

Le prix Nobel de physique 1999

Le dernier prix Nobel de physique du siècle récompense Gerardus 't Hooft d'Utrecht et Martinus Veltman de Bilthoven, Pays-Bas, "pour leurs travaux déterminants sur la structure quantique de la théorie des interactions électrofaibles en physique".

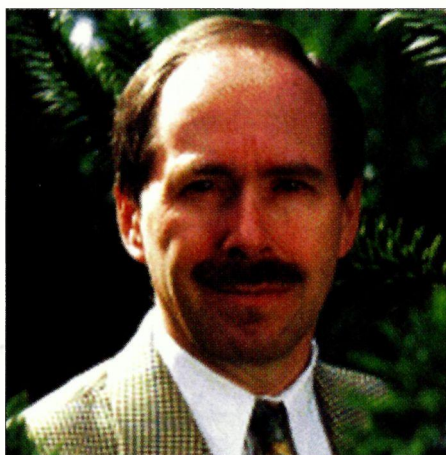
Il y a exactement 20 ans, Sheldon Glashow, Steven Weinberg et Abdus Salam recevaient le prix Nobel pour leurs contributions, publiées initialement en 1967, à la théorie électrofaible, la théorie unifiée des interactions faible et électromagnétique. Ce sont les travaux de 't Hooft et Veltman qui ont valu à cette unification d'être reconnue car ils ont montré qu'il s'agissait d'une théorie utilisable permettant d'effectuer des calculs prédictifs.

Les théories des champs ont la fâcheuse habitude d'aboutir à des résultats infinis qui à première vue rendent difficiles tout calcul raisonnable. C'était un problème des formulations initiales de l'électrodynamique quantique qui a fait le désespoir de toute une génération de physiciens, mais Richard Feynman, Julian Schwinger et Sin-Ichiro Tomonaga (prix Nobel de physique 1965) ont montré que ces infinis disparaissent quand on redéfinit des quantités telles que la charge électrique.

A chaque quantité infinie on peut associer une certaine origine, un diagramme de Feynman bien spécifique dont les pattes représentent les particules mises en jeu. Mais le nouveau formalisme de l'électrodynamique quantique montre que l'on peut supprimer les quantités infinies en incluant d'autres diagrammes de Feynman choisis de sorte que deux quantités infinies s'annulent entre elles. Cette astuce, difficilement acceptée au début, fonctionne très bien; appelée renormalisation elle fait maintenant l'ordinaire du théoricien des champs. L'électrodynamique quantique est devenue un moyen de calcul puissant.

Pour qu'une théorie des champs de ce type soit utilisable, elle doit être "renormalisable". Or la synthèse des interactions faible et électromagnétique élaborée par Glashow, Weinberg et Salam et faisant appel au maintenant célèbre phénomène de Higgs pour briser la symétrie ne semblait pas à première vue renormalisable. Ne pouvant être assurés que les calculs auraient un sens, les physiciens n'ont guère attaché d'importance à la théorie nouvelle. Son appellation d'unification "électrofaible" n'était pas encore dûment estampillée.

Le modèle était un exemple d'une théorie "non-abélienne", concept alors peu familier, dans laquelle le résultat final de deux opérations sur le



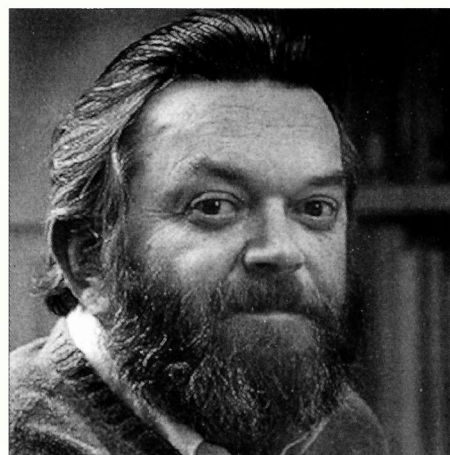
Gerardus 't Hooft d'Utrecht.

champ dépend de l'ordre d'application des opérateurs. Jusqu'alors les théories des champs avaient toujours été abéliennes, l'ordre était indifférent.

Au cours de l'été de 1970, 't Hooft, qui était alors un étudiant de thèse de Veltman à Utrecht, participa à une réunion de physique en Corse où des spécialistes discutaient des dernières nouveautés en théorie de la renormalisation. 't Hooft leur demanda comment il serait possible d'appliquer ces idées aux nouvelles théories non abéliennes. On lui répondit: "Puisque vous êtes un étudiant de Veltman, demandez-lui!". Les spécialistes savaient que Veltman comprenait la renormalisation mieux que la plupart des mortels et qu'il avait même spécialement rédigé un programme informatique - Schoonschip - pour évaluer toutes les contributions nécessaires compliquées de la théorie des champs.

