chaque réaction et comprendre la physique devenue accessible grâce au LHC.

Hervé Borel, physicien nucléaire travaille sur l'étude du plasma quark-gluon dans Alice.

Gautier Hamel de Monchenault travaille sur CMS où il prépare notamment des analyses qui testeront le modèle standard.

Anne-Isabelle Etievre est physicienne dans le groupe Atlas, où elle se consacre à l'étude du quark top.

Le détecteur Alice analysera les dizaines de milliers de particules produites lors de chaque collision. Afin de sonder le plasma, nous nous intéressons plus particulièrement aux particules des familles du  $J/\Psi$  (prononcer Gipsy

# Des détecteurs géants

La construction des détecteurs pour le LHC est une aventure scientifique, technologique, humaine et financière. En 1980, lorsque le projet de collisionneur hadronique du Cern a commencé à être discuté, par seconde et 800 millions de collisions proton-proton, le LHC allait soumettre les détecteurs précédents. Les exigences de rapidité, de résistance au rayonnement des particules et de précision exigeaient la mise au point de solutions innovantes.

**D**ès les phases de recherche et développement pour les détecteurs du LHC, l'Irfu s'est attelé à la tâche en travaillant sur la calorimétrie à argon liquide, sur l'étude de nouveaux cristaux scintillants plus rapides, plus denses et plus résistants et en développant, en association avec la Direction des applications militaires et la Direction de la recherche technologique, une nouvelle filière microélectronique durcie aux radiations. L'environnement du CEA, avec ses composantes technologiques et nucléaires, a été un atout précieux pendant toute cette phase. Ainsi, par exemple, les premiers tests de résistance aux neutrons des cristaux de tungstate de plomb ( $PbWO_4$ ) qui allaient équiper CMS ont été conduits par des équipes de Saclay et du Lapp<sup>1</sup> auprès du réacteur nucléaire Ulysse de l'INSTN. Ces actions communes des physiciens, des ingénieurs et des techniciens ont

Pendant toute la période de construction des détecteurs LHC qui vient juste de s'achever, cet été, l'Institut a mobilisé des forces considérables. Tous les métiers de l'Irfu ont été concernés, physiciens, électroniciens, mécaniciens, opticiens, cryogénistes, automaticiens et informaticiens. Au final c'est plus de 100 M€, constitués principalement du travail hautement spécialisé de 90 personnes pendant une décennie, que l'Irfu aura apportés aux trois détecteurs.



Travail sur les connexions d'Alice.

Et maintenant ? Une étape importante s'est achevée mais l'aventure continue... Les physiciens du SPP et du SPhN vont exploiter ces expériences hors du commun avec l'espoir de grandes découvertes. Les informaticiens de l'Institut œuvrent dans le cadre du projet Grif (*Scintillations N°76*), pour fournir les moyens de calcul nécessaires à l'analyse des 15 pétaoctets de données produites chaque année par le LHC. Tous travaillent déjà aux instruments qui accompagneront la montée en luminosité du LHC et se préparent à pousser les techniques et l'innovation encore au-delà, en imaginant les détecteurs d'un futur collisionneur  $e^+e^-$ .



Atlas.

permis à l'Institut de prendre une place de premier plan dans les collaborations et d'apporter, dès l'approbation du LHC en 1994, une contribution majeure à la construction de la calorimétrie électromagnétique des deux expériences Atlas et CMS et des spectromètres à muons d'Atlas et Alice (détails dans les encarts).

(1) Laboratoire d'Annecy-le-vieux de physique des particules

## Accordéon et faisceaux lasers : la calorimétrie électromagnétique d'Atlas et de CMS

Les calorimètres électromagnétiques mesurent la position et l'énergie des photons et des électrons produits lors des interactions. Si, pour les deux expériences, les exigences sont communes : rapidité de réponse, forte segmentation, tenue aux rayonnements, Atlas et CMS ont suivi des voies différentes pour leur calorimétrie. Atlas a développé un calorimètre constitué d'un empilage de plomb et d'argon liquide, peu sensible aux rayonnements, dans une géométrie innovante «en accordéon» qui assure la rapidité du signal et l'herméticité du détecteur. CMS s'est orienté vers un calorimètre homogène constitué d'un assemblage de cristaux lourds de  $PbWO_4$  qui délivrent un signal de scintillation rapide, détecté par des photodiodes à avalanche. Ce choix privilégie la précision de la mesure de l'énergie mais la sensibilité des cristaux aux rayonnements doit être corrigée.

