

L'asymétrie matière-antimatière observée dans un nouveau cadre

Avec beaucoup d'à-propos l'année 2000 voit les débuts d'un nouveau type de physique de précision. Ils ont été annoncés par les conférences plénières d'ouverture à la conférence internationale sur la physique des hautes énergies, la traditionnelle grand messe bisannuelle de la physique des particules qui se tenait cette année à Osaka.

Le 31 juillet, les premiers orateurs des séances plénières à Osaka – David Hitlin de Caltech et Hiroaki Aihara de Tokyo – ont présenté les premiers résultats expérimentaux respectivement pour les détecteurs BaBar et BELLE. Un effet très petit mais paradoxalement très important appelé violation de CP a maintenant été observé et mesuré ailleurs que dans son repère traditionnel qui était resté limité aux kaons neutres.

Les nouveaux collisionneurs électron-positon sont les hôtes de BaBar et BELLE, BaBar à la machine PEP-II du SLAC, Stanford, et BELLE au KEKB du laboratoire japonais KEK. L'exploitation de ces collisionneurs pour la physique a commencé en 1999 avec l'objectif d'obtenir des luminosités suffisamment élevées pour produire en masse les mésons B, des particules contenant le cinquième quark b, c'est pourquoi on les appelle des "usines à B". La mise en service de ces deux machines a été impressionnante et elles fournissent routinièrement des luminosités dépassant $10^{33}/\text{cm}^2/\text{s}$, des valeurs jusqu'alors inouïes.

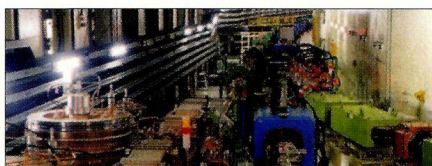
Les physiciens pensent que le subtil effet de violation de CP, ou asymétrie matière-antimatière, a joué un rôle capital pour dessiner le scénario relatif aux particules qui ont émergé du big-bang. On suppose que l'explosion initiale qui a créé l'univers a produit de la matière et de l'antimatière en quantités égales. On s'accorde en général à considérer que la violation de CP a ensuite façonné l'univers de telle manière qu'il s'est en fin de compte trouvé en apparence totalement dépourvu d'antimatière.

Si la symétrie CP (charge-parité) est vérifiée, la physique des particules gauches est la même que celle des antiparticules droites. En 1964, des physiciens ont découvert que les désintégrations de l'un des kaons neutres (celui à vie longue) ne respecte la symétrie CP que dans 99,997% des cas. Il reste une minuscule violation qui suffit pour définir explicitement le signe positif ou négatif de la charge électrique – le choix n'est plus seulement affaire de convention.

Plus tard des expériences de précision (mai p6) ont sondé en profondeur la violation de CP, révélant des effets encore plus petits qui interviennent au niveau des quarks. De l'ordre du millionième, ils sont difficiles à observer et encore plus difficiles à



Une usine à B: l'anneau PEP-II au SLAC...



... et une autre: le collisionneur KEKB au Japon.

mesurer, de sorte qu'il a fallu une vingtaine d'années pour que les expérimentateurs s'approchent d'un consensus.

Les quarks se transforment les uns dans les autres sous l'action de la force faible, et les diverses transformations possibles des quarks ont été largement étudiées et documentées sous la forme de la matrice CKM (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa) des intensités de couplage des quarks. D'après les valeurs des éléments de cette matrice, la violation de CP dans les désintégrations des mésons B devrait être plus facile à observer que dans le système des kaons neutres.

Les résultats

A Osaka il a été annoncé que PEP-II a fourni depuis mai dernier une luminosité accumulée impressionnante de 16 femtobarns inverses, dont BaBar possède 14 sur bandes. Le collisionneur fonctionne extrêmement bien et a déjà dépassé l'objectif nominal de 135 picobarns inverses par jour. Pour les mesures présentées à Osaka, le groupe BaBar a utilisé seulement les données de cette année, lesquelles correspondent à quelque 10 femtobarns inverses.

La mesure de la violation de CP se fait sur les désintégrations des B en un J/psi et un kaon à vie courte – en utilisant plusieurs modes de désintégration différents des kaons – et en un psi prime accompagné d'un kaon à vie courte. Un total de 120 événements reconstitués a servi à déterminer le paramètre $\sin(2\beta)$ de violation de CP. BaBar a obtenu la valeur $0,12 \pm 0,37 \pm 0,09$. On a en outre pu vérifier que les asymétries CP de branches qui ne devraient présenter aucune violation de CP, par exemple J/psi plus kaon positif, sont compatibles avec zéro.

L'équipe PEP-II prévoit d'étendre la période de cette année jusqu'en octobre et de recueillir

25 femtobarns inverses (le groupe BaBar visait à obtenir 30 femtobarns inverses et va atteindre son but dès le tout début).

L'équipe BELLE au KEKB utilise l'ensemble des données recueillies depuis le commencement, elles correspondent à 6,8 femtobarns inverses. La luminosité atteinte à ce jour s'élève à $2,04 \times 10^{33}$. Les branches de désintégration utilisées pour déterminer le paramètre $\sin(2\beta)$ de violation de CP incluent, outre celles utilisées à PEP-II, les désintégrations du B en chi-c1 et les désintégrations donnant des kaons à vie longue (BaBar possède également 89 de ces événements mais ne les a pas encore pris en compte). Au total l'ajustement CP final de BELLE est basé sur 98 événements.

Pour les événements J/psi Ks considérés seuls, BELLE obtient le résultat $\sin(2\beta) = 0,49 + 0,53 - 0,57$. Si on le combine avec le résultat des autres événements on obtient $\sin(2\beta) = 0,45 + 0,43 - 0,44 + 0,07 - 0,09$. Statistiquement ce résultat se situe à moins d'un écart-type des déterminations ou valeurs attendues précédentes. Le groupe a vérifié que les branches de désintégration dans lesquelles on n'attend pas d'asymétrie CP donnent effectivement un résultat nul. On prévoit que l'exploitation de BELLE reprendra en octobre et ira, avec des intensités plus élevées, jusqu'à l'été 2001.