D'abord 't Hooft tenta d'élaborer une version renormalisée des théories de jauge non abéliennes valable pour l'interaction forte qui lie entre elles les particules subnucléaires du noyau. Mais Veltman pensait que l'interaction faible, par laquelle les particules subnucléaires se désintègrent, serait plus fructueuse. Le résultat appartient à l'histoire de la physique: le modèle unifié basé sur le phénomène de Higgs est renormalisable. Dès lors les physiciens prêtèrent l'oreille. Comme le disait Sidney Coleman à Harvard, ce travail "fut l'enchantement qui transforma en prince la vilaine grenouille de Weinberg-Salam!".

La théorie prédisait d'emblée l'existence des "courants neutres". Normalement dans les interactions faibles les charges électriques prennent part à un jeu de chaises musicales, comme dans la



Martinus Veltman de Bilthoven.

désintégration nucléaire bêta où un neutron se désintègre en un proton. Dans le cas d'un courant neutre, la force faible pourrait agir sans altérer les charges électriques. Ce phénomène devait exister pour garantir la renormalisabilité de la nouvelle théorie. En 1973 le courant neutre fut découvert dans la chambre à bulles Gargamelle au CERN et la théorie se para d'un galon supplémentaire.

L'étape suivante sur la route électrofaible fut la découverte au collisionneur proton-antiproton du CERN du W et du Z portant respectivement les composantes chargée et neutre de la force faible. Pour cette réalisation, Carlo Rubbia et Simon van der Meer ont reçu le prix Nobel de physique en 1984.

En 1989 le collisionneur électron-positon LEP du CERN a repris le témoin électrofaible, fournissant des données de précision qui ont permis de prédire à l'aide des techniques de 't Hooft et Veltman la masse du sixième quark t . A l'époque ce dernier n'avait pas encore été observé, mais les physiciens savaient qu'il devait intervenir indirectement dans le calcul. Les corrections liées au quark t ont la propriété inhabituelle d'augmenter avec sa masse. Quand le quark t fut découvert au collisionneur proton-antiproton Tévatron du Laboratoire Fermi en 1995, il s'avéra que sa masse était exactement celle que les calculs avaient indiquée.

Le seul chaînon manquant aujourd'hui dans le modèle électrofaible est le phénomène de Higgs, et comme le LEP explore de nouveaux domaines d'énergie les physiciens scrutent anxieusement les toutes dernières données du LEP. Derrière la ligne de touche les équipes LHC au CERN s'échauffent avant de porter la physique du Higgs à sa conclusion.

Le CERN aura une nouvelle installation



La cible en plomb de l'expérience TARC au CERN reprend du service pour la future installation de neutronique par temps de vol.

Une nouvelle installation s'apprête à rejoindre le programme d'expérimentation du CERN à partir d'avril 2000. L'installation de neutronique par temps de vol (nTOF) sera mise au service d'une série d'expériences sur les réactions induites par les neutrons. Ces expériences concerneront des sujets aussi divers que la nucléosynthèse stellaire ou la physique nucléaire fondamentale et seront les compléments d'expériences en cours auprès de

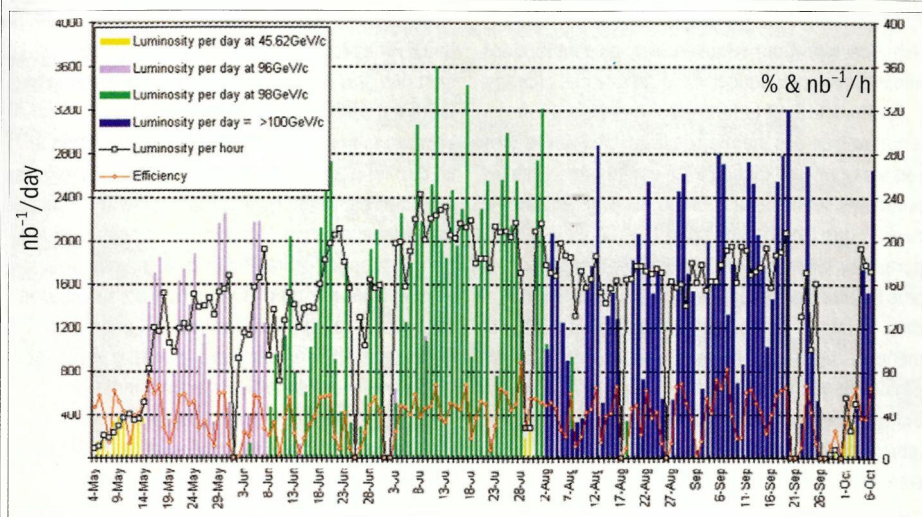
l'installation à faisceaux radioactifs ISOLDE du Laboratoire. Prenant modèle sur la récente expérience TARC au CERN, qui étudiait la transmutation d'éléments au moyen de neutrons modérés dans le plomb, l'installation permettra d'étudier également la transmutation induite par les neutrons d'isotopes radioactifs présents dans les déchets nucléaires.

