

ALICE au pays des quarks

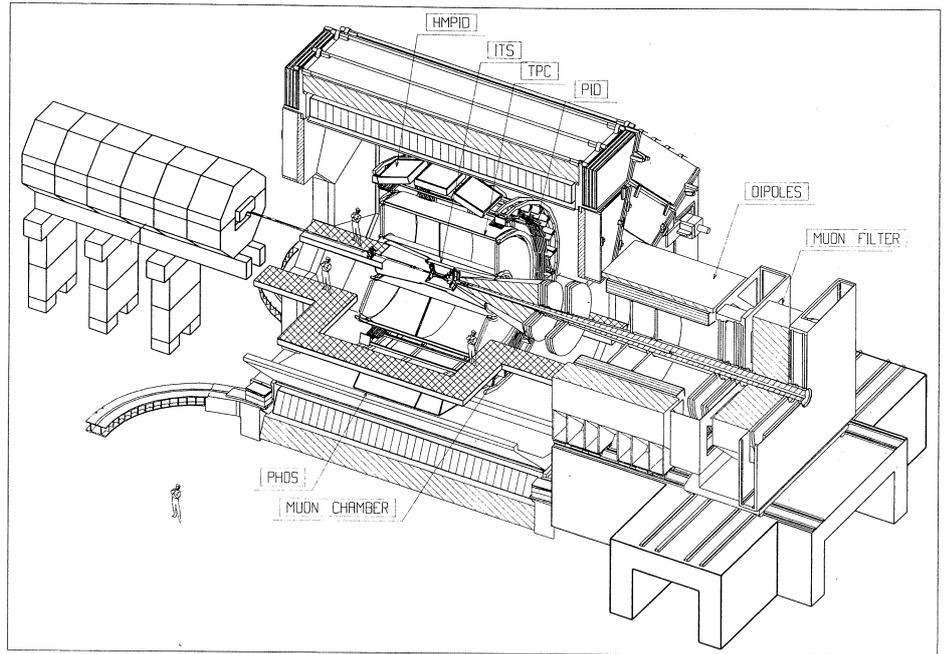
Une autre étape vers l'expérimentation au LHC

Ce mois-ci nous présentons le troisième volet de la série d'articles marquant la publication des propositions techniques complètes pour les expériences au collisionneur LHC du CERN.

L'axe principal de l'expérimentation au LHC sera l'étude des collisions proton-proton, dans le cadre de deux grandes expériences, ATLAS et CMS, dont les groupes respectifs ont présenté les propositions techniques en décembre 1994 (juin 1995, page 5), et pour toutes deux l'approbation a été une nouvelle fois recommandée récemment.

ALICE est conçue pour l'étude des collisions d'ions lourds dans le LHC, et poussera ainsi les enchères énergétiques dans cette branche de la physique de son maximum actuel de 17 GeV/nucléon au SPS du CERN à 5,5 TeV/nucléon. Le laboratoire national de Brookhaven, près de New York, étudiera la région intermédiaire grâce au collisionneur d'ions lourds relativistes, RHIC. Ce dernier produira des collisions entre ions or à une énergie totale de 200 GeV/nucléon à partir de 1999.

La proposition technique pour ALICE a été soumise le 15 décembre 1995.



Dans le classique de la littérature enfantine, Alice est une petite fille qui pourchasse un lapin blanc dans un terrier et se retrouve transportée dans un monde magique. Au LHC, ALICE (A Large Ion Collider Experiment = une grande expérience au collisionneur d'ions) pourchassera de nouveaux états de la matière au lieu de lapins blancs, mais le monde merveilleux qu'on devrait y trouver pourrait être tout aussi nouveau et passionnant que celui imaginé par Lewis Carroll.

ALICE est la troisième collaboration à soumettre une proposition technique pour le collisionneur LHC du CERN, après ATLAS et CMS dont les grands détecteurs polyvalents seront les fers de lance de l'expérimentation au LHC (juin 1995, page 5). Alors que la recherche du boson de Higgs figure en tête des priorités pour ATLAS et CMS, les objectifs sont différents avec ALICE. Le LHC perpétuera la tradition du CERN d'offrir des faisceaux variés, il sera en effet capable d'accélérer non seulement des protons, mais également les faisceaux de haute énergie d'ions plomb actuellement utilisés pour des expériences au SPS. ALICE, seule expérience au LHC consacrée aux ions

lourds, a été conçue pour exploiter cette possibilité. L'idée de construire un détecteur spécialisé pour les ions lourds au LHC a d'abord été discutée à la réunion historique de mars 1992 à Evian: "Vers le programme d'expérimentation au LHC". La collaboration ALICE s'est formée sur la base des idées alors proposées et elle a soumis une lettre d'intention en 1993 (juillet 1993, page 4). Les collisions d'ions lourds de haute énergie constituent un laboratoire sans équivalent pour l'étude des particules à interactions fortes. La théorie des

lourds, a été conçue pour exploiter cette possibilité.

