

Inauguration de la nouvelle machine du Laboratoire Fermi



Le nouvel injecteur principal de 150 GeV et 3200 m de circonférence du Laboratoire Fermi (au premier plan) injecte des particules dans le Tévatron, de plus grande taille.

Le tout dernier accélérateur de particules du monde – l'injecteur principal de 150 GeV du Laboratoire Fermi – a officiellement commencé sa carrière le 1^{er} juin dernier. Le ministre de l'énergie des Etats-Unis, Bill Richardson, le Président de la Chambre des représentants, Dennis Hastert, et le

Gouverneur de l'Illinois, George Ryan, se sont joints au personnel et aux visiteurs scientifiques du Laboratoire Fermi pour fêter l'achèvement du projet, mené à bien conformément au calendrier prévu et sans dépenser tout le budget escompté, de 260 millions de dollars.

"Il a fallu attendre non moins de sept ans pour cette journée d'inauguration!" a souligné le Directeur du Laboratoire Fermi, John Peoples, dont le mandat de dix ans aura couvert toute la durée du projet.

Le nouvel injecteur principal offrira littéralement un élan nouveau au fleuron du Laboratoire Fermi – son synchrotron à protons et collisionneur proton-antiproton, le Tévatron supraconducteur.

En 1991, un important financement de 2,2 millions de dollars de l'Etat d'Illinois a permis au Laboratoire Fermi d'effectuer les premiers pas vers la construction du nouvel injecteur principal. Le financement fédéral fut approuvé en octobre 1991, et la construction a débuté en 1993.

L'équipe de l'injecteur principal a si bien travaillé qu'un nouvel anneau de stockage – le recycleur d'antiprotons – s'est ajouté à l'ensemble d'accélérateurs sans dépasser le budget global du projet ni retarder la date prévue pour son achèvement.

Le recycleur, qui partage le nouveau tunnel circulaire de 3200 m avec l'injecteur principal, utilise des aimants permanents pour récupérer, stocker et littéralement recycler des antiprotons qui auraient été perdus auparavant.

Le Tévatron, entré en exploitation en 1983, était précédemment alimenté par l'anneau principal originel du Laboratoire Fermi, fermé en 1997 après 25 ans de service. Le Tévatron et l'anneau principal partageaient le même tunnel de 6400 m de circonférence. En tant qu'injecteur du Tévatron, l'anneau principal constituait un goulet d'étranglement limitant l'alimentation en antiprotons.

LEP: 100 GeV!

Le collisionneur électron-positon LEP du CERN a entamé la saison 1999 dans une forme éblouissante et, après son traditionnel échauffement à la résonance Z (45 GeV par faisceau), il a fait sensation en portant sans difficulté un paquet d'électrons à l'énergie record de 100 GeV. Cette performance démontre que son équipe au complet comptant 288 cavités accélératrices supraconductrices sait coopérer harmonieusement pour fournir 3,15 GV (3,3 GV sans faisceau).

Peu après, des faisceaux d'électrons et de positons de 98 GeV ont été amenés en collision pour des essais radiofréquence. Après ces débuts étincelants, la physique des hautes énergies a repris avec des faisceaux d'électrons et de positons de 96 GeV. Les fréquences de collision étaient élevées, avec des luminosités bien supé-



Photo de famille devant le dernier module installé des cavités accélératrices supraconductrices du collisionneur électron-positon LEP du CERN.

rieures à $10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, des intensités de faisceau relativement importantes et de bonnes luminosités intégrées (1-2 picobarns inverses par jour).

Il y a tout juste dix ans, le LEP était entré en exploitation équipé de cavités accélératrices radiofréquence en cuivre à température ambiante fournissant 45 GeV par faisceau. A partir de 1995, équipé de cavités supraconductrices, le LEP a

porté ses faisceaux à 65 GeV, puis à 80,5 GeV en 1996 grâce à l'augmentation du nombre de cavités supraconductrices installées. L'an dernier, le LEP a fonctionné habituellement à 94,5 GeV par faisceau.

A ces nouvelles énergies élevées, les expériences LEP s'engagent sur un terrain de la physique potentiellement très fertile et pourraient bientôt révéler les secrets de la théorie électrofaible.