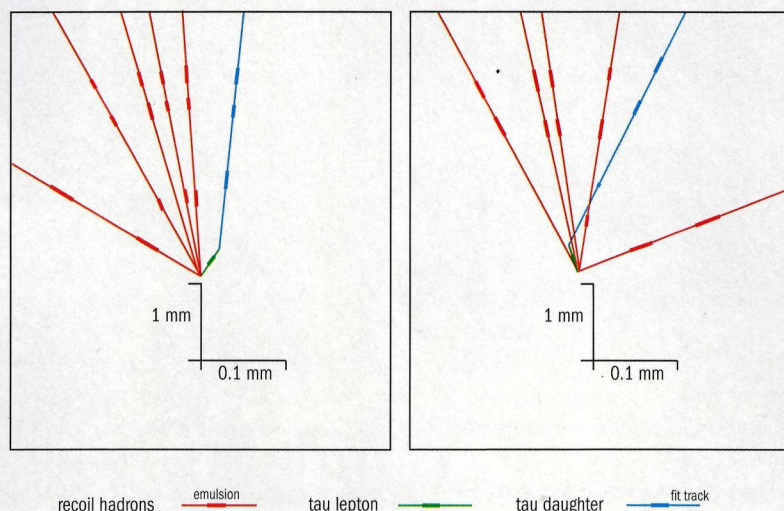
En conclusion

Les premiers résultats de BaBar et BELLE montrent que la violation de CP se produit dans les désintégrations des B. Le fait que cet effet puisse être mesuré pour des particules B si rapidement après le lancement de deux machines innovatives dans deux expériences nouvelles difficiles constitue un succès majeur et augure bien de la vigueur à long terme de cette nouvelle branche de la physique des particules. Il a fallu longtemps avant de connaître avec certitude les paramètres de la violation de CP dans la désintégration des kaons neutres. Les progrès seront probablement nettement plus rapides dans le secteur des B.

Le collisionneur proton-antiproton Tévatron du Laboratoire Fermi est aussi une source abondante de particules B et le groupe CDF y a également hardiment tenté auparavant de mesurer la violation de CP dans les désintégrations des B. L'environnement est encombré de particules et le signal difficile à mesurer, mais un effet était presque certainement visible. Avec l'avènement des usines à B PEP-II et KEKB, l'étude de l'asymétrie matière-antimatière entre dans une nouvelle ère.

D'après le rapport de Ariane Frey, CERN.

DONUT saisit le neutrino du tau



Les trajectoires sub-millimétriques révélatrices laissées par les particules tau (dues à des interactions de neutrinos du tau) dans le détecteur à émulsion DONUT au Laboratoire Fermi.

Une expérience neutrino au Laboratoire Fermi a observé directement pour la première fois le neutrino du tau, la plus insaisissable des 12 particules qui selon le modèle standard composent le tableau de la structure fondamentale de la matière.

Utilisant le faisceau intense de neutrinos au Tevatron du Laboratoire Fermi, la collaboration DONUT (Direct Observation of the Nu Tau) a observé quatre exemplaires de neutrinos donnant naissance à des trajectoires coudées, un signe révélateur qu'une particule tau instable a été produite.

Selon le modèle standard, toute la matière que nous connaissons dans la nature s'explique sur la base de six quarks – les constituants ultimes de la matière nucléaire – et de six autres particules (les "leptons"). Les quarks appartiennent à trois paires – u et d qui sont légers, s et c lourds, et b et t encore plus lourds. Les six leptons appartiennent également à trois paires – trois "électronidés", l'électron proprement dit, le muon et le tau; et trois neutrinos fantomatiques chacun d'entre eux associé à l'un des électronidés. On peut donc disposer les quarks et les leptons du modèle standard en trois "familles" de quatre objets: la première contient u et d, l'électron et le neutrino de l'électron; la seconde, les quarks étrange et charme, le muon et le neutrino du muon; et la troisième les quarks b et t ainsi que le tau et le neutrino du tau.

Il est connu depuis un certain temps que le modèle standard doit contenir ces 12 particules, mais à l'origine elles n'avaient pas toutes été obser-

vées. En 1995, des expériences au collisionneur Tevatron du Laboratoire Fermi avaient observé les preuves de l'existence de particules contenant le sixième quark attendu de longue date, le t. Maintenant, avec cette preuve relative aux neutrinos du tau, on dispose finalement de la confirmation directe de l'existence de ces 12 particules.

Pour mener l'expérience DONUT, on tire le faisceau de protons de 800 GeV du Laboratoire Fermi (en fait l'énergie la plus élevée disponible dans le monde) dans une cible immense, ou "bloc d'arrêt du faisceau", qui produit un brouillard dense de particules secondaires extrêmement instables. Le méson D y est représenté, il contient à la fois des quarks s et c (la particule D_s), susceptibles de se désintégrer en produisant des neutrinos du tau. (Habituellement on produit les neutrinos en laissant se désintégrer des pions et kaons secondaires. Mais dans le cas d'un bloc d'arrêt, beaucoup de ces derniers sont absorbés dans le milieu environnant avant d'avoir le temps de se désintégrer en produisant des neutrinos. Cela tend à accroître la fraction du contenu en neutrinos produit par d'autres désintégrations).

Après le bloc d'arrêt, un parcours d'obstacles magnétique sert à balayer les particules chargées, tandis que d'épais blindages absorbent beaucoup des autres. Cependant, à peine affectés, les neutrinos impalpables poursuivent leur chemin. Le détecteur DONUT se trouve en aval des aimants et des blindages, il s'agit d'un sandwich de plaques



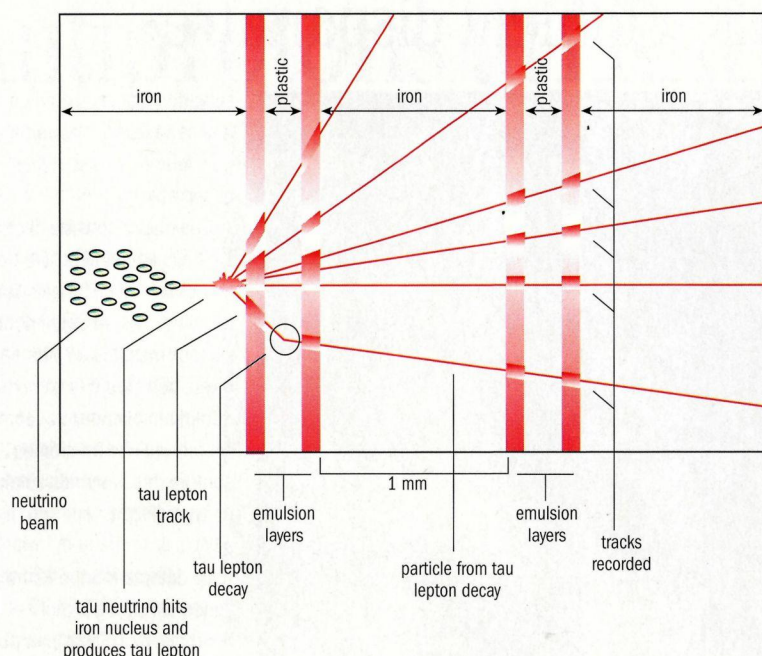
Le porte-parole de DONUT Byron Lundberg, Laboratoire Fermi, avec le détecteur DONUT.

de fer et d'émulsion photographique. Dans cette cible, un neutrino du tau par milliard frappe un noyau de fer en émettant un lepton tau instable.