Le grand intérêt de l'installation nTOF réside

dans sa résolution extrêmement élevée pour les sections efficaces de capture des neutrons dans une gamme d'énergies de 1 eV à 250 MeV. Les neutrons produits par spallation dans une cible de plomb, récupérée de l'expérience TARC, se dirigeront vers une zone d'expérimentation située à 200 m en aval. C'est cette distance qui donne à nTOF son exceptionnelle résolution énergétique pour les neutrons, qui devrait être de l'ordre de 10^{-4} dans toute la gamme d'énergies.

L'installation est en cours de construction et elle commencera à fonctionner l'année prochaine, ce qui signifie qu'elle aura été mise en service en un temps record. Cela s'explique notamment par une large utilisation de l'infrastructure existante. L'installation sera montée dans un tunnel existant allant du synchrotron à protons, qui fournira les protons induisant la spallation dans la cible en plomb, à la zone d'expérimentation Ouest du CERN. Ce tunnel passe également à 7 m au-dessous d'un autre tunnel qui abritait autrefois un collisionneur, les Anneaux de stockage à intersections. La cible pour l'expérimentation sera située au-dessous de ce tunnel qui sera adapté pour accueillir les installations de manipulation de la cible.

Les premières expériences avec nTOF seront conçues pour tester les performances de l'installation. Des sections efficaces de capture des neutrons connues seront évaluées, et ensuite le programme nTOF entreprendra une gamme plus étendue de nouvelles mesures.



Exploitation du collisionneur électron-positon LEP du CERN en 1999. Le bleu correspond à un fonctionnement à 100 GeV par faisceau et plus. La luminosité est une mesure de la fréquence des collisions électron-positon.

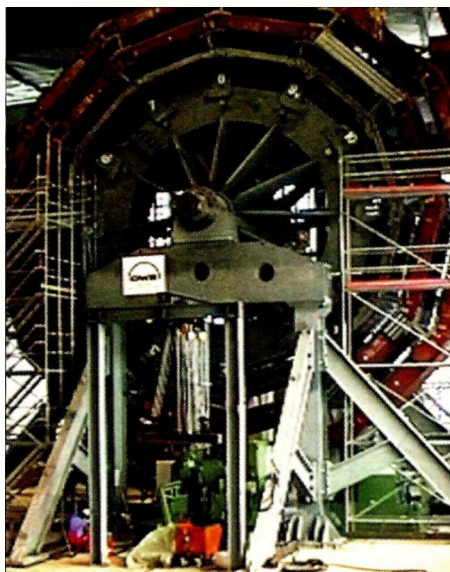
Un pas de plus pour le LEP du CERN

Le 24 septembre, les autorités françaises ont officiellement accordé la permission d'exploiter le collisionneur électron-positon LEP du CERN avec des faisceaux d'énergie pouvant aller jusqu'à 105 GeV.

Dès la réception de cette lettre, les faisceaux ont été portés à 101 GeV dans les deux remplissages suivants, mais la machine a alors rencontré des problèmes de cryogénie.

Depuis le début du mois d'août le LEP fonctionnait de manière impressionnante à 100 GeV par faisceau (énergie de collision 200 GeV).

L'assemblage de l'aimant de CMS



Assemblage de la première roue de la culasse cylindrique de l'aimant solénoïdal supraconducteur pour l'expérience CMS au CERN.

Le plus grand aimant solénoïdal supraconducteur du monde – celui de l'expérience CMS avec le collisionneur LHC du CERN – a récemment franchi une étape importante sur la voie de son achèvement lorsque la première "roue" de sa culasse cylindrique a été assemblée près de Munich.

La fabrication de la culasse a été commandée à l'entreprise allemande Deggendorfer Werft und Eisenbau GmbH (DWE) dans le cadre du plus gros contrat individuel jamais conclu pour une expérience de physique des hautes énergies, puisqu'il portait sur environ 23 millions de francs suisses. A la suite d'un appel d'offres au niveau mondial, la commande de la culasse en fer du "tonneau" de CMS et de l'enceinte à vide correspondante a été signée pour le compte de la collaboration CMS entre DWE et l'Ecole polytechnique fédérale suisse de Zurich en avril de l'année dernière.