Sur Atlas, l'Institut a construit un tiers des 36 modules (plomb-argon liquide). Il a également fourni les 80 000 circuits intégrés spécifiques qui équipent les voies de lecture du calorimètre. Toujours sur le calorimètre, l'Irfu a pris la responsabilité des 135 cartes d'électronique (*Tower Builder*) qui fournissent un signal proportionnel à l'énergie déposée dans les modules du calorimètre et le délivrent au système de déclenchement.

Sur CMS, l'Irfu avait la charge du système de suivi de la réponse des 80 000 cristaux de tungstate de plomb ( $PbWO_4$ ), élément essentiel pour corriger de leur vieillissement et pour préserver la précision du calorimètre.

Une électronique durcie en technologie Dmill (Durci mixte sur isolant logico-linéaire) a été utilisée dans Atlas et CMS afin de limiter le vieillissement dû aux radiations.



© Cern

Fibres optiques po



CMS.



Technicien inspectant un des cristaux de  $PbWO_4$ .

# s pour voir le minuscule

Par Philippe Rebourgeard

gique et humaine qui s'est étendue sur près de deux décennies. A la fin des années é, les obstacles à surmonter étaient considérables. Avec 40 millions de croisements détecteurs de particules à des contraintes jamais rencontrées sur les accélérateurs es chargées et des neutrons ainsi que le nombre considérable de voies de mesure antes à la pointe des technologies existantes.



© Peter Ginter/Nikhef

Détecteurs pour CMS

Chambre de trajectographies d'Alice.



© Cern

## Les spectromètres à muons d'Atlas et d'Alice

Les muons sont des particules recherchées dans la désintégration du boson de Higgs pour Atlas et CMS ou comme signature de la formation d'un plasma quarks-gluons pour Alice. Dans les deux cas, il s'agit de mesurer avec précision, à l'aide de détecteurs de traces gazeux (chambres), la direction des muons et leur courbure dans un champ magnétique.

Dans Atlas, l'Institut s'est impliqué dans l'alignement des chambres, la mesure de leur position et de leurs déformations (*Scintillations* N°76). Cette fonction est assurée avec une précision de 30 microns par un ensemble de près de 6000 capteurs de position. Parallèlement l'Irfu a également la responsabilité des 1800 capteurs magnétiques qui permettent d'établir la carte de champ du toroïde.

Dans Alice, l'Institut a contribué à la conception et à la construction des trois grandes stations du bras di-muons en assurant la fourniture des panneaux support, en fabriquant un quart des plans de détection et en supervisant leur intégration dans la cavité Alice.

## Une lecture sélective pour une coupure en finesse

Par Philippe Gras et Irakli Mandjavidze

Comment limiter la quantité de données du calorimètre électromagnétique du *Compact muon solenoïd* (CMS) à un niveau acceptable pour le système d'acquisition ? Vous pouvez trouver la réponse évidente : appliquer un seuil suffisamment haut sur chaque canal de lecture, mais cela entraînerait une perte de précision inacceptable pour le calorimètre électromagnétique de CMS. Avec ses 80 000 cristaux, il a été conçu pour des mesures d'une grande précision mais il faut réduire ses 1,5 mégaoctets de données brutes en 100 kilooctets sans altérer la précision ! Les scientifiques de la collaboration CMS, comprenant une forte implication de l'Irfu, ont trouvé la solution : une lecture sélective adaptant le seuil appliqué sur chaque canal, événement par événement. Les zones du détecteurs comportant un dépôt significatif d'énergie, signe du passage d'un électron ou d'un photon, sont lues sans aucune suppression de canaux. Des études poussées menées entre autres à l'Irfu ont démontré l'efficacité de cette méthode. La réalisation d'un système électronique capable d'appliquer cet algorithme à des événements arrivant aléatoirement à un taux de 100 kHz et pouvant être séparés de seulement 75 ns représentait un vrai défi. Nous avons utilisé les dernières

avancées technologiques dans le domaine des transmissions optiques rapides (transmission parallèle multi-gigabit) et des puces à logique programmable (FPGA) à forte intégration pour fournir une solution compacte, le *Selective readout processor* (SRP). Ce système est constitué de 12 cartes électroniques identiques et d'un réseau de 250 liens optiques.