Les leptons tau (comme l'électron ils portent une charge électrique) laissent une minuscule trace sub-millimétrique dans l'émulsion avant de se désintégrer. La collaboration DONUT s'est proposée de rechercher ces minuscules bouts de trajectoires. Sur la centaine de collisions de neutrinos du tau, quatre seulement de ces bouts de trajectoire ont été découverts à ce jour. Séparer ces signaux de la masse des données accumulées constitue un triomphe de la méticulosité. La technologie de l'émulsion mise au point à Nagoya, Japon, joue un rôle capital dans ce travail, et l'équipe japonaise se charge de l'analyse cruciale des émulsions de DONUT.

Quand le collisionneur électron-positon LEP du CERN est entré en exploitation en 1989, l'un de ses premiers résultats a été de montrer que les désintégrations des particules limites à trois et seulement trois le nombre de types de neutrinos. Le premier d'entre eux avait été observé par Clyde Cowan et Fred Reines dans une expérience auprès d'un réacteur nucléaire en 1955 pour laquelle le second avait reçu le prix Nobel de physique en 1995 (Cowan était mort en 1974). Dans les années 50, l'observation du neutrino (dans ce cas du type électron) fut considérée comme une grande prouesse.

Rapidement, le tableau des désintégrations du



Le schéma de DONUT: comment observer les insaisissables neutrinos du tau. Les chercheurs s'attendent à ce qu'un neutrino du tau interagisse avec un noyau de fer pour environ mille milliards traversant le détecteur.

muon allait suggérer que le neutrino doit exister sous deux formes différentes, l'une préférentiellement associée aux électrons et l'autre aux muons. En 1962, une équipe d'expérimentateurs conduite par Leon Lederman, Mel Schwartz et Jack Steinberger devait révéler à Brookhaven des trajectoires de muons qui émergeaient d'interactions de neutrinos. Pour cette découverte ce trio allait recevoir le prix Nobel en 1988.

En 1975, Martin Perl au collisionneur électron-positon SPEAR au SLAC, Stanford, découvrait le troisième lepton, le tau. Avant cette découverte, deux familles de particules fondamentales seulement étaient connues. La percée due à Perl suggérait qu'il en existait trois. Pour la découverte du tau, il devait recevoir le prix Nobel 1995, qu'il partageait avec le pionnier des neutrinos, Reines.

Pour que le tau trouve sa place dans le tableau, il fallait qu'il soit lui aussi accompagné de son propre neutrino. Les physiciens allaient apprendre à vivre avec le caractère insaisissable de ce dernier, mais en certaines occasions, ils pouvaient en déduire l'existence directement. Par exemple, en 1987, l'expérience UA1 au collisionneur proton-antiproton du CERN avait étudié les désintégrations de la particule W, le porteur électriquement chargé des interactions faibles découvertes au CERN quatre ans plus tôt. Mettant de côté les désintégrations du W qui produisent soit des électrons soit des muons, ils avaient

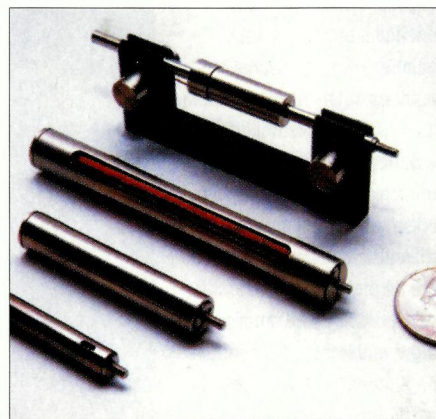
découvert 29 désintégrations qu'ils avaient désignées comme candidates pour la production du tau (et du neutrino du tau). Bien que le neutrino n'ait pu être observé, le bilan énergie-impulsion révélait une "énergie manquante", prouvant qu'une particule invisible – le neutrino du tau – s'était échappée dans les désintégrations du W. La physique du tau, dans laquelle le neutrino du tau joue un rôle essentiel mais invisible, allait devenir une science de précision dans les mains des expérimentateurs des collisionneurs électron-positon – LEP au CERN et CESR à Cornell (janvier p20).

La récente expérience neutrino CHORUS au CERN utilisait également la technologie des émulsions de Nagoya. Tout comme ses voisins de NOMAD, le groupe CHORUS s'était proposé de rechercher la transformation des neutrinos du muon en neutrinos du tau (oscillation neutrino). Ces deux expériences utilisaient une cible classique de production de neutrinos plutôt qu'un bloc d'arrêt. Aux énergies des protons plus faibles disponibles au CERN, peu de particules D_s contenant des quarks lourds sont produites directement. Les expériences n'ont détecté aucun neutrino du tau, que ce soit par oscillation ou par production directe.

DONUT est une collaboration entre les Etats-Unis, Grèce, Japon et Corée.

Des informations complémentaires sur DONUT sont disponibles sur "<http://fn872.fnal.gov/>".

Energen gagne sur tous les plans



Actionneurs magnétostrictifs Energen: un matériel gagnant.

Energen de Billerica, Massachusetts, a gagné le 7e concours annuel de plans d'activité du Forum WPI Venture.

Le plan récompensé d'Energen présente en détail la stratégie adoptée par l'entreprise pour créer des actionneurs magnétiques supraconducteurs intelligents (magnétostrictifs) très puissants destinés à l'industrie des accélérateurs de particules.

Éléments cruciaux des syntoniseurs dans les cavités radiofréquence des accélérateurs de particules, les actionneurs d'Energen améliorent la précision des faisceaux de particules et augmentent la fiabilité des accélérateurs tout en réduisant les coûts de conception et de construction.

Le Forum WPI Venture encourage et défend l'activité industrielle dans le domaine de la technologie et la croissance économique en Nouvelle-Angleterre (Etats-Unis) en élargissant les connaissances commerciales et financières des participants, en leur faisant partager leurs expériences aussi bien avec des entrepreneurs qu'avec des dirigeants du commerce, de la finance et de l'éducation.

Le concours de plans d'activité du Forum WPI Venture est un événement annuel ouvert à tous les chefs d'entreprise de Nouvelle-Angleterre ayant des projets d'activité dans le domaine de la technologie.