La bobine solénoïdale de CMS mesurera 6 m de diamètre et 12,5 m de long. Avec 4 T, elle aura le champ le plus élevé de tous les aimants de ce type et elle pourra emmagasiner environ 2,5 GJ d'énergie. Sa culasse de retour pèsera 11 000 tonnes et

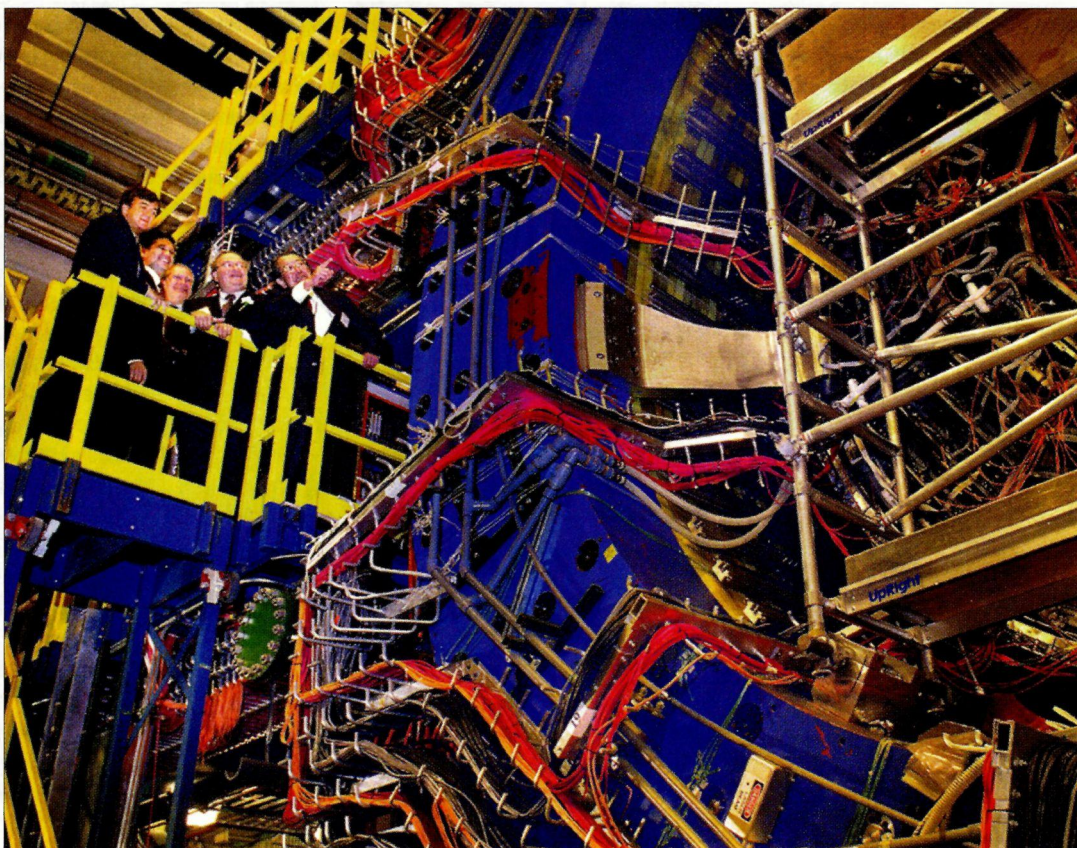
sera formée de deux "bouchons" de trois disques chacun et d'une partie "tonneau" comportant cinq roues.

Le système magnétique a été conçu par une équipe de CMS et financé par un groupe d'organismes de financement de CMS en Suisse, aux Etats-Unis, en Allemagne, à Chypre et en Russie et par le Fonds commun de CMS. DWE coordonne la construction de l'aimant avec des sous-traitants en Allemagne, en France, en Italie, en République tchèque et en Russie.

Huit des dix pieds supportant la culasse sont fournis dans le cadre d'une contribution en nature du Pakistan, où ils sont construits par la société Scientific Engineering Systems. Les supports des bouchons seront fournis gratuitement par la Chine, où ils sont construits par la société Hudong Heavy Machinery.

L'assemblage final de la culasse commencera en juillet 2000 au CERN, et après avoir été testé en surface l'aimant sera descendu roue par roue dans le hall d'expérimentation de CMS vers la fin de 2003.

Après l'inauguration officielle du collisionneur d'ions lourds relativistes RHIC de Brookhaven le 4 octobre: (de gauche à droite) le secrétaire d'Etat à l'énergie Bill Richardson, les membres du Congrès Rick Lazio et Gary Ackerman, le directeur de Brookhaven John Marburger, et le chef du projet RHIC Satoshi Ozaki inspectent le détecteur STAR du RHIC. Le collisionneur a pris en charge ses premiers faisceaux d'ions or cet été et son programme scientifique commencera prochainement.