Un détecteur observe des anomalies du rayonnement cosmique

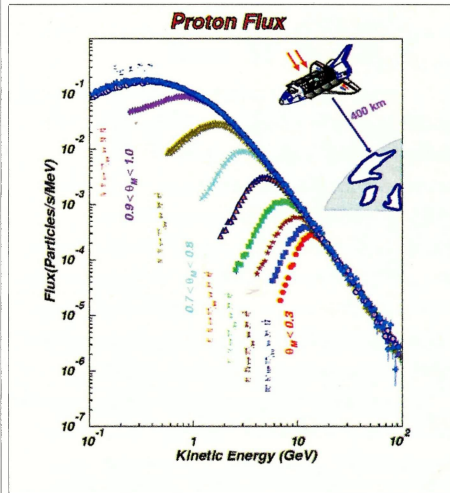


Fig. 1: Distribution attendue des protons cosmiques en fonction de la latitude à l'altitude de 400 kilomètres.

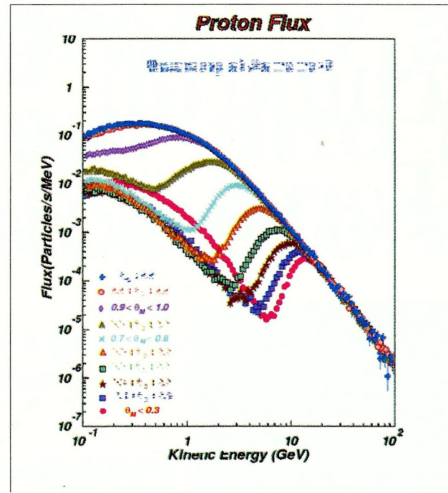


Fig. 2: Distribution des protons cosmiques mesurée par l'expérience AMS à bord de la navette spatiale sous différentes latitudes.

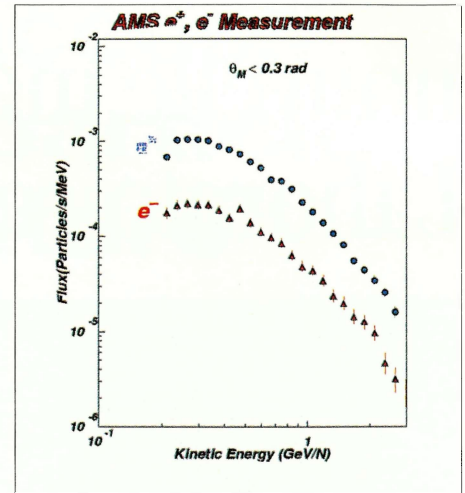


Fig. 3: Dans la région équatoriale, AMS observe environ quatre fois plus de positons que d'électrons de basse énergie.

Comme nous l'avions annoncé brièvement dans notre numéro de juin (p6), le Spectromètre Magnétique Alpha (AMS) a révélé plusieurs effets curieux, notamment des distributions inattendues de particules cosmiques, lors de son vol d'essai de 1998 à bord de la navette spatiale.

Du 2 au 12 juin 1998, AMS constituait la charge principale de la navette spatiale Discovery de la NASA en orbite à 400 kilomètres au-dessus de la Terre. Il s'agissait d'une mission d'essai avant le déploiement d'AMS sur la Station spatiale internationale dans quelques années.

AMS est un détecteur magnétique de pointe comme on en utilise normalement dans les laboratoires de physique des hautes énergies. Pendant son périple de dix jours, AMS a enregistré les traces de plusieurs millions de particules cosmiques. C'était la première fois qu'un détecteur de physique si complexe était mis en oeuvre dans l'espace et la première fois qu'on enregistrerait autant d'informations sur les particules cosmiques. Les premiers résultats de cette mission étaient attendus avec impatience.

L'objectif annoncé d'AMS était de rechercher des signes d'antimatière cosmique. On pense que dans un Univers créé à la suite d'un Big Bang qui a dû produire de la matière et de l'antimatière dans des quantités initiales égales, on devrait trouver des signes de cette antimatière primordiale, avec des antiprotons constitués d'antiprotons et d'antineutrons. Or notre Univers paraît constitué entièrement de matière, et aucune expérience n'a jamais détecté d'antimatière primordiale. AMS

avait entrepris de rechercher des antiprotons au-dessus de l'écran formé par l'atmosphère, mais sur un échantillon de près de trois millions de noyaux d'hélium venus de l'espace on n'a trouvé aucun noyau d'antihélium. AMS n'a pas observé d'antimatière primordiale, mais trois millions de noyaux ce n'est pas beaucoup et les recherches continuent. Le détecteur a cependant observé plusieurs autres effets inattendus qui montrent que le comportement des rayons cosmiques est bien plus complexe qu'on ne le pensait.