Energen élabore, fabrique et commercialise des actionneurs de précision basés sur la technologie des matériaux magnétiques intelligents pour le positionnement de précision, la robotique et le contrôle actif des vibrations.

Pour plus d'information sur Energen, consultez "<http://www.energeninc.com>".

Les neutrinos artificiels semblent disparaître

Les premiers résultats de l'expérience japonaise longue distance dans un faisceau de neutrinos ont été annoncés à la récente réunion Neutrino 2000 de Sudbury, Canada. Pour la première fois on a pu observer la disparition de neutrinos artificiels créés dans un laboratoire de physique.

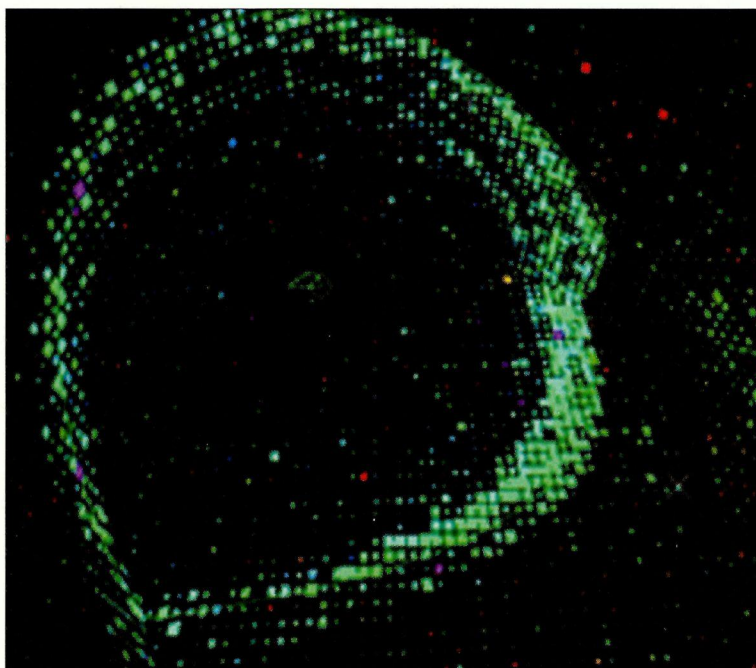
L'expérience K2K consiste à diriger vers le détecteur souterrain Superkamiokande, distant de 250 km, des neutrinos (du type muon) engendré dans le laboratoire japonais KEK. Dans le détecteur, on surveille à l'aide de photomultiplicateurs sensibles 22 500 tonnes d'eau pour repérer les brefs éclairs de lumière que produisent les interactions des particules.

La collaboration, qui a commencé son expérience l'an dernier (octobre p5) a été en mesure d'annoncer à Sudbury qu'elle avait obtenu 17 impacts de neutrinos. Les impulsions des protons d'origine dans l'accélérateur source servent à chronométrer l'arrivée des neutrinos, de sorte que les résultats sont pratiquement débarrassés de tout bruit de fond accidentel.

29 impacts de neutrinos étaient attendus si le faisceau lancé du laboratoire KEK arrivait sans encombre à Superkamiokande. Un tel déficit, s'il se confirme, implique que quelque chose perturbe la propagation des particules sur leur trajet de 250 km.

Ce n'est pas une surprise. En 1998, les résultats initiaux de Superkamiokande sur les muons engendrés par des neutrinos produits par les collisions des rayons cosmiques dans l'atmosphère avaient montré une différence entre les neutrinos de type muon arrivant de l'atmosphère directement au-dessus du détecteur et ceux qui parvenaient du dessous.

Il ne s'agit pas là d'absorption par la terre – 99,999...% des neutrinos la traversent comme si elle n'existait pas. L'effet a été interprété comme une métamorphose neutrinique – des "oscillations" – intervenant au cours de la traversée de la planète par les particules.



Un évènement typique observé dans l'expérience K2K avec faisceaux de neutrinos à longue distance au Japon. Les neutrinos engendrés par un faisceau de protons dans le laboratoire japonais KEK sont dirigés vers le détecteur souterrain Superkamiokande, distant de 250 km. Dans le détecteur on surveille 22 500 tonnes d'eau à l'aide de photomultiplicateurs sensibles pour repérer les brefs éclairs de lumière que produisent les interactions de particules. On observe moins d'impacts de neutrinos que prévu, ce qui implique que quelque chose vient perturber les neutrinos d'origine sur leur trajet.

Les neutrinos sont de trois sortes – types électron, muon et tau – qui correspondent aux particules auxquelles on peut les associer. Longtemps les physiciens avaient pensé que l'appartenance des neutrinos à une famille était définitive – un neutrino produit dans un milieu électronique resterait un neutrino de l'électron pour toujours.

Mais cela n'est vrai que si les neutrinos ne possèdent pas de masse et se propagent à la vitesse de la lumière. S'ils possèdent une masse minuscule ils peuvent en principe changer d'appartenance familiale électron/muon/tau sur leur trajet. Les effets observés par Superkamiokande sur les neutrinos atmosphériques en 1998 fournissaient la première preuve solide de ces oscillations neutrino. Ces données de Superkamiokande ont maintenant été consolidées tandis que de nouvelles preuves sont également apparues.

Si des oscillations sont permises, il est plus probable que des neutrinos d'un type donné vont se transformer en neutrinos d'un autre type plutôt qu'interagir avec la matière. Si le détecteur d'ob-

servation n'est sensible qu'à une certaine famille, certains des neutrinos ne sont plus observables.

Ces disparitions de neutrinos sont également liées à la déplétion observée de longue date des neutrinos du Soleil dont les signaux mesurés à l'aide de divers détecteurs (y compris Superkamiokande) ne représentent qu'une fraction du nombre des neutrinos solaires de type électron attendu (juillet p17).

Le détecteur Superkamiokande est sensible aux neutrinos de l'électron et du muon. Cependant, si les neutrinos originels de type muon provenant du KEK se transforment en neutrinos du tau, Superkamiokande ne peut les observer. C'est ainsi que l'on interprète le déficit initial enregistré par l'expérience au Japon. Toutefois il ne s'agit là que des premiers résultats de l'expérience K2K, il faut habituellement beaucoup de temps

pour réunir des données fiables sur les neutrinos.