Des expériences recomposent le Big Bang

Au commencement, il y avait les quarks et les gluons, ce qu'on appelle le "plasma quark-gluon". La densité et la température diminuèrent à mesure que l'univers s'étendait et se refroidissait, et les quarks et les gluons commencèrent à se figer pour former des particules subnucléaires (protons et neutrons). Ensuite, ceux-ci s'agglomérèrent à leur tour pour former des noyaux. C'est en tout cas le dogme qui prévaut.

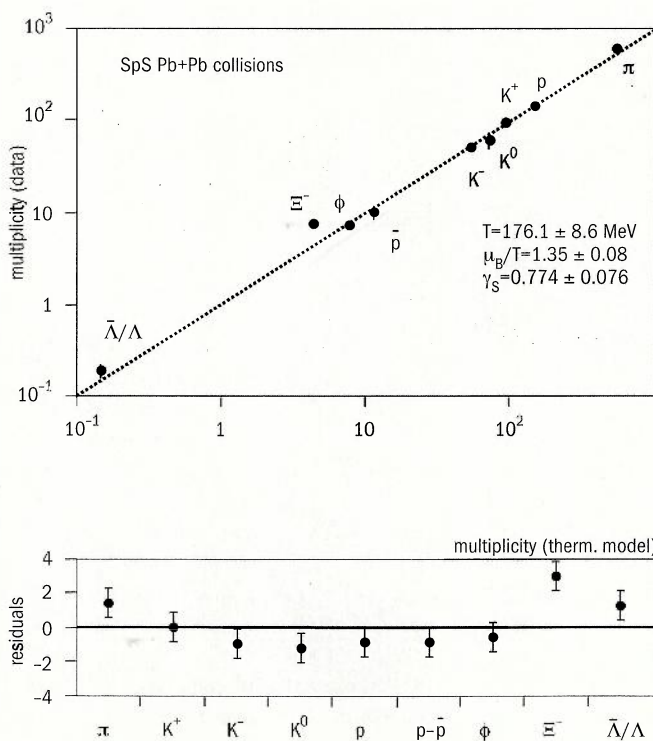
Pour vérifier si celui-ci est exact, des expériences au CERN projettent avec violence des faisceaux de noyaux de haute énergie sur des cibles pour créer des boules de feu denses et chaudes de protons et de neutrons. Ces boules peuvent être suffisamment denses et chaudes pour que les protons et les neutrons fondent et que les quarks et les gluons qui les constituent soient libérés de leurs habitats nucléaires habituels.

Les résultats d'expériences avec des faisceaux d'ions plomb au synchrotron SPS du CERN ont été récemment affinés, notamment l'expérience NA50 qui étudie la production de particules J/psi. Ces particules sont constituées d'un quark lourd (charmé) et d'un antiquark liés entre eux. Elles sont plus difficiles à former lorsque la probabilité des quarks et des antiquarks de s'agglutiner est moins forte. Un signal clair de la réduction des J/psi (*Courrier CERN* mai p8) a donc été salué comme la première nouvelle synthèse du plasma quark-gluon depuis le Big Bang. Mais certains physiciens soulignent que ce n'est pas tout.

Dans tout plasma, c'est-à-dire dans tout gaz formé de particules chargées, la charge portée par une particule quelconque est masquée par celles qui l'entourent. C'est ce qu'on appelle l'écrantage de Debye. Les quarks et les gluons interagissent par l'intermédiaire de la charge de couleur triple plutôt que par la charge électrique double (positive/négative) habituelle.

C'est ce mécanisme d'écrantage qui empêche les quarks de s'agglomérer au-delà d'une certaine température critique T_0 et d'une certaine densité d'énergie E_0 . Les particules subnucléaires fondent dans ces conditions.

Mais le J/psi, étant la plus légère des particules contenant des quarks charmés, est très petit et fortement lié. De ce fait, il fond à une température



Ces diagrammes comparent le taux de production total de différentes particules subnucléaires (les hadrons – depuis les pions jusqu'aux hypérons) observé par l'expérience NA49 au CERN qui étudie les collisions centrales d'ions plomb de haute énergie avec un modèle statistique "de type Hagedorn" développé par F Becattini. Le modèle montre que la température de transition T_0 au-delà de laquelle les quarks ne sont plus agglomérés sous forme de hadrons se situe à environ 180 MeV.

légèrement supérieure, de l'ordre de $1,3 T_0$. Cette différence de température apparemment modeste est amplifiée pour la densité d'énergie, qui varie comme la puissance quatre de la température. Par conséquent, les J/psi fondent à des énergies d'environ $3 E_0$, bien plus tardivement que la majorité des particules subnucléaires.

Les J/psi présentent également la particularité que la paire quark-antiquark charmés qui les constitue ne se recombine jamais lorsque la boule de plasma s'étend et se refroidit. Ces quarks perdent le contact entre eux et adhèrent à d'autres quarks plus légers pour former des mésons D. Les quarks légers du plasma se recombinaient en protons, kaons, pions, etc.