L'orbite d'AMS autour de la Terre lui a permis d'intercepter des rayons cosmiques sous les différentes latitudes balayées. Les protons cosmiques couvrent une vaste gamme d'énergies et le champ magnétique terrestre devrait repousser les particules les moins énergétiques. Cette répulsion magnétique terrestre diminue quand la latitude augmente, et on devrait observer près des pôles davantage de particules de basse énergie, chaque latitude étant caractérisée par une certaine coupure magnétique (figure 1). Le détecteur AMS a cependant permis de constater qu'au-dessous d'une certaine énergie spécifique de chaque latitude, l'effet de coupure magnétique disparaît et que le spectre des protons s'infléchit de nouveau et remonte fortement quand l'énergie diminue (figure 2).

Par retournement de la navette spatiale, l'AMS a également recueilli des particules cosmiques ascendantes qui s'éloignent de la Terre. Le flux de protons ascendantes est faible à haute énergie, mais le spectre se remplit rapidement pour les

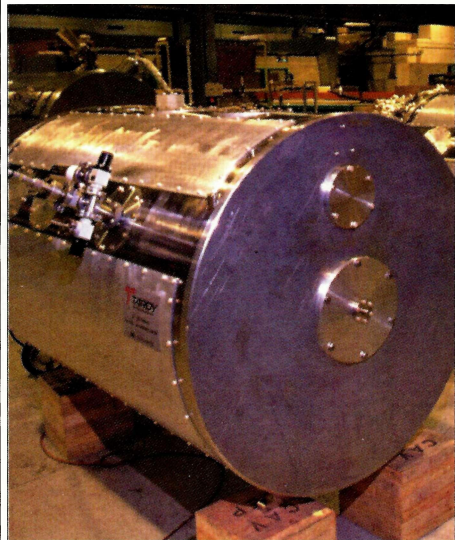
particules de moindre énergie. Dans une bande équatoriale de 4000 kilomètres à l'altitude de l'orbite de la navette qui est de 400 kilomètres, AMS a observé, au-dessous de 6 GeV environ, autant de protons ascendantes que descendantes. Tout se passe comme si ces particules étaient confinées dans un toroïde magnétique ceinturant la Terre.

On a constaté un effet similaire pour les électrons, mais dans ce cas il est intéressant de comparer le nombre d'électrons et celui de leurs antiparticules, les positons. Si les électrons et les positons cosmiques sont créés par paires dans la matérialisation des rayons gamma de haute énergie, il devrait y avoir autant d'électrons que de positons, mais dans la région équatoriale AMS a observé environ quatre fois plus de positons que d'électrons de basse énergie.

AMS a étudié également la distribution des noyaux d'hélium et il a été confronté à une dernière énigme: en effet, au voisinage de l'équateur et à basse énergie, le détecteur a observé uniquement l'isotope hélium 3. Or celui-ci est très rare sur Terre, mais il faisait partie des noyaux primitifs qui se sont formés pendant la période, d'une minute environ, de la nucléosynthèse primordiale de l'Univers.

L'expérience AMS est une grande collaboration internationale réunissant l'Europe, les Etats-Unis, la Chine et Taïwan. Elle est dirigée par Sam Ting du MIT, qui fut aussi pendant longtemps le porte-parole de l'expérience L3 au collisionneur électron-positon LEP du CERN.

Puissance d'accélération du LHC



Un cryomodule prototype contenant des cavités accélératrices supraconductrices pour le collisionneur de protons LHC du CERN.

Les aimants supraconducteurs ne seront pas l'unique technologie supraconductrice présente dans l'anneau de 27 km du LHC, le nouveau collisionneur de protons du CERN.

Lors de sa mise en service en 1989, le collisionneur électron-positon (LEP) du CERN avait une énergie de 50 GeV par faisceau. Après avoir été diligemment exploité au voisinage de la résonance du Z, il a vu son énergie portée à 100 GeV par faisceau.