Le SRP est opérationnel depuis l'été 2008. Durant les campagnes de prises de données de rayons cosmiques et de halo de faisceaux du LHC, le système SRP s'est montré d'une extrême fiabilité et efficacité, répondant à l'ensemble des spécifications demandées. L'équipe du groupe CMS de l'Irfu attend impatiemment le moment où le SRP devra traiter les données des premières collisions de hadrons.



© CEA

Travail à Saclay pour le détecteur Atlas.

# Le magnétisme de l'Irfu

Les savoir-faire et expertises développés à l'Irfu en cryogénie et magnétisme, du plus grand collisionneur de particules au monde et de ses détecteurs, l'accélérateur et des aimants des détecteurs Atlas et CMS.

## Les quadripôles : une collaboration réussie de 17 ans

Dès 1989, une collaboration s'est mise en place entre le Cern et le CEA-Saclay, conséquence directe des besoins du Cern en partenaires pour construire le LHC, et du savoir-faire de l'Irfu acquis lors de la fabrication des quadripôles supraconducteurs pour Hera à Desy (Hambourg). Cet accord portait sur la conception à Saclay de prototypes de quadripôles.



Mise en place de l'isolation sur les quatre pôles du quadripôle.

Après l'approbation du LHC en décembre 1994, l'Irfu a eu la charge des masses froides<sup>1</sup> des sections droites courtes, cryostats longs de 6,7 m, contenant les quadripôles et des aimants correcteurs. Associées avec 3 dipôles de 15 m de long, elles constituent la maille élémentaire du LHC. La conception de ces *Short straight section* (SSS) a débuté en février 1996 avec la signature par le Cern, le CEA et le CNRS d'un protocole de collaboration dans le cadre de la contribution exceptionnelle de la France au LHC. L'Irfu se voyait confier la conception et la fabrication de trois prototypes, le lancement de la production dans l'industrie et le suivi de la fabrication des masses froides des quadripôles supraconducteurs des SSS.

Une particularité de ces aimants tient à leur grande variété : Les 360 masses froides prévues comptent 40 variantes, dues aux multiples combinaisons d'aimants correcteurs montés aux deux extrémités des quadripôles, à leur fonction focalisante ou défocalisante et aux différentes interfaces avec les éléments voisins.

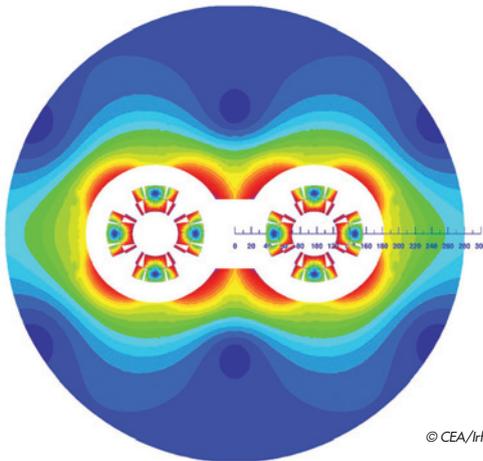
Au terme d'un appel d'offre, l'entreprise allemande Accel

*Instruments* s'est vue attribuer, fin 1999, la construction des quadripôles et leur assemblage. Dans ce but, Accel a spécialement transformé deux immenses halls industriels et a creusé et aménagé une fosse de huit mètres de profondeur pour l'assemblage vertical des masses froides. La compagnie a dû aussi s'équiper d'outillages supplémentaires, capables d'assurer le positionnement du conducteur sur une longueur de 3,2 m avec une précision de l'ordre de 20 microns.



Installation d'une portion droite SSS de l'accélérateur dont l'Irfu avait la charge.

(1) La masse froide est la partie interne de la section d'accélérateur portée à la température de 1,8 K.



Calcul de la carte de champs magnétiques des quadripôles.

Dès avril 2001, le transfert de savoir-faire et le suivi de la production nécessitaient une présence régulière des experts de l'Irfu dans l'entreprise. Deux techniciens ont d'abord assuré le transfert de technologie puis l'équipe s'est renforcée d'un ingénieur sur place à temps partiel lors du démarrage de la fabrication. A la mi-2002, les excellentes performances du premier quadripôle, testé au Cern, confirmait la fiabilité de la conception et autorisait la fabrication en série.