L'expérience NA50 observe le déclenchement de la disparition des J/psi dans les plus violentes collisions "frontales" d'ions plomb (et uniquement d'ions plomb) à l'énergie maximum du SPS (158 GeV par nucléon). Il faut donc que la densité d'énergie ait atteint environ $3 E_0$ dans ces collisions. D'autres expériences avec des faisceaux d'ions plomb, comme NA49, estiment, sur la base de mesures calorimétriques, que la densité d'énergie atteinte dans ces collisions est d'environ 3 GeV par fermi cube (1 fermi = 10^{-13} cm, le "diamètre" d'un proton). Si l'on se hasarde à combiner ces observations, on est conduit à conclure que la densité critique E_0 est de l'ordre de 1 GeV par fermi cube, ce qui concorde avec les calculs de la théorie

des champs quark-gluon.

Il est maintenant devenu possible de tester ces conclusions grâce aux expériences avec des ions plomb (NA44, NA49, WA89 et WA97). Reinhard Stock de Francfort souligne qu'on peut concilier la production de hadrons dans ces réactions et la combinaison des quarks et des gluons à T_0 , soit presque 180 MeV, et E_0 , soit presque 1 GeV par fermi cube.

Des études théoriques antérieures sur la transformation d'une boule de feu quark-gluon en une boule de feu subnucléaire, dues à John Ellis du CERN et Klaus Kinder-Geiger (décédé dans la catastrophe aérienne de la Swissair l'année dernière) avaient planté le décor. Leur modèle entreprenait d'expliquer comment différentes particules subnucléaires contenant des quarks et des gluons pouvaient émerger d'annihilations électron-positon.

Ils ont montré que la probabilité de transition dépendait de la mécanique statistique, de sorte que les niveaux de production relatifs de différentes particules subnucléaires permettent d'inférer la température à leur naissance. Cela se produit lorsque la boule de feu initiale quark-gluon à densité d'énergie élevée s'étend et se refroidit jusqu'à atteindre la température critique à laquelle les particules se cristallisent. C'est ainsi que les expériences avec des faisceaux nucléaires de haute énergie recomposent le Big Bang.

Les sources ECRIS et les transuraniens

La récente découverte de noyaux transuraniens superlourds (*Courrier CERN* septembre p18) a réveillé l'intérêt pour un possible "îlot" de stabilité peuplé de noyaux presque stables. On produit ces corps exotiques en bombardant un noyau-cible approprié par un faisceau de haute énergie de noyaux spécialement préparés, puis on étudie les chaînes de désintégration qui s'en suivent dans un détecteur approprié.

La découverte de ces noyaux représente une grande prouesse des accélérateurs où l'on prépare les faisceaux, c'est également un hommage rendu aux compétences accumulées dans les trois centres mondiaux traditionnels menant ces travaux: Doubna, près de Moscou, le Laboratoire des ions lourds GSI de Darmstadt et le Laboratoire Lawrence à Berkeley, Etats-Unis, où McMillan et Abelson ont découvert les premiers noyaux transuraniens il y a une soixantaine d'années. Les détecteurs (le filtre de vitesse SHIP de Darmstadt et les séparateurs à gaz de Doubna et de Berkeley) ont également joué un rôle crucial.

Cependant, étant donné la minuscule production de ces nouveaux noyaux (approximativement un par quinzaine), une condition préalable pour

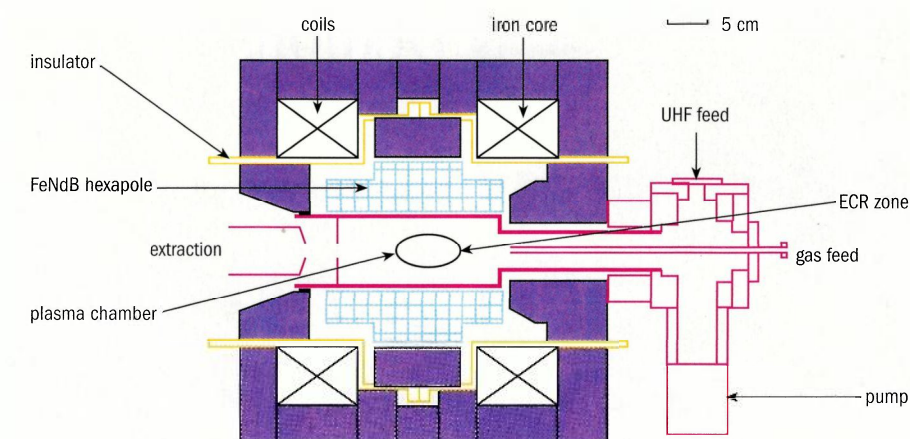


Schéma d'une source d'ions à résonance cyclotron de l'électron source (RCE).