La transmutation des neutrinos du muon en neutrinos du tau est une bonne nouvelle pour les expériences neutrino à longue distance aujourd'hui en construction. La collaboration MINOS aux Etats-Unis expédiera des neutrinos sur 730 km depuis le Laboratoire Fermi jusqu'à son détecteur dans la mine de Soudan, Minnesota, tandis que les neutrinos du CERN seront envoyés vers de nouveaux détecteurs dans le laboratoire souterrain italien du Gran Sasso, également éloigné de 730 km (janvier p5). On espère que les détecteurs de ces projets capteront les signaux du neutrino du tau, lesquels sont absents des faisceaux au moment où ils quittent leur laboratoire d'origine.

Du fait de la faible affinité des neutrinos pour la matière, les capturer dans un détecteur reste toujours un défi. La collaboration DONUT au Laboratoire Fermi a récemment présenté une preuve vraisemblable de la production de neutrinos du tau dans les interactions des particules (voir p6).

L'expérience K2K est une collaboration Japon/Corée/Etats-Unis.

Antiprotons atTRAPpés

Le nouveau décélérateur d'antiprotons (AD) du CERN fait en ce moment son entrée, ouvrant un nouveau chapitre dans la longue histoire des expériences de physique du CERN avec des antiprotons. Avec la machine AD, il ne s'agit plus d'exploiter des faisceaux d'antiprotons mais de capturer ces précieuses antiparticules nucléaires.

Lorsque l'anneau d'antiprotons de basse énergie LEAR du CERN a été fermé en 1996 après plus de 10 ans de fonctionnement, il avait fourni $1,3 \times 10^{14}$ antiprotons, ce qui suffirait pour en fournir environ 10 000 à chaque

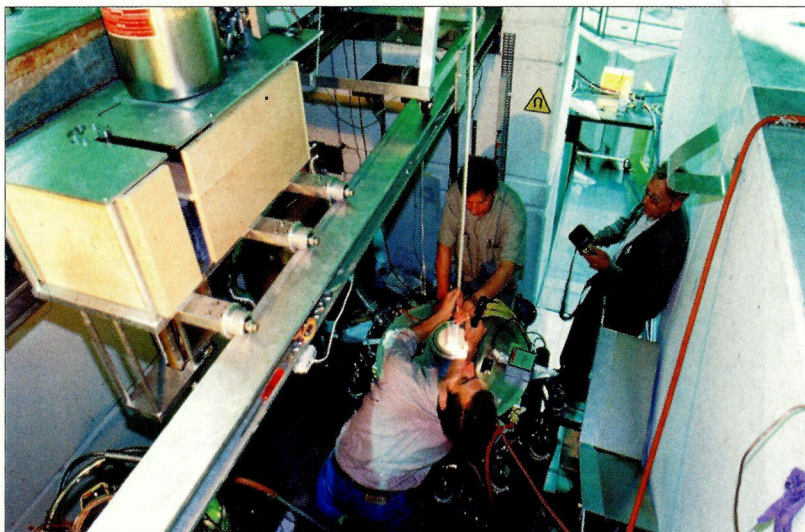
habitant de la planète, mais ne représente qu'une accumulation théorique de 0,2 ng d'antimatière.

Bien que le LEAR ait ralenti les faisceaux de particules délivrés par l'usine à antiprotons du CERN en réduisant d'un facteur 10 environ leur énergie initiale de 26 GeV (un exploit en soi), ses antiprotons étaient encore animés d'un mouvement extrêmement rapide. Lorsqu'une particule a une énergie de 100 MeV, cela équivaut à une température de plusieurs milliards de degrés.

De tous les antiprotons du LEAR, seuls quelques-uns ont eu le privilège d'être sélectionnés pour être finalement refroidis à des températures approchant le zéro absolu. Les techniques acquises au cours de ce travail ont donné un moyen de réaliser des économies substantielles dans la production des antiparticules, probablement une des matières premières les plus rares, donc les plus coûteuses au monde.

Le refroidissement des antiprotons est une tâche difficile. Ils s'annihilent très vite au contact de la matière ordinaire, comme l'hélium liquide, qui est le milieu couramment utilisé pour l'ultra-refrigération. Les antiprotons doivent alors être surrefroidis par un gaz d'électrons (les antiprotons chargés négativement peuvent sans aucun problème coexister avec les électrons).

De cette manière, la collaboration TRAP Bonn-Harvard-Séoul a été capable d'accumuler en une seule fois plusieurs milliers d'antiprotons ultrafroids. Les antiprotons refroidis jusqu'à une



Installation de l'expérience ATRAP au décélérateur d'antiprotons du CERN. Piéger des antiprotons dans des champs électromagnétiques est un moyen économique d'exploiter ces précieuses particules.

énergie si faible par les électrons étaient capturés dans un piège peu profond, au moyen de champs électriques et magnétiques qui y renaient les précieuses antiparticules. En même temps, un grand puits électromagnétique était ouvert à proximité pour accueillir une nouvelle série d'antiprotons, qui étaient ensuite refroidis de la même manière. Les énergies des antiparticules individuelles équivalaient alors à un dix milliardième de ce qu'elles étaient dans le LEAR.

Une physique antiprotons intéressante devenait ainsi possible à partir d'une source d'antiprotons moins ambitieuse. C'est ce qui a motivé la décision de construire la nouvelle machine AD du CERN, qui approvisionne plusieurs expériences en antiprotons: ATRAP (successeur de TRAP au LEAR), ATHENA et ASACUSA.

L'un des objectifs ultimes de la recherche avec LEAR était d'isoler un seul antiproton et de l'étudier attentivement. En réduisant petit à petit la "profondeur" électromagnétique de son piège, l'équipe de TRAP éliminait l'excès d'antiparticules jusqu'à ce qu'un seul antiproton subsiste.

Tout comme n'importe quelle particule électriquement chargée capturée, un antiproton se met en orbite dans un champ magnétique, c'est le principe du cyclotron.

Comparer la fréquence de rotation d'un antiproton à celle d'un proton permet de comparer directement la masse de la particule à celle de son antiparticule.

L'équipe TRAP au LEAR a pu établir avec une précision croissante, allant jusqu'à dix milliardième, que la masse du proton et celle de l'antiproton sont égales.

Effectuer des mesures avec une précision aussi stupéfiante revient à déterminer la position d'un objet sur Terre à quelques millimètres près!

Il s'agit de loin (facteur d'un million) de la comparaison la plus poussée qui ait jamais été faite des propriétés des protons et antiprotons. Selon les théorèmes fondamentaux de la physique, une particule et une antiparticule doivent être exactement égales et

opposées, de sorte que leurs grandeurs scalaires, comme la masse sont identiques, mais que leurs nombres quantiques comme la charge électrique sont de signes opposés.