L'idée de construire un détecteur spécialisé pour les ions lourds au LHC a d'abord été discutée à la réunion historique de mars 1992 à Evian: "Vers le programme d'expérimentation au LHC". La collaboration ALICE s'est formée sur la base des idées alors proposées et elle a soumis une lettre d'intention en 1993 (juillet 1993, page 4).

Les collisions d'ions lourds de haute énergie constituent un laboratoire sans équivalent pour l'étude des particules à interactions fortes. La théorie des

Prototype d'un détecteur à dérive au silicium mis au point par la collaboration DSI (avec le soutien de l'INFN) dans la cadre des travaux de développement du système de trajectographie intérieur d'ALICE. Ce type de détecteur offre une lecture réellement bidimensionnelle, avec un nombre réduit de voies de lecture, en mesurant sur un réseau d'anodes le temps de dérive ainsi que le barycentre du nuage de charges produit sur le passage d'une particule. La résolution spatiale est de l'ordre de 20 μm dans les

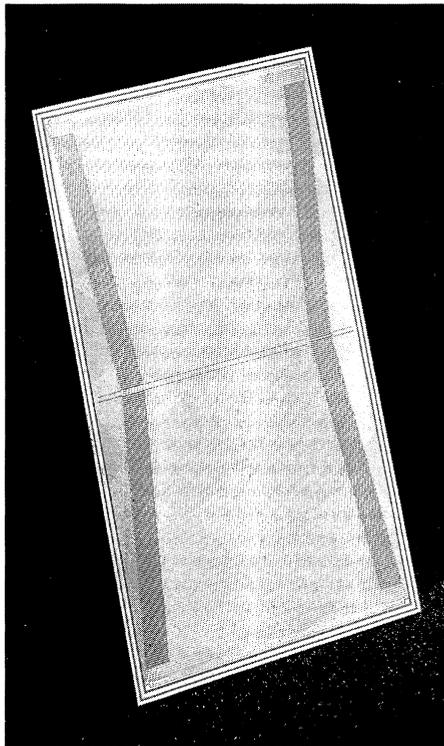
deux directions. La faiblesse de la capacitance anodique permet une excellente résolution en énergie (ionisation). Des électrodes dessinées dans la carte engendrent un champ électrique de dérive parallèle à la surface du détecteur.

champs de quarks et de gluons – la chromodynamique quantique (CDQ) – prédit qu'à des densités d'énergie suffisamment élevées, il doit se produire une transition de phase de la matière hadronique classique, dans laquelle les quarks sont enfermés dans des particules nucléaires, vers un plasma de quarks et de gluons déconfinés. On pense que cette transition s'est produite, mais en sens inverse, lorsque l'âge de l'Univers n'était que de 10^{-5} s et il se pourrait qu'elle joue encore un rôle aujourd'hui au cœur des étoiles à neutrons en effondrement.

Une transition de phase analogue est, pense-t-on, à l'origine du phénomène de Higgs par lequel les particules acquièrent leurs masses. Le LHC devrait pouvoir produire ces particules de Higgs, toutefois la transition de phase qui les a créées est hors d'atteinte de l'expérimentation. La transition de phase de la chromodynamique quantique qu'ALICE étudiera est la seule de ce type accessible en laboratoire.

Le CERN et Brookhaven ont clairement démontré dans les années 80 avec des ions plus légers la faisabilité de ce type de recherche. Les programmes actuels dans ces laboratoires ont avancé en direction des ions lourds et atteignent le seuil d'énergie à partir duquel la transition de phase devrait se produire. La portée des expériences sera étendue au collisionneur d'ions lourds RHIC de Brookhaven après sa mise en service en 1999. Le LHC, avec une énergie dans le centre de masse voisine de 5,5 TeV/nucléon, ira encore plus loin en énergie, dépassant même les densités d'énergie les plus élevées observées dans les collisions noyau-noyau dues aux rayons cosmiques.

ALICE rassemble des membres de l'actuelle communauté des ions lourds du CERN et un certain nombre de groupes nouveaux dans ce domaine et venant des physiques nucléaire et des hautes énergies. À l'aune du LHC, la collaboration est de taille modeste, comparable à l'une de celles qui travaillent au grand collisionneur électron-positon LEP. La collaboration ALICE compte 565 membres de 26 pays. Les États non-membres du CERN, avec 245 physiciens, y jouent un rôle important.