En pleine production, quatre masses froides sortaient chaque semaine. La livraison de la centième masse froide était célébrée en décembre 2004 et, en novembre 2006, dix ans après la signature de l'accord de collaboration et six ans après celle du contrat avec Accel, la production des masses froides des quadripôles principaux du LHC était achevée. L'étroite collaboration entre le Cern, le CNRS et l'Irfu a été le moteur de ce succès.

Jean-Michel Rifflet, ingénieur au SACM, était chef de projet quadripôle LHC de 1992 à 2002. Il prépare aujourd'hui des aimants dans le cadre de projets européens.

gnétisme lui ont permis d'être en première ligne dans la réalisation  
eurs géants. L'Irfu a participé à la construction des quadripôles de

Par Jean-Michel Rifflet et Pierre Védrine

## Les grands aimants supraconducteurs au service des détecteurs

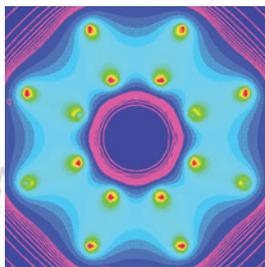
Les détecteurs du LHC attendent les premières collisions des faisceaux de protons au Cern, depuis septembre 2008. Les vastes ensembles expérimentaux qui scrutent les particules produites dans ces collisions détermineront leurs quantités de mouvement en mesurant la courbure de leur trajectoire dans un champ magnétique connu. Avec le LHC, les particules ont tellement d'énergie qu'il faut un grand volume de détection et des champs magnétiques puissants capables de courber ces trajectoires pour les mesurer. Seule la technologie des aimants supraconducteurs permet ces performances avec une dépense d'énergie minimale.

Les progrès réalisés dans le domaine des aimants supraconducteurs ont permis de concevoir et de construire les grands systèmes magnétiques des détecteurs Atlas et CMS. C'était un véritable défi, à la fois scientifique, technologique et industriel. Les aimants réalisés pour les détecteurs Atlas et CMS fonctionnent tous deux à la température de l'hélium liquide, soit 4,6 K (-269 °C), et disposent chacun de leur propre liquéfacteur d'hélium. Les études pour le toroïde principal d'Atlas et le solénoïde de CMS ont débuté à l'Irfu à la fin des années 1980, pour une mise en service au Cern en septembre 2008.

### L'aimant toroïdal d'Atlas

Le toroïde principal d'Atlas est constitué de huit grandes bobines de 25 m de long et 5 m de large disposées autour du point de collision, de sorte que le champ magnétique ainsi produit l'entoure à la manière d'un tore, d'où l'appellation de «toroïde». Les bobines totalisent plus de 30 km de câble supraconducteur, et occupent un volume équivalent à celui d'un immeuble de six étages. Le détecteur possède en outre deux aimants toroïdaux «bouchons» et un solénoïde central, tous supraconducteurs.

L'énergie stockée dans le toroïde est de 1 100 MJ, pour un champ magnétique de 0,4 T au centre du toroïde et de 3,9 T sur le supraconducteur. Une bobine à l'échelle 1/3, appelée B0, a d'abord été réalisée à Saclay et testée pour validation au Cern en 2001. Les bobines définitives ont été assemblées au Cern à partir de composants sous-



Carte du champ toroïdal d'Atlas.

traités dans l'industrie européenne. L'Irfu a assuré le suivi industriel de la fabrication de la plupart des composants, de leur montage et des tests individuels effectués en surface au Cern, puis de leur assemblage dans la caverne d'Atlas. En parallèle, l'Irfu a également réalisé l'anneau qui assure l'alimentation des bobines en hélium réfrigérant et en énergie. En novembre 2006, l'ensemble du toroïde a été testé avec succès, transportant un courant de 21 000 A (soit 500 A de plus que le courant nominal). L'expérience Atlas est maintenant opérationnelle.

### Le solénoïde de CMS

Ce solénoïde supraconducteur, le plus grand jamais réalisé au monde, a été conçu à l'Irfu, qui a aussi eu en charge l'étude et la responsabilité du suivi des processus de montage, allant jusqu'à créer dans ce but des outillages uniques. Les opérations de montage, extrêmement complexes, se sont déroulées sans problème majeur.