A l'origine de cette prouesse, une transformation de la machine qui a consisté à rajouter aux traditionnelles cavités radiofréquence résistives des cavités supraconductrices pour mieux alimenter les faisceaux en circulation en puissance d'accélération. Assez rapidement, les travaux de recherche et de développement pour le LEP ont montré que des cavités en cuivre recouvert de niobium étaient plus efficaces que les cavités, plus onéreuses, en niobium massif. Il est d'ailleurs prévu d'utiliser cette technologie dès le début de l'exploitation du LHC.

Pour permettre le transfert rapide d'un grand nombre de paquets de protons du supersynchrotron à protons SPS vers le LHC, la radiofréquence dans ce dernier doit être un multiple de 200 MHz (la fréquence du SPS en amont) mais un harmonique trop élevé empêcherait l'exploitation conjuguée des deux machines, le choix s'est donc porté sur le double de cette fréquence.

Le rôle de la radiofréquence n'est pas le même

pour les électrons (et les positons) du LEP et les protons du LHC, bien que les deux machines utilisent l'anneau de 27 km. A chaque tour, les électrons, qui sont des particules très légères, perdent beaucoup d'énergie sous forme de rayonnement synchrotron, aussi cette perte doit-elle être en permanence compensée par les cavités "accélératrices". La majeure partie de la puissance RF du LEP est transférée au faisceau puis se dissipe sous forme de rayonnement synchrotron.

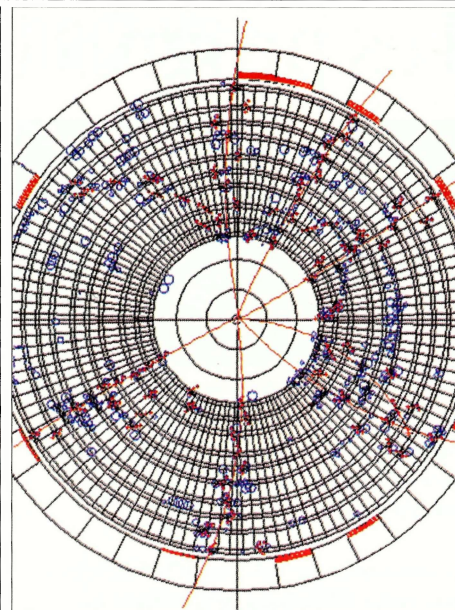
Les faisceaux de protons, au contraire, perdent très peu d'énergie de cette manière. La principale fonction des cavités du LHC consiste donc à maintenir les nombreux paquets de protons étroitement groupés pour assurer une luminosité importante aux points de collision et fournir de la puissance au faisceau pendant la montée en énergie. Remplir ces conditions en utilisant des cavités radiofréquence classiques en cuivre aboutirait à un déplacement inacceptable des points de croisement des faisceaux.

Les cavités supraconductrices, dans lesquelles les pertes d'énergie sont réduites alors que la quantité d'énergie stockée est importante, offrent donc la meilleure solution. L'optimisation de la conception mène à des cavités accélératrices monocellulaires, avec des tubes de grandes dimensions pour les faisceaux, semblables à celles envisagées pour la nouvelle génération de collisionneurs électron-positon.

Le LHC comportera huit cavités par faisceau, capables de fournir chacune 2 MV (champ accélérateur de 5 MV/m) à 400 MHz. Elles seront refroidies à 4,5 K (les aimants du LHC utiliseront de l'hélium superfluide à 1,8 K), regroupées par quatre pour former des cryomodules (deux par faisceau) et installées dans une longue section où l'écartement des faisceaux passera de 195 mm (valeur normale) à 420 mm. Ces cavités sont fabriquées par repoussage et soudure par faisceaux d'électrons, une fine couche de niobium étant rajoutée en surface au moyen d'une pulvérisation par magnétron.

Pour les cavités du LHC, un ingénieux syntoniseur mécanique a été conçu et testé avec succès. Il permettra de les accorder sur la plus large fourchette requise et tient compte d'une rigidité plus importante que pour les cavités du LEP.

Grâce à l'expérience acquise avec les coupleurs du LEP, qui à une époque furent un élément très critique du projet LEP2, les coupleurs reliant les cavités du LHC au système de puissance RF bénéficieront d'une conception extrêmement pointue.