L'objectif majeur d'ATRAP et d'ATHENA avec la nouvelle machine AD est de synthétiser et d'étudier l'antihydrogène, le plus simple des atomes d'antimatière électriquement neutres, constitué d'un positon en orbite autour d'un unique antiproton.

L'antihydrogène fut produit pour la première fois par l'expérience PS210 au LEAR en 1995. La synthèse d'antimatière atomique était une réussite majeure, mais aucune mesure n'avait été effectuée, car l'antihydrogène était trop chaud et se dissociait rapidement sous la forme de ses constituants, les positons et les antiprotons.

En utilisant des pièges électromagnétiques, ATRAP et ATHENA se proposent de recueillir de l'antihydrogène superfroid puis de le stocker pour une étude plus approfondie. Une comparaison des propriétés de cet antihydrogène et de l'hydrogène dans les mêmes conditions permettra de déterminer avec une bien plus grande rigueur si la matière et l'antimatière ont effectivement un comportement tout à fait identique.

ASACUSA utilise les antiprotons pour des études de collision et d'annihilation, en particulier pour créer des atomes exotiques, dans lesquels l'antiproton chargé négativement est capturé dans un atome-cible, et remplace l'électron des atomes ordinaires.

Le LHC garde la tête froide

Lorsqu'il sera mis en service en 2005, le Grand collisionneur de hadrons du CERN (LHC), qui emploie des milliers d'aimants supraconducteurs fonctionnant à la température de l'hélium superfluide, sera également le plus grand système cryogénique du genre au monde. Le LHC doit fonctionner à 2K afin de créer les champs magnétiques élevés nécessaires pour maintenir les protons sur leur orbite imposée par les limites du tunnel existant de 27 km du CERN. La fourniture de tout cet hélium liquide représente un défi majeur en cryogénie.

Les cellules d'essai de présérie pour la ligne de transport cryogénique (appelée QRL) du LHC ont été testées au Laboratoire début juin. Fabriquées par trois groupes industriels européens, ces cellules d'essai ont été produites suite à la décision de 1995 de construire un système de distribution cryogénique de l'accélérateur extérieur aux cryostats des aimants.

Dans la conception originelle du LHC, son système de distribution cryogénique se trouvait dans le même cryostat que les aimants. Cette configuration a été abandonnée au profit de la solution actuelle, afin de simplifier autant que possible les cryostats du système magnétique, leurs interconnexions et la mise en service du système cryogénique.

Cette solution avait déjà été adoptée avec succès pour le collisionneur HERA au Laboratoire DESY, en Allemagne. Dans le système actuel, huit centrales cryogéniques, réparties sur cinq points d'accès placés autour de l'anneau LHC, alimenteront les aimants supraconducteurs disposés sur les huit secteurs de la ligne QRL dont chacun, d'environ 3,2 km de longueur, fonctionnera de manière autonome.

De l'hélium à différentes températures et différentes pressions sera fourni aux aimants par des modules de service reliant les éléments cryogéniques de l'accélérateur à la QRL tous les 107 m dans les arcs de courbure de l'accélérateur, cette distance correspondant à une cellule LHC de six aimants dipolaires et deux aimants quadripolaires. Ailleurs, les interconnexions se feront à des distances variables.



Une des trois cellules d'essai de 112 m pour la ligne de distribution cryogénique du LHC (QRL). Des caissons de terminaison ferment les interconnexions qui relieront ensuite les modules de la QRL entre eux, et les modules de service qui relieront la QRL aux cryostats des aimants du LHC. On voit ici un module de service à l'une des extrémités de la cellule d'essai.

Chacune des trois cellules d'essai qui sont actuellement mises à l'épreuve au CERN est une section de quelque 112 m de long, dans laquelle deux modules de service sont reliés par un système de conduites composé de plusieurs tuyaux droits. L'infrastructure d'alimentation cryogénique, ainsi qu'un certain nombre de "terminaisons" produites au CERN, complètent le montage d'essais. Deux des terminaisons ferment les interconnexions qui relieront entre elles des modules de la ligne de transport cryogénique finale. Deux autres terminaisons coiffent les modules de service à l'emplacement des connexions aux cryostats des aimants. L'ensemble du montage pour les essais compte de très nombreux instruments pour les mesures thermiques et mécaniques nécessaires à la validation technique du système à construire.

En raison de la taille du LHC – environ 25,6 km de ligne de transport cryogénique, avec quelque 200 km de conduites nécessitant des milliers de soudures et quelque 3300 soufflets plus 1700 vannes de régulation à basse température – les sous-traitants doivent justifier à la fois d'une expérience de l'installation de précision de conduites en acier inoxydable et de compétences en cryogénie.

De plus, le système final ne sera pas seulement très grand et d'une réalisation technique difficile, il

devra également fonctionner 6600 heures par an avec une fiabilité sans faille pendant les 20 ans d'existence prévus pour le LHC.

Les résultats d'une étude de marché réalisée en 1996 ont révélé qu'il existait très peu d'entreprises possédant les compétences nécessaires dans les deux domaines, de sorte que le CERN s'est tourné vers des groupements d'industriels. Sept groupes ont été invités à soumettre une offre en 1997, cinq ont répondu et trois ont été retenus. Il s'agit de Air Liquide pour la France, du groupement allemand Linde-Babcock et d'un groupement plus important dirigé par l'entreprise suisse ABB Alstom Power (les autres entreprises membres sont Nordon, France, Kraftanlagen Nukleartechnik, Messer Griesheim et Alcatel Kabel, Allemagne).

L'équipe chargée de la cryogénie du LHC souligne prudemment que les modules actuellement au CERN sont des cellules d'essai de présérie, et non pas des prototypes. La technologie est connue, le défi consiste à produire de grandes séries d'éléments complexes de ligne de transport cryogénique pour obtenir un système fiable de distribution cryogénique.

La QRL est quatre fois plus longue que le plus grand système actuel et elle exige que la pénétration de chaleur soit la plus faible jamais requise. Dans ces conditions, les contrôles de qualité stricts sont cruciaux. Les trois cellules d'essai présentes au CERN ne servent donc pas à faire la démonstration d'une technologie totalement nouvelle, mais à valider la conception choisie et tester ses performances thermiques et mécaniques avant le lancement de l'appel d'offres final pour la production à grande échelle.

Une concurrence saine est entretenue entre les trois fournisseurs, dont chacun soumettra une offre pour la construction des huit secteurs du système final ou d'une partie seulement. L'attribution de contrats finale est prévue pour l'an prochain. L'installation et la mise en service de la ligne de transport cryogénique, qui précède l'installation des aimants, devrait se dérouler entre mi-2002 et l'été 2004.