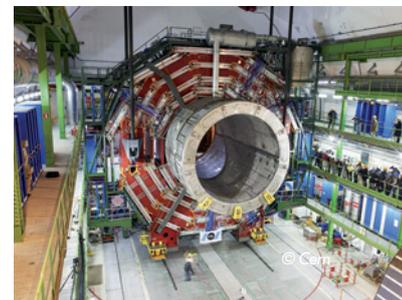
Le solénoïde, de 7 m de diamètre et 12,5 m de long, produit un champ magnétique de 4 T ; il détient le record d'énergie magnétique stockée avec 2,6 GJ. Les différents modules ont été réalisés par l'industrie européenne, livrés et assemblés en position verticale dans le hall de surface de CMS et testés avec succès pendant l'été 2006. Une fois refroidi à 4 K, l'aimant a été alimenté progressivement en courant jusqu'à 19 141 A, atteignant ainsi son champ nominal au centre de 4 T. Tout cet ensemble est lui-même placé au centre d'une structure d'acier de 12500 tonnes. La culasse referme sur lui-même l'énorme champ magnétique produit par la bobine géante.

L'aimant avec le morceau central de la culasse a été descendu d'un bloc dans la caverne de l'expérience à 100 mètres sous terre. Le test final à 3,8 T s'est déroulé avec succès en septembre 2008.

Pierre Védrine, ingénieur au SACM, a travaillé sur l'aimant Atlas. Il est actuellement responsable de l'aimant à 11,7 T du projet Iseult.



© Cern



Retournement de la bobine de CMS et arrivée au fond de la bobine avec l'élément central de la culasse.



© CEA/Irfu Jean-Jacques Bigot

Bobine prototype B0 développée à Saclay



© Cern

Descente d'une bobine d'Atlas dans la caverne, 100 m sous terre.

# Un, deux, trois, ... l'infini

Propos recueillis par Emmanuelle de L...

Philippe Schune nous résume de façon imagée la façon de travailler dans nos expériences. On commence par faire un prototype (un) puis l'objet final (trois) qui sera construit en très grande quantité (l'infini). » Au-delà de l'infini des détecteurs, il y a une infinité de regards, ceux d'un grand projet de recherche jamais imaginé. Nous avons souhaité que ce soit la construction du LHC et de ses détecteurs.

© Peter Ginter-Nikhef



© CEA Imag'In Irfu-Alain Porcher

«L'origine de l'expérience Atlas remonte au workshop de Lausanne en 1984, organisé pour évoquer la possibilité de mettre un accélérateur à protons dans ce qui allait être ensuite le tunnel du LEP.

Cet accélérateur allait permettre d'explorer l'échelle du TeV ( $10^{12}$  eV), caractéristique de l'interaction électrofaible, très importante pour nous. Les expériences devaient donc présenter des performances bien au-delà des détecteurs qu'on savait faire à l'époque. Contrairement à ce que nous supposions en 1984, où l'on pensait être limité à une physique rustique et à la mesure d'un seul mode de désintégration du Higgs en quatre muons, les recherches et développements sur les détecteurs ont rendu possible une physique de précision. Avec le détecteur d'aujourd'hui, on a accès à la mesure d'une dizaine de modes d'identification.»

Bruno Mansoulié, Responsable d'Atlas à Saclay



© CEA Imag'In Irfu-Alain Porcher

«L'Irfu a eu la responsabilité du système optoélectronique garantissant l'étalonnage du calorimètre électromagnétique de CMS, un calorimètre haute performance à base de cristaux. Le rôle de ce système est de contrôler et de compenser la dérive des performances de ces cristaux engendrée par les doses élevées de radiations, et ce tout au long des dix années de fonctionnement prévues. La fiabilité de ce système optoélectronique très compact autorise son intégration au cœur-même du détecteur, et assurera la stabilité des mesures du calorimètre au cours du temps.