obtenir quoi que ce soit est de pouvoir fournir aux accélérateurs, dans un délai raisonnable, les énormes quantités d'ions (10^{18}) requises. En outre, les ions doivent être fortement chargés – krypton 19^+ à Berkeley, calcium 5^+ à Doubna et nickel 9^+ à Darmstadt. Les faisceaux fournis doivent également être bien groupés de manière à ne pas perdre leurs précieuses particules en aval, au cours des étapes d'accélération et de transport. Pour atteindre l'ensemble de ces critères exigeants on fait normalement appel à une source d'ions à résonance cyclotron de l'électron (source RCE) capable de fonctionner de façon ininterrompue sur plusieurs semaines et de fournir ainsi les doses suffisantes. La technique RCE ne fait appel ni aux cathodes ni aux décharges dans les gaz. La cavité est remplie de vapeur et soumise à des oscillations

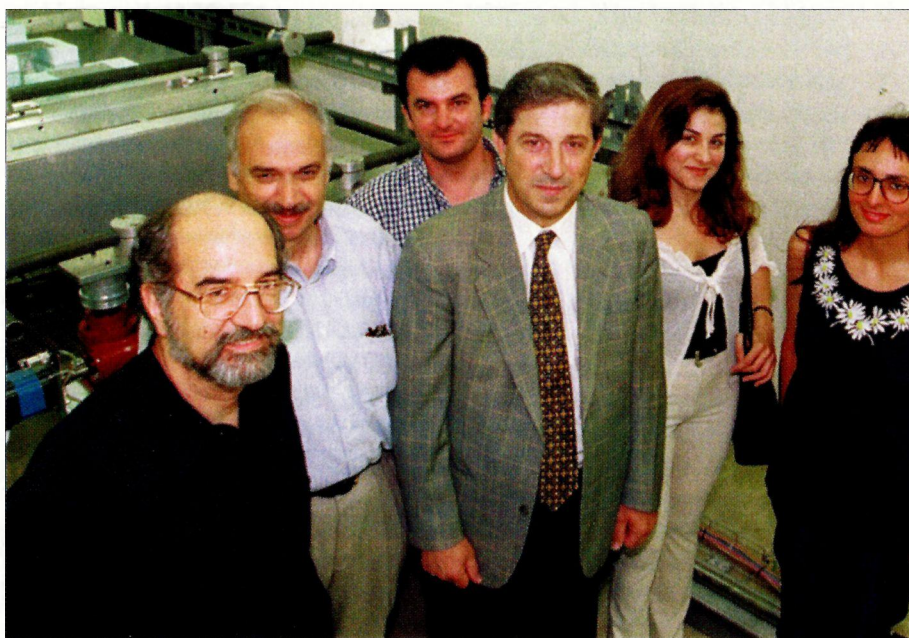
hyperfréquence dans un champ magnétique. Pour les électrons d'ionisation dans la vapeur, la source agit comme un cyclotron miniature où ils tournent en acquérant de l'énergie.

Du fait de l'absence d'électrode, ces sources sont très fiables et peuvent fournir des ions en quantités pratiquement illimitées. Darmstadt est maintenant équipé d'une source RCE CAPRICE, Doubna possède une RCE4M et Berkeley une RCE-U, toutes fonctionnent à 14 GHz.

Bien que n'ayant rien à voir avec les éléments superlourds, le nouveau linac pour ions lourds du CERN, mis en service en 1994, utilise une source d'ions RCE de 14 GHz fournie par la France et produisant des ions 27^+ à 2,5 KeV par nucléon pour alimenter le programme de recherche du CERN en faisceau d'ions lourds.

Le délégué grec au Conseil du CERN, le professeur Floratos (au centre) était présent pour l'arrivée au CERN du premier détecteur de muons pour l'expérience ATLAS sorti d'une ligne de production. Produite par une collaboration de trois universités grecques, la chambre est la première des 1200 qui seront construites au cours des prochaines années pour cette expérience avec le LHC. Le système de détection de muons d'ATLAS couvrira $17\,000\text{ m}^3$. Sa production est répartie entre 46 institutions du monde entier qui appliquent chacune des méthodes rigoureuses de contrôle de la qualité. Les chambres arriveront au CERN dans les quatre années à venir, et le détecteur complet sera prêt à être installé au début de 2004.

Le professeur Floratos est accompagné de membres de l'équipe chargée de la mise en place de la ligne de production grecque, qui a commencé à fonctionner en août.



IRIS Explorer™
Brings alive your most
complex data.



3D
data
vision

the power
to see more
deeply.

Ask for your free trial copy
of IRIS Explorer today, quoting
reference number 799011.