Production des premiers faisceaux d'essai pour le LHC

Les expériences en cours de préparation pour le Grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN ont reçu leurs premiers faisceaux en mai, et les résultats préliminaires devraient bientôt être connus. Non, le LHC – qui doit être mis en service en 2005 – n'a pas pris cinq ans d'avance, mais grâce à la production de faisceaux d'essai de type LHC par le synchrotron SPS, le projet d'amélioration de l'ensemble des accélérateurs existants du CERN qui assureront l'alimentation du LHC est en très bonne voie.

L'amélioration était nécessaire car les paquets de particules circulant dans le LHC seront espacés de 25 ns seulement, nettement moins que dans le grand collisionneur électron-positon (LEP). Les phénomènes que les expériences LHC rechercheront sont extrêmement rares et un espacement des paquets de 25 ns seulement leur fournira autant de collisions que possible sans les submerger de données.

L'injecteur a été le premier synchrotron du CERN à être amélioré. Son système radiofréquence a été modifié et son énergie maximum portée de 1 à 1,4 GeV pour fournir la brillance de faisceau élevée requise pour le LHC.

Avec une énergie de faisceau de 26 GeV, le vénérable synchrotron à protons PS constitue le lieu idéal pour regrouper des particules en paquets intenses et courts avant de les envoyer vers les accélérateurs plus grands; pour cela, on utilise de nouvelles cavités radiofréquence. Une cavité fonctionnant à 40 MHz produit des paquets espacés de 25 ns en appliquant un rapide changement de tension.

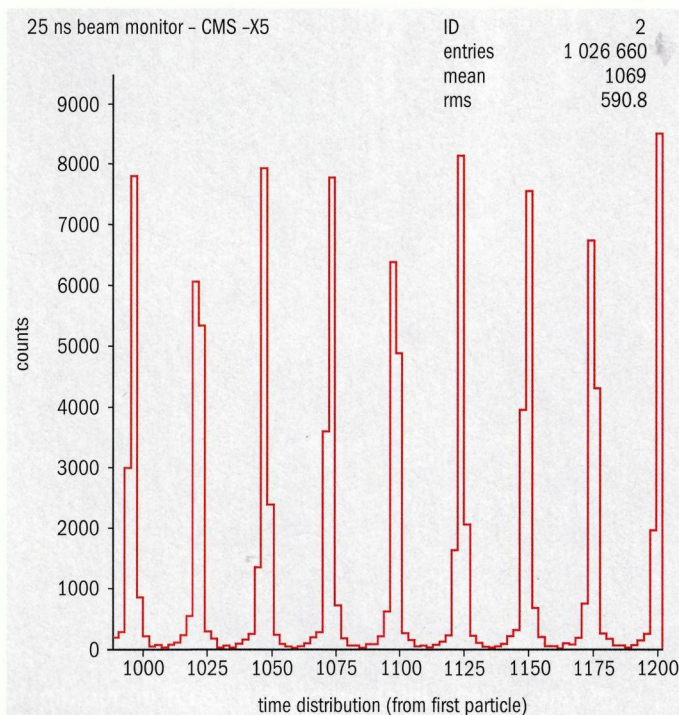
La longueur des paquets se mesure également en nanosecondes – c'est-à-dire le temps mis par un paquet pour passer un point fixe – et ce procédé permet de comprimer les paquets jusqu'à seulement 10 ns. Si chacune des notes de la *Symphonie numéro 5* de Beethoven était aussi courte, le morceau serait terminé en une fraction de seconde. Pourtant, ce temps n'est toujours pas assez court car l'accélérateur suivant dans la chaîne du CERN, le Supersynchrotron à protons (SPS), fonctionne à 200 MHz et non pas à 40 MHz. Cela signifie que les paquets du SPS doivent mesurer au plus 5 ns; des paquets de 10 ns en

provenance du PS seraient trop longs.

Pour résoudre ce problème, de nouvelles cavités supplémentaires fonctionnant à 80 MHz secondent les cavités 40 MHz pour manipuler les particules. Les paquets sont comprimés à moins de 5 ns – soit une durée assez courte pour leur transfert au SPS.

Les nouvelles cavités à 40 et 80 MHz du PS concrétisent l'une des premières entreprises communes menées dans le cadre de la contribution canadienne au LHC. Les éléments essentiels des cavités ont été construits en collaboration avec le laboratoire canadien TRIUMF. Leur installation a commencé en 1996 et le PS était prêt en 1997 à fournir au SPS ses premiers faisceaux de type LHC. Deux années de réglage et d'optimisation ont suivi pour préparer des faisceaux d'essai réalistes pour les expériences LHC.

Le PS a fêté son 40^e anniversaire en 1999 et, pour marquer cette occasion, un faisceau optimisé de type LHC a été accéléré et injecté dans le SPS le 27 octobre. Pour l'équipe du SPS, cette opération a été le signe qu'elle devait se préparer au LHC. Les changements apportés au PS étant adaptés à la configuration existante du SPS, les modifications de cette plus grande machine ont été moins importantes. Vers la fin de l'année, un



La collaboration CMS au collisionneur LHC du CERN a utilisé des scintillateurs à lecture rapide pour mesurer la cadence de 40 MHz (espacement des paquets de 25 ns) du tout nouveau faisceau d'essai du Laboratoire.

faisceau de type LHC avait circulé dans le SPS et avait été extrait vers le tunnel qui conduira les faisceaux jusqu'au LHC. En mai de cette année, le SPS était prêt à produire ses premiers faisceaux d'essai de type LHC pour les expériences.

L'objectif des essais de cette année, menés par les collaborations ATLAS, CMS et LHCb, était de tester les prototypes de l'électronique et des détecteurs dans des conditions LHC réalistes – étape exigée par le Comité LHC. La collaboration ALICE, pour laquelle les paquets d'ions plomb se croiseront à la cadence relativement modérée d'une fois toutes les 125 ns, n'a pas utilisé le nouveau faisceau d'essai.