**Les retombées technologiques des développements pour CMS et le LHC sont nombreuses et bénéficient déjà à d'autres projets.»**

Jean-Marc Reymond,

Responsable à Saclay du projet « Electronique du Monitoring » pour le Calorimètre de CMS



© CEA Imag'In Irfu-Alain Porcher

«On avait largement contribué à la réalisation de l'aimant Aleph du LEP ce qui constituait un point fort pour prendre en charge l'aimant gigantesque de CMS, avec son champ magnétique intense de 4 teslas. **Il a cependant fallu composer un aimant réellement différent en utilisant de nouveaux concepts. On a mis assez vite en place des collaborations avec des industriels pour qu'il soit réalisable concrètement.**

Les premiers plannings prévoyaient la fin des travaux en 1999 mais c'était dû à la concurrence avec le projet américain, finalement abandonné, SSC. Dans la collaboration internationale CMS, la compétence de Saclay pour la conception et les moyens d'essais est reconnue comme unique.»

Francois Kircher, Chef de projet pour l'aimant CMS



© Cern

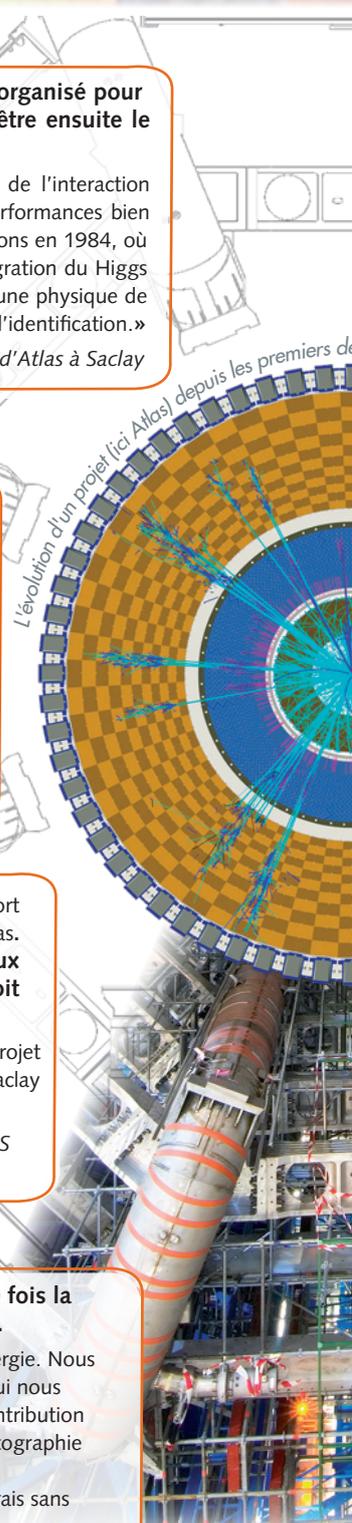
**«Le plasma quark-gluon qui peut atteindre environ 2000 milliard de degrés et 10 fois la densité nucléaire est obtenu par collision de noyaux très lourds comme le plomb.**

Le spectromètre di-muons mesure la trajectoire des muons ce qui permet de déduire leur énergie. Nous étudions plus particulièrement les  $J/\psi$  et les upsilons qui se désintègrent en deux muons et qui nous aident à comprendre le cœur du plasma. Parmi les sept pays de la collaboration muon, la contribution française de l'Irfu et de l'IN2P3 est la principale. Elle concerne surtout les chambres de trajectographie et ses 1, 2 millions de canaux ainsi que les chambres de déclenchement.

Diriger ce projet a été très enrichissant sur les plans technique, humain et culturel. Je retenterais sans hésiter cette aventure !»

Florent Staley,

Ancien responsable de la construction du bras di-muons qui était sous la responsabilité du CEA.



Ces interviews écoutées en en de LHC H www.lhc-

## Laboratoire et Yves Sacquin

ans la préparation du LHC : «Il y a quatre nombres importants  
un deuxième plus abouti (deux), avant de définir  
Extrait de son interview pour lhc-france.fr.  
es hommes et des femmes qui se sont investis dans le plus  
certains témoignent ici de leur travail durant les 20 ans de

© CEA Imag'In Irfu-Alain Porcher

«Les changements les plus radicaux, par rapport au LEP, ont été la dimension des équipes et l'interaction entre les nombreux instituts. Malgré les différences de culture et de façons de travailler, les équipes se sont soudées.»