À l'échelle du LHC, les proportions du détecteur restent raisonnables, il est en effet basé sur l'aimant de l'expérience actuelle L3 au LEP. (Le changement d'échelle entre le LEP et le LHC est reflété par le fait que L3 est le plus grand détecteur en exploitation au LEP!) Lorsque le LEP s'arrêtera, l'aimant de L3 restera en place pendant l'installation d'ALICE. Les faisceaux du LHC ne traverseront pas l'aimant exactement selon son axe, ils seront 30 cm plus haut que les faisceaux actuels du LEP. Le coût total du détecteur sera de l'ordre de 120 MCHF.

Comme la physique du plasma quark-gluon pourrait être très différente de celle de la matière ordinaire, la conception du détecteur tient compte de toutes les signatures possibles, tout en lui gardant suffisamment de souplesse pour permettre des améliorations futures sur la base des premiers résultats.

Le détecteur comprend deux parties principales, un détecteur central immergé dans le champ magnétique et

un spectromètre à muons à petit angle inclus en addenda de la lettre d'intention en 1995. Le montage est complété par des calorimètres à zéro degré placés très en aval dans le tunnel de la machine pour intercepter les particules émergeant très près des faisceaux en collisions.

Un aspect bien connu des collisions d'ions lourds est la multiplicité de particules très élevée à l'issue des collisions frontales. On prévoit que ces collisions centrales se produiront au LHC une centaine de fois par seconde, produisant environ 50 000 particules dans chaque cas, dont plusieurs milliers à l'intérieur de l'acceptance d'ALICE. Du fait de la fréquence d'interactions relativement basse on ne prévoit qu'un déclenchement assez simple sélectionnant seulement les collisions frontales parmi celles issues du croisement à 40 MHz des faisceaux.

L'une des plus grandes difficultés de la physique des ions lourds est d'identifier les trajectoires individuelles dans la forêt touffue des particules émergentes. La conception du système de trajectographie d'ALICE prévoit une reconnaissance de forme fiable et stable dans un solénoïde de grand volume produisant un champ faible. L'induction de 0,2 T de l'aimant de L3 est idéale à cet effet.

Le système interne de trajectographie, ITS, comprend six couches cylindriques de détecteurs à localisation de grande précision à des rayons de 3,9 cm à 45 cm interceptant les angles de -45° à $+45^\circ$. Il a pour fonction la reconnaissance du vertex secondaire, l'identification des particules, la trajectographie et l'amélioration de la résolution globale sur l'impulsion. Les diverses couches sont optimisées pour assurer une reconnaissance des formes efficace. Étant donné la forte densité de particules dans les régions les plus proches de l'axe, les quatre premières couches fournissent des données sur la position en deux dimensions: les deux premières sont formées de détecteurs à pixels en silicium et les deux suivantes de détecteurs à dérive en silicium. Plus loin vers l'extérieur on trouve deux couches de détecteurs double face à microrubans de silicium. Le nombre d'instituts responsables de la production de ce dispositif reflète sa com-

La technique des compteurs Pestov à étincelles est à l'étude pour le système d'identification des particules d'ALICE, il s'agit de dispositifs monocouches à plaques parallèles remplis de gaz donnant une résolution temporelle inférieure à 50 ps. Ils seront donc choisis si la preuve peut être faite qu'il est possible de les fabriquer et de les exploiter fiablement dans la configuration de grande surface exigée.

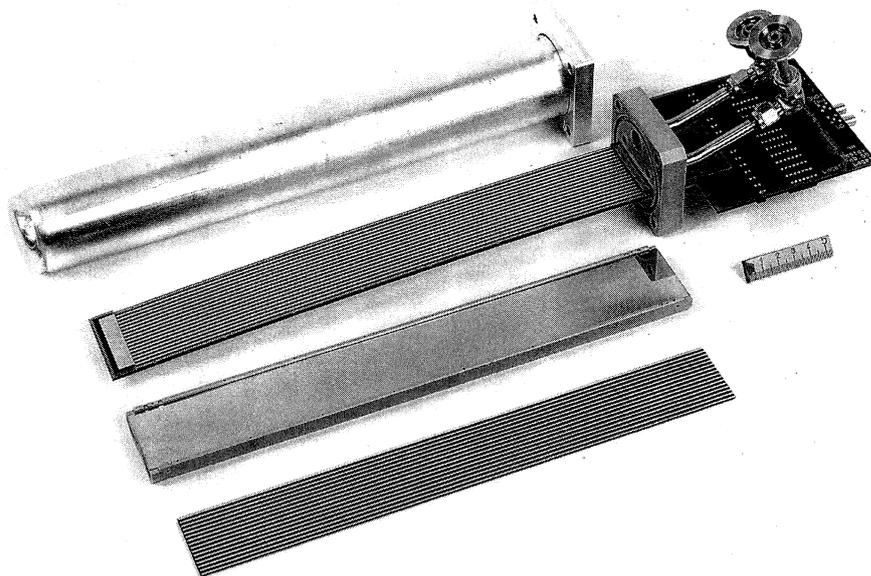
(Photo Achim Zschau, GSI)