ATLAS a mis à l'épreuve ses systèmes de trajectographie à semiconducteurs (SCT) et à pixels, ainsi qu'à rayonnement de transition (TRT). CMS a testé son trajectographe au silicium et son système de chambres à plaques résistives (RPC) de déclenchement sur les

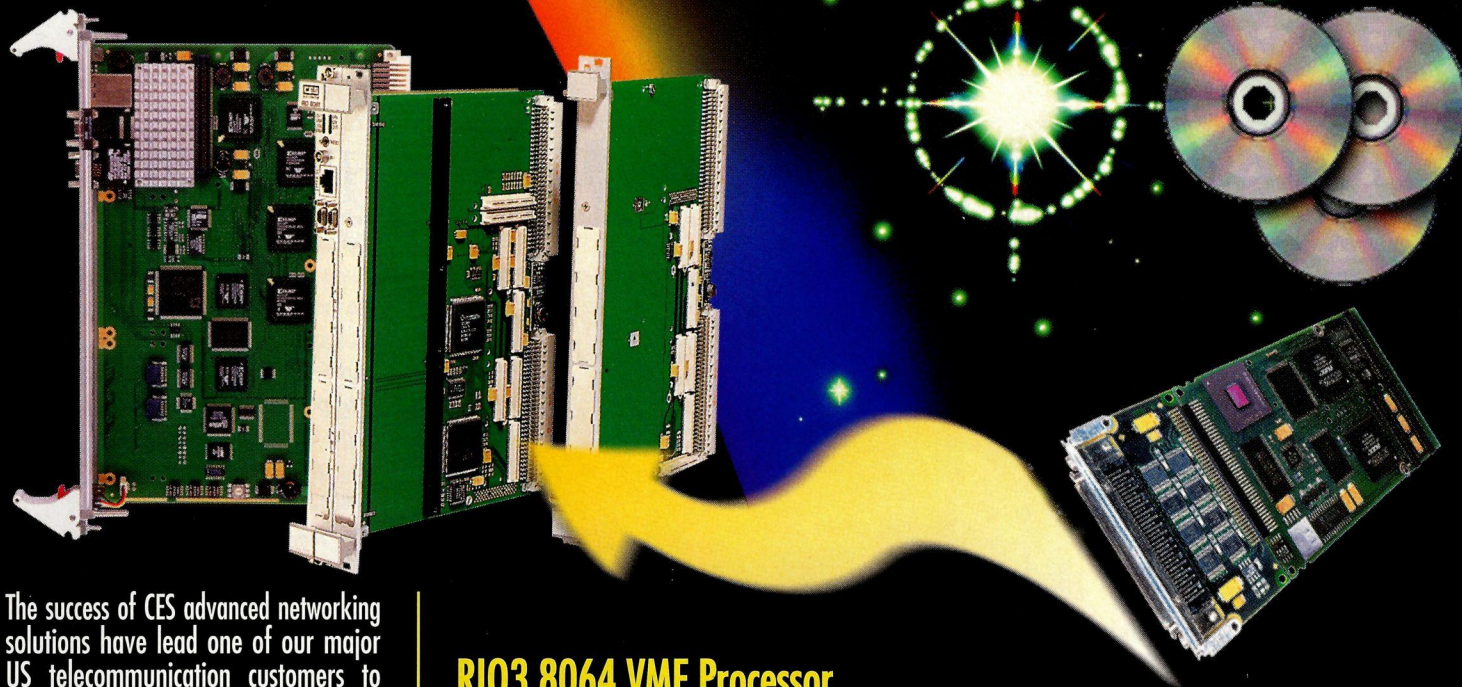
muons. L'expérience LHCb a essayé son système rapide (40 MHz) frontal de lecture électronique, subordonné à la réponse de son calorimètre.

Les expériences ont toutes trois obtenu des résultats préliminaires encourageants. Le groupe ATLAS SCT, par exemple, a utilisé les essais pour étudier le rendement de son électronique pour associer les impacts dans le détecteur avec le paquet adéquat, et vérifier la capacité du système à suivre simultanément les impacts de plusieurs paquets dans le pipeline électronique.

CMS a saisi l'occasion pour tester un prototype de module de trajectographe au silicium équipé d'une chaîne de lecture électronique complète. Les résultats ont montré que le détecteur et son électronique sont aptes à fonctionner en respectant les rigoureuses contraintes temporelles qu'impose la fréquence de croisement des faisceaux de 40 MHz du LHC. Le système du LHCb a également montré qu'il était capable de faire une distinction nette entre des paquets consécutifs.

D'autres périodes d'exploitation de faisceaux d'essai de type LHC sont prévues pour les années à venir, avec pour objectif de tester ensemble le système électronique final et plusieurs prototypes de sous-détecteurs.

A Strong Entry into the Information Control Millenium: a new generation of computing elements backed by a LINUX development environment



The success of CES advanced networking solutions have lead one of our major US telecommunication customers to approach us to build a group dedicated to information control in real-time.

CES is the European branch of this holding company, I-Touch. The other branch is located in Boston, MA.

CES base activities in Geneva will rapidly expand in the fields of Physics and Aerospace, with multiple physicists and real-time engineers joining us over the next few months.

CES will also develop new information routing and control equipment, focused on high-throughput, using techniques acquired from these areas.

CES Creative Electronic Systems S.A.
70 route du Pont-Butin
CH-1213 Petit-Lancy, Switzerland
Internet: <http://www.ces.ch>

CES Switzerland
Tel: +41.22.879.51.00
Fax: +41.22.792.57.48
Email: ces@ces.ch

CES.D Germany
Tel: +49.60.51.96.97.41
Fax: +49.60.51.96.97.38
Email: norbert.loerch@ces.ch

CES USA
Tel: +1.518.843.9114
Fax: +1.518.843.1447
Email: +traxonic@superior.net

RI03 8064 VME Processor

The Ultimate VME Machine

The RI03 features a unique ultra-efficient inter-processor communication mechanism for ultra-high-speed data acquisitions.

Sheer Speed:

- VME Block transfers in 2eSST at 300 MBytes/s, single cycles at 20 MBytes/s
- Memory 400 MBytes/s average
800 MBytes/s peak
- Multi-access VME + PCI 1 + PCI 2 + CPU without global degradation

CPU Power: PowerPC 750 or 7400 at maximum available speed

Flexible: 2 independent 64-bit PCI with simultaneous access to the memory

Scalable: Up to 4 additional PMCs on a PMC carrier system

Easy to Use: Function compatible with the RI02

MFCC 844x PMC Processors

A unique combination of user-dedicated ultra-high-speed FPGA and a full PowerPC computing core in a PMC form factor.

- 130 KGates user-FPGA
- Continuous acquisition at 50 MBytes/s in 32 or 64-bit mode
- Full 750 computing core
- Full PCI master interface with block transfers
- Advanced event signalling logic for ultra-fast MFCC / RI03 handshake
- Full network services on PCI
- Complete multi-processing software with connection oriented high-speed data transfers

Software Support

VxWorks®, LynxOS®, BlueCat® and LINUX® development software including support for hard real-time target machines.