L'un des premiers événements enregistrés par le détecteur BaBar à l'usine à B asymétrique du SLAC.

Les prototypes sortent de l'usine à B

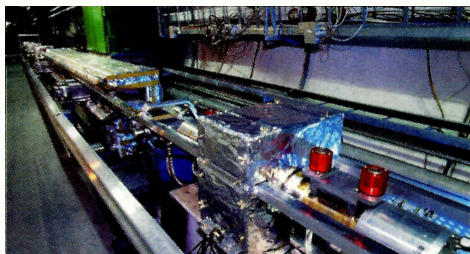
Le 26 mai 1999 au matin, des physiciens ont enregistré les premiers événements dans le grand détecteur BaBar de l'usine à B asymétrique du Centre de l'accélérateur linéaire de Stanford (SLAC). L'usine est entrée en exploitation l'an dernier et a été inaugurée officiellement le 23 octobre 1998 (*Courrier CERN* décembre 1998 p5).

Le collisionneur a été construit par le SLAC et par les laboratoires nationaux Lawrence de Berkeley et de Livermore, grâce à des crédits gouvernementaux des Etats-Unis de 177 millions de dollars. Le détecteur BaBar a été construit par des scientifiques et des ingénieurs de 73 instituts des Etats-Unis, du Canada, de Chine, d'Allemagne, de France, d'Italie, de Norvège, du Royaume-Uni et de Russie. Son coût total s'est élevé à quelque 110 millions de dollars, dont 40% de sources étrangères.

Le détecteur vise à étudier la violation de CP dans des réactions faisant intervenir des particules B, porteuses du cinquième quark ("beauté", du "fond" ou simplement "b").

Les premiers résultats devraient paraître l'an prochain.

Les progrès de la physique de précision



L'aimant principal, recouvert d'une feuille pour contrôler la température, du spectromètre employé pour des mesures de précision de l'énergie du faisceau du collisionneur électron-positon LEP du CERN.

Le collisionneur électron-positon LEP du CERN a bien montré l'importance de la précision des mesures en physique des particules. Pour les recherches avec cette gigantesque machine, il est d'une importance capitale de connaître avec un maximum de précision l'énergie de ses faisceaux. En 1983, les équipes des expériences UA1 et UA2 auprès du collisionneur proton-antiproton du CERN avaient observé la particule Z, le médiateur électriquement neutre de l'interaction faible, avec une poignée d'événements. Au milieu des années 90, les quatre équipes d'expérimentateurs qui travaillaient avec le collisionneur électron-positon LEP du CERN avaient recueilli au total plusieurs millions de particules Z.

Ce grand échantillonnage de données avait pour objet d'établir la cohérence du Modèle standard à la base de la physique des particules. Avant la découverte du sixième quark, le quark t, au collisionneur proton-antiproton Tevatron du Laboratoire Fermi en 1994, ces données recueillies au LEP avaient fourni des indications utiles sur le domaine où devrait se trouver le quark t, qui était alors l'élément manquant du Modèle standard.

Maintenant que ce quark a été découvert et que le Modèle standard de la physique est en si bonne condition, le principal travail à faire est de déterminer les paramètres de la particule de Higgs, recherchée depuis longtemps, qui est responsable de la brisure de symétrie au cœur du Modèle standard. Des mesures de précision pourraient également contribuer à la recherche d'anomalies qui signaleraient de nouveaux effets physiques au-delà du Modèle standard.

Cette "physique de précision" s'est poursuivie à mesure que le LEP s'est éloigné de son objectif initial au niveau de la résonance du Z et qu'il est passé à des énergies supérieures pour explorer la

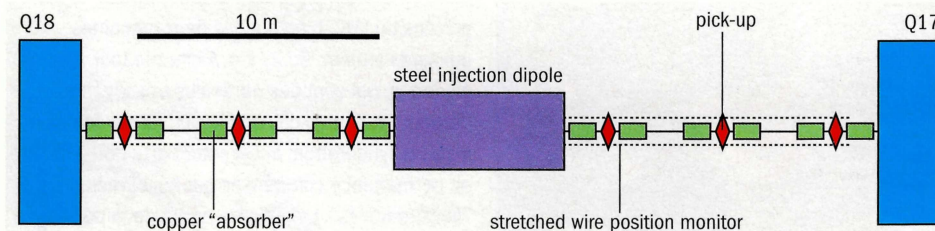


Schéma du nouveau spectromètre montrant les dispositifs de détection de la trajectoire des particules et les absorbeurs pour le rayonnement synchrotron.

production du W, le partenaire électriquement chargé du Z, et dans ce domaine une détermination précise de la masse du W pourrait se révéler très intéressante. Avant le passage du LEP aux énergies supérieures, les informations sur la masse du W avaient été obtenues dans le cadre de la physique des collisions proton-antiproton.