plexité et son importance: Bari, Catane, CERN, Heidelberg, Kharkov, Kiev, Nantes, NIKHEF, Padoue, Rez (Tchéquie), Rome, Saint-Petersbourg, Salerne, Strasbourg, Turin, Trieste et Utrecht.

Une chambre à projection, TPC, viendra compléter la trajectographie centrale; elle est en cours de construction par Bratislava, CERN, Cracovie, Darmstadt, Francfort et Lund. Cette technologie éprouvée a été adoptée afin de garantir des performances fiables pour des multiplicités extrêmement élevées. Elle a pour inconvénients des volumes de données élevés et une relative lenteur. La TPC occupe radialement la région comprise entre 90 cm et 250 cm et elle a été conçue pour mesurer l'ionisation déposée à mieux que 7% près. Elle servira également à identifier les électrons jusqu'à une impulsion de 2,5 GeV/c.

Deux technologies différentes sont à l'étude pour le dernier sous-détecteur interceptant la totalité de l'azimut, le système d'identification des particules, PID. Les compteurs Pestov à étincelles, des dispositifs à gaz monocouche à plaques parallèles, sont actuellement étudiés par Darmstadt, Doubna, Marbourg, Moscou (IPTE et Institut de génie physique) et Novossibirsk, tandis que le CERN, Moscou (IPTE et Institut de génie physique) et Novossibirsk développent les chambres à plaques parallèles (CPP). L'étude technique devrait être terminée d'ici à la fin de 1998. La construction et l'exploitation des CPP sont plus aisées, mais avec une résolution temporelle inférieure à 50 ps, les compteurs Pestov sont quatre fois plus rapides que les CPP. Ils seront donc choisis si la preuve peut être faite qu'il est possible de les fabriquer et de les exploiter fiablement dans la configuration de grande surface exigée.

Un second dispositif d'identification des particules, HMPID, pour celles d'impulsions plus élevées, fait partie du projet; il compte seulement un bras placé au-dessus du PID central. L'option préférée est celle d'un détecteur Cherenkov à focalisation annulaire (RICH) que développent Bari, CERN, Zagreb et IRN Moscou. Cependant, la technique du scintillateur organique poursuivie par Catane et Doubna n'a pas encore été exclue.



Dessous la région centrale du détecteur (la partie tonneau) se trouve un autre dispositif à un bras: le spectromètre à photons, PHOS, destiné à mesurer les photons directs et les mésons neutres. Bergen, Heidelberg, Moscou-Kourchatov, Münster, Protvino et Prague le préparent, il sera constitué de cristaux scintillants en tungstate de plomb mis au point dans le contexte des travaux généraux du CERN sur la R&D pour les détecteurs.

Les calorimètres à zéro degré, ZDC, seront placés à 92 m du point d'interaction pour mesurer l'énergie emportée par les nucléons du faisceau n'ayant pas interagi, cette quantité est directement liée à la géométrie de la collision.

Il s'agit de calorimètres de type spaghetti où des fibres en quartz servent de milieu sensible. Turin a la responsabilité de leur construction.

Un autre détecteur à petit angle, le détecteur de multiplicité avant-arrière, FMD, se trouvera dans le solénoïde et servira à fournir des signaux de déclenchement rapides et des données sur la multiplicité en dehors de l'acceptance centrale du détecteur. Moscou-Kourchatov et Saint-Petersbourg étudient à cet effet des

détecteurs novateurs à plaques à microcanaux; on garde en réserve l'option classique des détecteurs au silicium à damiers.

Le spectromètre à muons à petit angle, FMS, est un complément important du projet initialement proposé dans la lettre d'intention. Il a été ajouté pour mesurer dans son intégralité le spectre des résonances de quarks lourds qui devrait être sensible à la production du plasma de quarks et de gluons. La première section du spectromètre est un absorbeur placé à l'intérieur du solénoïde à environ un mètre du point d'interaction.