Tel +44 (0)1865 511245

Email sales@nag.co.uk

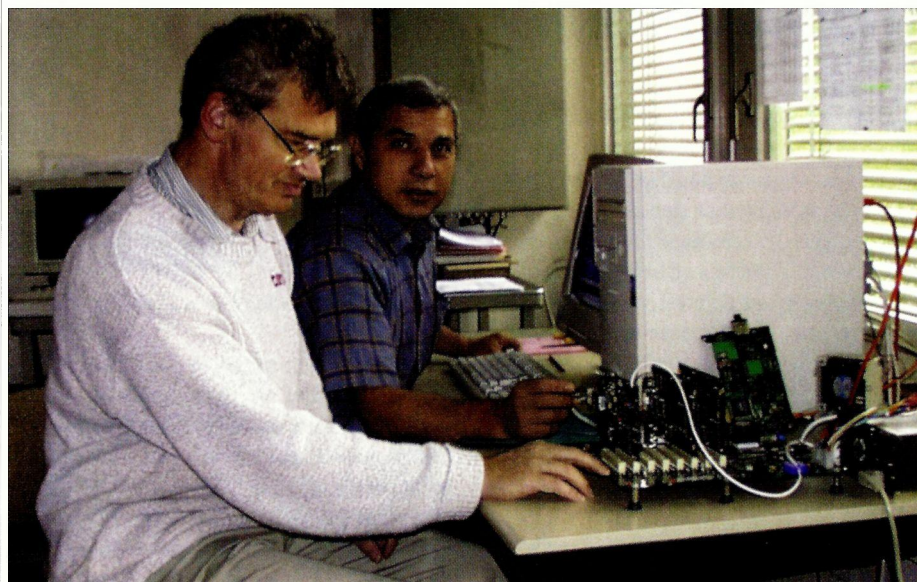
www.nag.co.uk/iecc

NAG®



NOUVELLES

Démonstration du nouveau Gigabyte System Network au CERN



Arie Van Praag (à gauche) et Tzvetomir Anguelov, de l'Institut pour la recherche nucléaire et l'énergie nucléaire de Sofia, en plein travail sur la passerelle reliant GSN et Gigabit Ethernet.

Afin de marquer le grand salon international Telecom '99 de Genève, le CERN a organisé une démonstration du standard de réseau informatique le plus rapide du monde, le Gigabyte System Network. Il s'agit d'un nouveau standard de réseau élaboré par le High Performance Networking Forum, une collaboration mondiale entre industries et universités. Des participants à Telecom '99 sont venus au CERN pour voir fonctionner ce nouveau standard.

Depuis près de trente ans, la communauté scientifique universitaire est à la pointe du progrès en matière de mise en réseau. Dans les tous premiers temps, entre la fin des années 60 et le début des années 70, ce furent les informaticiens travaillant sur le réseau ARPANET américain, le réseau du Laboratoire de physique national britannique et le réseau français Cyclades qui permirent à la mise en réseau de prendre son essor. Plus tard, le NSF-NET américain et le JANET britannique ont apporté ces techniques à la communauté universitaire dans son ensemble. Au CERN, le novateur CERNET des années 70 a été un réseau de réseaux avant la naissance de l'Internet. Puis, lorsque l'ARPANET est devenu l'Internet et a traversé l'Atlantique pour venir en Europe, la physique des hautes énergies en a été le principal utilisateur pendant longtemps.

Aujourd'hui, si les réseaux font partie intégrante

du monde industriel, les laboratoires comme le CERN continuent à jouer un rôle important. Ainsi, le CERN a contribué au Gigabyte System Network (GSN) grâce à la mise au point d'une passerelle destinée à connecter le nouveau standard à l'architecture de réseau locale Gigabit Ethernet, dont le succès est croissant. L'installation mise en place par au CERN – actuellement le plus grand réseau GSN au monde – est un terrain d'essai précieux pour la nouvelle technologie.

GSN est le premier standard de mise en réseau capable de traiter les énormes quantités de données que produiront certainement les expériences futures avec le Grand Collisionneur de Hadrons (LHC) du CERN. Il a une capacité de 800 Mo/s (soit l'équivalent d'un long métrage) qui le rend attractif pour d'autres domaines que celui de la recherche scientifique.

Les fournisseurs de services de l'Internet, par exemple, auront besoin de pareils débits de données pour fournir des produits multimédias de haute qualité sur le Net d'ici quelques années. Aujourd'hui cependant, la plupart des utilisateurs individuels de réseaux doivent se contenter d'une capacité de 5 ko/s, soit pratiquement une seule image. Même le CERN, pourtant l'un des plus grands centres de réseaux d'Europe, dispose actuellement d'une capacité externe de 22 Mo/s seulement.