En collaboration avec l'institut Nikhef (Pays-bas), nous nous sommes occupés de la réalisation du système d'alignement des chambres à muons de la partie centrale du spectromètre, depuis sa conception jusqu'à son intégration dans la caverne d'Atlas. Dans ce spectromètre gigantesque de 20 mètres de diamètre et d'une longueur de 25 mètres, le défi était d'obtenir un ensemble permettant d'atteindre des précisions de l'ordre de 30 microns qui soit homogène malgré la diversité des détecteurs fournis par les différents laboratoires impliqués dans le projet. Le rôle du chef de projet est de garantir une stabilité malgré des évolutions continues tant du point de vue des aspects techniques qu'humains.

Patrick Ponsot, Chef de projet à Saclay pour l'expérience Atlas-Muon



© CEA Imag'In Irfu-Alain Porcher

«On est parti sur la base d'un dessin sur une feuille A4 alors que maintenant l'expérience fait 45 mètres de long et 20 mètres de diamètre sans qu'on se soit vraiment rendu compte de l'évolution. Il y a eu pas mal de difficultés à surmonter liées à la taille et à la complexité de l'expérience.

**On veut, par exemple, aligner les détecteurs de muons qui couvrent des milliers de mètres carrés avec une précision équivalente à la taille d'un cheveu.»**

(Un alignement au poil ! NDLR).

Philippe Schune, Responsable scientifique d'Atlas muon



© CEA Imag'In Irfu-Alain Porcher

«À Saclay existaient à la fois des physiciens capables d'imaginer les détecteurs et des équipes d'ingénieurs capables de dimensionner et de réaliser ces objets de taille gigantesque.

Pour moi l'aventure a commencé en 1994 et je suis arrivé dans l'équipe avec pour mission de préparer en détail la réalisation, d'étudier la faisabilité industrielle du projet et de donner une estimation budgétaire. Durant l'été 1995, l'équipe de Saclay a proposé une nouvelle conception du toroïde d'Atlas. Nous avons innové pour rendre possible le transfert des forces depuis les parties froides vers les parties chaudes.

**Nous n'aurions pas pu poursuivre les travaux sans innovations.»**

Antoine Daël, Chef de projet pour la conception du toroïde d'Atlas et pour la réalisation de son prototype B0



© CEA Imag'In Irfu-Alain Porcher

«La grille de calcul est un élément incontournable dans le traitement des données du LHC.

Le nombre d'utilisateurs croît sensiblement à l'approche de la prise de données si bien que la charge de travail de nos équipes techniques augmente proportionnellement. Le succès de l'analyse des données du LHC est conditionné par la réussite du projet LHC computing grid (LCG).»

Jean-Pierre Meyer, Responsable scientifique de Grif,

**«Ce qui me pousse à continuer, c'est de voir que l'on arrive à faire fonctionner toutes les choses ensemble.**Nous sommes parfois agréablement surpris de voir que des éléments qui étaient assez instables avant nous rendent désormais de grands services. Nous avons l'espoir que tout cela fonctionne bien quand le LHC tournera et que ce soit un grand succès.»

Frédéric Schaer, Responsable du support technique et du monitoring



© CEA Imag'In Irfu-Alain Porcher

# Le LHC, ... et après ?

Scintillations

Par Pierre Lutz

**P**our avancer dans la connaissance du monde des particules, deux options très complémentaires se présentent : on peut soit se placer à la plus haute énergie possible et espérer y faire des découvertes, soit confronter le paradigme actuel avec les mesures les plus précises possible et quantifier les déviations par rapport aux modèles. Ces déviations sont à la mesure de notre ignorance et permettent de mettre en lumière l'existence d'une « nouvelle physique ».



Tunnels de l'ILC : galerie des klystrons à gauche, cryomodules accélérateurs à droite.

La première option est celle du LHC, ainsi que de tous les collisionneurs hadroniques qui l'ont précédé. Ce sont des machines de « découverte ». La seconde est plutôt celle des collisionneurs leptoniques dont le LEP et le SLC sont les plus récents exemples : les découvertes n'y sont pas exclues (gluon,  $J/\psi$ ), mais leur intérêt principal réside dans la précision des mesures qui peuvent y être faites, dans la compréhension profonde des mécanismes en jeu. Un exemple suffira pour le montrer : le LEP n'a pas pu découvrir le boson de Higgs, par son énergie trop faible, mais il a pu cependant dire que, s'il existe, sa masse est inférieure à 180 GeV.