Elle est suivie à l'extérieur du solénoïde par un grand aimant dipolaire de 3 teslas contenant 10 plans de trajectographie. Un second absorbeur et deux autres plans de trajectographie permettent l'identification des muons et le déclenchement. Des équipes CERN, Clermont-Ferrand, Gatchina, Moscou-Kourchatov, Moscou-IRN, Nantes et Orsay travaillent sur un plan plus détaillé du FMS qui devrait être terminé en cours d'année.

Birmingham et Kosice ont la responsabilité du déclenchement. Les exigences sont différentes pour les modes proton-proton et ion-ion. Dans le premier, un déclenchement représenta-

tif (biais minimum) est nécessaire, alors que dans les collisions ion-ion la fonction du déclenchement est de sélectionner les collisions centrales. Sur la base des données de centralité provenant du FMD on aboutit en quelque 1,2 microseconde à une décision de déclenchement de niveau zéro. Au niveau un (2 microsecondes) le ZDC vient en complément. Un déclenchement sur les dimuons grâce au FMD ajoute également sa contribution au niveau un. La décision finale de déclenchement de niveau deux tombe au bout de 100 microsecondes, après un traitement supplémentaire.

L'architecture du système d'acquisition des données d'ALICE a été choisie en fonction des périodes d'ions lourds relativement courtes prévues au LHC, à peu près 10% du temps d'exploitation annuel. La collaboration disposera de dix fois plus de temps pour analyser les données que pour les recueillir, aussi un système à large bande passante est envisagé pour recueillir autant de données que possible dans le temps disponible. Les fonctions consommatriques de temps d'unités centrales, comme la sélection et la reconstitution des événements, seront effectuées en différé. Budapest, le CERN et Oslo

sont responsables de l'acquisition des données.

Si tout se passe comme prévu, l'installation d'ALICE devrait commencer dès que l'expérience L3 aura été démontée et retirée de la zone d'expérimentation. Conformément au calendrier actuel du LEP, cela devrait se produire vers octobre 2001, ce qui donnerait deux ans à la collaboration ALICE pour installer et mettre en service son détecteur afin qu'il soit prêt à être lancé à la recherche du monde merveilleux du plasma dès l'apparition des premiers faisceaux du LHC en 2004.

CEBAF: prêt pour l'expérimentation

Après une décennie de conception, R&D, construction et mise en service, l'accélérateur radiofréquence supraconducteur CEBAF (Continuous Electron Beam Accelerator Facility = accélérateur à faisceau d'électrons continu) à Newport News, Virginie, est prêt pour des expériences visant à harmoniser entre elles les descriptions de la matière nucléaire basées sur les quarks et sur les hadrons.

Après une période de mise en service qui comprenait une exploitation prolongée en mode continu avec cinq passages correspondant à l'énergie nominale de 4 GeV, la première des 76 expériences actuellement approuvées a commencé le 15 novembre dans le hall C. Le porte-parole d'Argonne Don Geesaman a déclaré: "l'accélérateur fonctionne mieux que n'importe quel

nouvel accélérateur que j'aie jamais vu et mieux que la plupart des accélérateurs en pleine maturité que je connais". Effectivement les performances initiales de la machine étaient encourageantes, celles du système radiofréquence supraconducteur (RFSC) étant spécialement en vedette. Avant l'arrêt de fin d'année, le gradient moyen dépassait 6 MV/m, de 20% au-delà des spécifications, et le Q moyen des cavités atteignait avec 5×10^9 le double de sa valeur nominale. Le plus grand réfrigérateur à 2 K du monde – produisant la moitié de l'hélium superfluide mondial – opérationnel plus de 99% du temps, permet d'entretenir l'exploitation en mode supra-conducteur.

L'émittance surpasse l'objectif nominal de 2×10^{-9} m; la dispersion en

énergie de $2,8 \times 10^{-5}$ dépasse l'exigence minimale de 10^{-4} et atteint presque l'objectif nominal de $2,5 \times 10^{-5}$. Trois trains de paquets intercalés d'intensités indépendantes peuvent être lancés dans la machine par l'injecteur et n'importe lequel d'entre eux peut être extrait à tout passage désiré. L'adoption de EPICS (système de commande pour la physique expérimentale et l'industrie) est à l'évidence un succès. Avec ses deux linacs, ses neuf arcs de retour du faisceau et plus de 2200 aimants, la machine rivalise de complexité avec le collisionneur électron-positon LEP du CERN. La disponibilité du CEBAF a dépassé 80%.

Le programme d'expérimentation déjà approuvé table sur 1282 jours de temps de faisceau dans les trois halls