Les premières mesures de la masse du W au LEP en 1996 dépendaient de la détermination du seuil de production, mais après l'augmentation de l'énergie du LEP la masse du W a été déterminée par la cinématique des processus de production eux-mêmes.

Cette exigence de précision s'est traduite par un besoin permanent de mesurer l'énergie des particules dans le LEP avec une précision maximum, si possible à 10-20 MeV près, ou un dix-millième.

On a donc entrepris un programme visant à identifier et compenser les facteurs extérieurs susceptibles d'influencer la mesure de l'énergie des faisceaux. De minuscules effets des marées dans le LEP, amplifiés par le processus d'accélération, peuvent avoir un effet sur l'énergie du faisceau dans une proportion atteignant 40 MeV. On doit également tenir compte d'effets gravitationnels dus à la présence du Jura voisin et au niveau des eaux dans le Lac de Genève. L'étalonnage de l'énergie du LEP est même devenu un moyen à vrai dire coûteux de contrôler le passage des TGV français.

La principale technique de mesure de précision de l'énergie des faisceaux du LEP a été la méthode de la dépolarisation résonante, avec laquelle l'alignement des spins des électrons stockés est détruit. Mais cette méthode est précise uniquement à basse énergie, autour de 60 GeV par faisceau. Comme l'énergie du LEP approche maintenant 100 GeV par faisceau, les mesures à basse énergie doivent être extrapolées sur une longue distance, ce qui limite la précision atteignable.

Pour éviter cet inconvénient, on a entrepris un projet consistant à monter à l'intérieur même de l'anneau du LEP un spectromètre magnétique qui mesurera directement, par déviation magnétique, l'énergie du faisceau.

Ce spectromètre est un aimant dipolaire en acier monté dans l'anneau du LEP entre les aimants dipolaires standard en tôle d'acier noyées dans du béton qui servent à guider les particules du LEP. De part et d'autre du dipôle spectromètre, des détecteurs de position de faisceau repèrent les particules entrant ou sortant du LEP, l'objectif étant de mesurer les variations dans la courbure des trajectoires de particules avec une précision de 10^{-4} et d'atteindre avec l'ensemble des détecteurs une précision de mesure de $1 \mu\text{m}$.

A mesure que la trajectoire des particules est incurvée dans l'anneau du LEP, celles-ci émettent en permanence un rayonnement synchrotron, faisant penser à des crissements de pneus, qui peut presque atteindre 1 kW/m. Cette émission n'est pas dangereuse lorsqu'il n'y a personne autour de l'anneau et elle disparaît dès que la machine est mise à l'arrêt. Mais quand la machine fonctionne, ce rayonnement peut échauffer les supports mécaniques en produisant des contractions et des dilatations de l'ordre de plusieurs micromètres qui masqueraient les mesures du spectromètre. Pour éviter cela, les détecteurs de position de faisceau sont protégés par des absorbeurs en cuivre qui "épongent" le rayonnement synchrotron. Un système de positionnement par fil tendu contrôle la position relative des détecteurs de position de faisceau avec une précision de $1 \mu\text{m}$.

Le système est maintenant installé et il recueille des données préliminaires avant sa mise en service régulier cette année même. Le nouveau spectromètre est un exemple frappant de microtechnologie et d'électronique de lecture de précision pour la physique.

NEW FROM CERAMASEAL

Glass-Ceramic Circular Connectors



10-Pin Connector with Air-Side Plug



Circular Connector Header Termination Options

Versatile Connector System Offers Higher Pin Densities for Extreme Environments

Ceramaseal's newest addition to its family of glass-ceramic products is a complete connector system of high-performance, high-density, and high-temperature assemblies.