Depuis une dizaine d'années, nous réfléchissons à un collisionneur électron-positon qui permettrait de préciser les caractéristiques du boson de Higgs afin de mieux comprendre le mécanisme de la brisure de symétrie électrofaible. Il en sera de même pour toutes les particules nouvelles que le LHC pourra mettre en évidence, notamment celles associées à une éventuelle supersymétrie.

Le futur collisionneur international à l'étude sera linéaire pour limiter les pertes dues au rayonnement. Son énergie dans le centre de masse pourrait être de 500 GeV

dans un premier temps, en espérant l'augmenter ensuite à TeV. Plusieurs solutions technologiques sont possibles, notamment celle des cavités supraconductrices de 35 MV/m développées au SACM pour Tesla et Xfel du Desy. La technologie « double faisceau » (Clic) en est au stade de la R&D et doit encore progresser. De toute façon, les options finales ne seront définies qu'au vu des premiers résultats du LHC, vers 2010-2012. De leur côté, les physiciens travaillent déjà sur des projets de détecteurs et sur les analyses de physique rendues possibles par une telle machine. Son nom : ILC, *International Linear Collider*.

Pierre Lutz est membre de l'expérience DØ au Fermilab et consacre une grande partie de son temps à l'ILC dans le cadre de la préparation des analyses de physique et de l'étude de nouveaux détecteurs adaptés.



Les différentes destinations des recherches de l'ILC.

## Va-et-vient

Pour la période juin - septembre

Jean Zinn-Justin devient conseiller scientifique. Michel Tagger du SAP est mis à disposition pendant 4 ans auprès du CNRS au Laboratoire de physique et chimie de l'environnement à Orléans. Michel Arnaud du SACM est détaché au Cern pour 4 ans lui aussi. François Bugeon quitte le SIS pour la DSM.

En interne, Patrice Micolon quitte la Dir et rejoint le Sédi alors que Florence Ardellier quitte le Sédi pour prendre la tête du SIS, SIS qui voit l'arrivée au LD21 de Jean-Louis Fallou en provenance du Sédi pour travailler sur l'évaluation du réseau de terrain Profinet.

Arrivée du Ganil de Philippe Chomaz.

Les recrutés : Barbara Sulignano intègre au SPhN le groupe Structure des noyaux et va s'intéresser au spectromètre S<sup>3</sup> de Spiral II, Maximilien Fechner au SPP rejoint le groupe Double Chooz et Pierre Manil le bureau d'études du SIS. Francis Pottier du CEA/Grenoble rejoint le SACM /LCSE et ses stations d'essai pour travailler notamment sur le projet R3B. Vincent Hennion nous revient d'Angleterre après sa mise à disposition au JET et va travailler au SIIEV sur les performances, l'intégration et la qualification de l'accélérateur de la future installation Ifmif.

Les changements d'annexe de l'été : au SAP Philippe Marlet, Cyrille Delisle à la suite de son diplôme Cnam, et Yannick Queinec du SIS.

CEA - DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

Irfu Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers

Directeur de la publication : Philippe Chomaz

Directeur scientifique : Vanina Ruhlmann-Kleider

Rédacteur en chef : Jean-Luc Sida

Rédacteur invité : Yves Sacquin

Comité éditorial : Shebli Anvar, Marylene Besson, Rémi Chipaux, Philippe Convert, Olivier Corpace, Philippe Daniel-Thomas, Antoine Drouart, Christian Gouiffès, Florence Hubert-Delisle, Emmanuelle de Laborde, David Lhuillier, Pierre Manil, Christine Marteau, Vanina Ruhlmann-Kleider, Yves Sacquin, Angèle Séné, Pierre Vedrine, Didier Vilanova

Secrétariat : Marylene Besson, Elsa Rodrigues (apprentie)

Photographies : Alain Porcher

Mise en page : Christine Marteau

Pour abonnement et changement d'adresse contacter Sophie Chastagner  
Tél ; 01 69 08 75 57 ou sophie.chastagner@cea.fr

Contact : Jean-Luc Sida Tél.01 69 08 91 65 / 06 72 18 02 05  
jean-luc.sida@cea.fr  
<http://irfu.cea.fr>

Dépôt légal novembre 2008