The new system consists of glass-ceramic hermetically-sealed headers with standard and custom plug interface connections.

Three Different Design Options to Meet Your System Requirements

DOUBLE-ENDED DESIGN

Complete assembly with plug on the air side and threaded plug connection on the vacuum side

STRAIGHT-PIN DESIGN

This assembly consists of a plug on the air side with 0.40" diameter pin for connection on the vacuum side

SOLDER-PIN DESIGN

Our solder-pin design includes an air-side plug with solder cup pin for connection on the vacuum side

Hermetic Headers

The new circular connector headers are non-magnetic and available in 3, 6, 10, 19, 32, and 41 pin configurations with 304 stainless steel alloy pins. They are UHV compatible with a minimum leak rate of 1×10^{-9} standard cc/sec He.

Additional specifications include:

- Rated for temperature ranges of -269°C to 400°C
- Voltages to 1K
- Current up to 5 amps
- Pin configurations based on Mil-C-26482 connectors
- Available as weldable assemblies or welded into plates, conflat flanges and other flange options.

Air-Side Plugs

- Available for either 125°C or 200°C per Mil-G-45204 Series I and II
- Contacts are constructed of gold-plated copper alloy
- Available in all pin configurations

Vacuum-Side Plugs

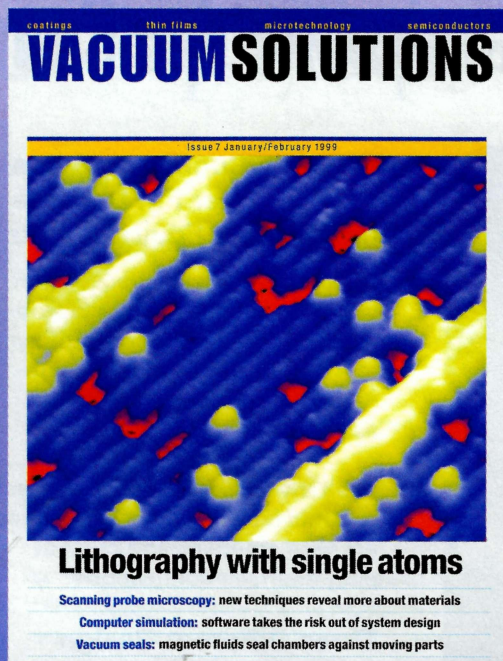
- Rated for temperature ranges of -269°C to 200°C
- Threaded shells are constructed of 304 stainless steel with PEEK insulation
- Contacts are constructed of gold-plated copper alloy
- Available in all pin configurations



Ceramaseal
A Division of CeramTec

P.O. Box 260, 1033 US Route 20, New Lebanon, New York 12125
1-800-752-SEAL(7325) or 518-794-7800, Fax: 518-794-8080
E-Mail: sales@ceramaseal.com
www.ceramaseal.com

VACUUM SOLUTIONS



The only magazine entirely devoted to the needs of vacuum users

If you work in vacuum, coatings, microtechnology, semiconductors or thin films, make sure you join the ever-growing number of professionals who rely on *Vacuum Solutions* for the very latest information relevant to their work.

Written by industry insiders and scientific experts, *Vacuum Solutions* is the dedicated publication highlighting the latest innovations that rely on the use of vacuum technology.

Subscription Form

Yes! I would like to take out a subscription to *Vacuum Solutions*.

☐ £48/\$90 6 Issues

☐ £77/\$144 12 Issues **SPECIAL INTRODUCTORY OFFER – 20% DISCOUNT**

Cheques and money orders should be made payable to **IOP Publishing Limited**.

☐ Please charge my Amex/Diners/Mastercard/Visa

Card No

Expiry Date

☐ Please invoice me/my company

Name

Job title

Company

Address

Postcode

Country

E-mail

Tel. (inc. country and area code)

Fax (inc. country and area code)

Signature

Date

Please return to: *Vacuum Solutions* WDIS Ltd, Publishing House, Victoria Road, Ruislip Middlesex, HA4 0SX, United Kingdom

For fast service telephone the subscription hotline on +44 (0)181 845 8545 or photocopy and fax this to +44 (0)181 845 7696

If you have access to the Web you can complete the on-line form at <http://www.vacuum-solutions.com/subscribe.html>