

Les chocs du futur

induction (MBE-4) pour faire la preuve expérimentale de l'amplification du courant avec quatre faisceaux d'ions césium.

Le FMIT, un dispositif d'essai d'irradiation de matériaux fusibles, se rattache également à la technologie des réacteurs de fusion; un accélérateur de deutons de 35 MeV sert à produire après épluchage des flux intenses de neutrons de la même énergie que les neutrons produits dans la réaction de fusion. Ces faisceaux de neutrons serviront à étudier la tenue de matériaux soumis à un bombardement comparable à celui qu'ils subiront dans un réacteur de fusion. Plusieurs exposés traitaient des progrès effectués dans l'élaboration des machines (par exemple, exploitation réussie à Los Alamos de quadrupôles radiofréquence (QRF) appropriés pour l'injection dans le FMIT; il est étonnant de constater que le QRF a balayé tous les autres systèmes d'injection dans les accélérateurs en l'espace de deux ans seulement).

Ce compte rendu de la Conférence sur les accélérateurs à Vancouver peut donner un aperçu de l'étendue et de la densité des recherches actuelles sur la physique et la technologie des accélérateurs.

Brian Southworth

Le 10 juillet 1981, Carlo Rubbia surgissait à la Conférence de physique des particules de Lisbonne en brandissant les premiers enregistrements de collisions matière-antimatière de haute énergie dans l'anneau SPS du CERN. Sa déclaration, couronnement de nombreuses années de préparatifs intenses et soignés, fut accueillie par des applaudissements spontanés.

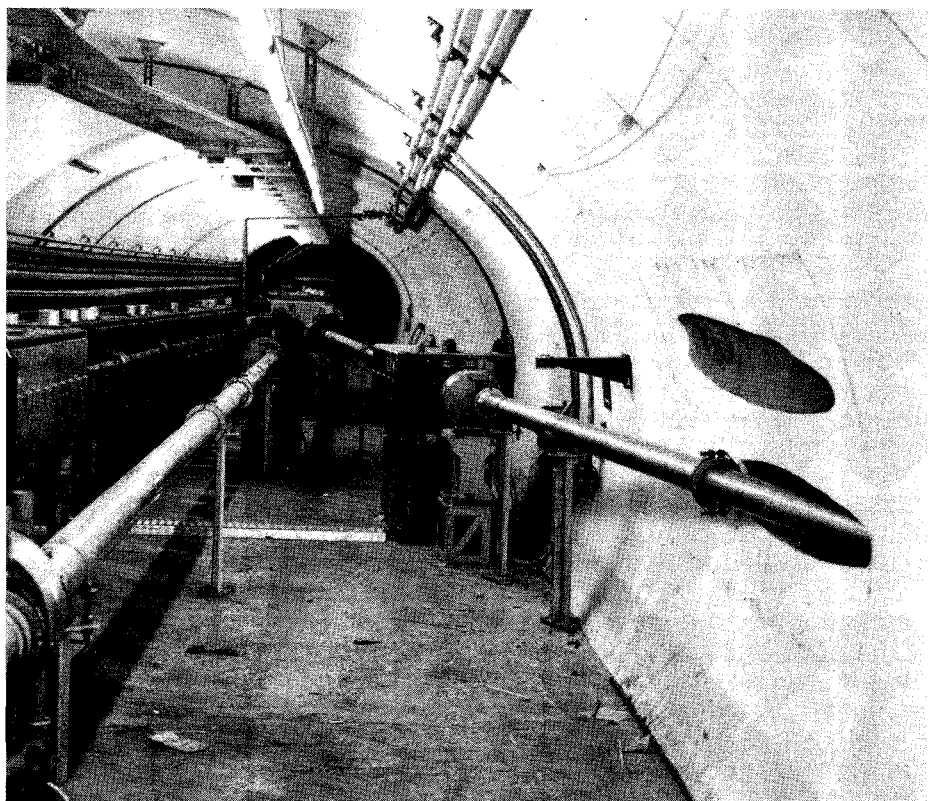
Plus de trois ans plus tard, les performances du collisionneur SPS ont été plus que centuplées, mais les applaudissements sont retombés. L'accumulation d'antimatière maintenant maîtrisée et presque routinière, Lyndon Evans et Vincent Hatton passent en revue les succès déjà obtenus et les leçons apprises.

Entre 1981 et 1984, la luminosité (une mesure du taux instantané de collisions proton-antiproton) de pointe du collisionneur a été augmentée de près de deux ordres de

grandeur, passant de 5×10^{27} par cm^2 par s à $3,5 \times 10^{29} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Plus important, la moyenne journalière du nombre de collisions (ou la luminosité intégrée sur une journée) s'est accrue de plus d'un ordre de grandeur.

Du fait de la rareté des antiprotons, la fiabilité de l'ensemble de la chaîne d'injection revêt une importance cruciale. Le SPS même est particulièrement exposé aux défaillances du fait de sa grande taille et du volume de services prioritaires demandés.

A la suite de l'enregistrement des premières collisions proton-antiproton au cours de l'été de 1981, la première période d'expérimentation s'est déroulée à la fin de cette même année, fournissant une luminosité intégrée de 2×10^{32} par cm^2 ($0,2 \text{ nb}^{-1}$). Au cours de la seconde session, à la fin de 1982, la luminosité de crête s'élevait à $5 \times 10^{28} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ et cette seconde période produisait une luminosité intégrée de 28 nb^{-1} ,



A droite, la ligne d'alimentation du SPS du CERN en antiprotons provenant du PS émerge du mur du tunnel. On voit sur la gauche les lignes des protons provenant de l'anneau principal du SPS.

(Photo CERN 38.4.81)

La salle de commande: centre nerveux de l'exploitation du SPS.

(Photo CERN 169.6.83)



suffisante pour révéler la particule W attendue de longue date. Au printemps de 1983, la luminosité de pointe atteignait $1,7 \times 10^{29} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ et la luminosité totale produite dans chacune des expériences s'élevait à 153 nb^{-1} . Enfin, dans la dernière grande période d'expérimentation (fin 1984), la luminosité de crête était encore améliorée: $3,5 \times 10^{29} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ et chaque expérience recevait au total 395 nb^{-1} .

Au cours de ces périodes, les faisceaux stockés orbitaient à énergie constante, fournissant d'abord 540 GeV par collision puis 630 GeV en 1984. Cette année (voir numéro de mai, page 131), l'emploi d'une nouvelle technique a permis d'atteindre 900 GeV pendant de courts paliers.

L'amélioration continue des performances du collisionneur reflète l'acquisition progressive de la maîtrise d'une chaîne compliquée d'accélérateurs. Pour obtenir une luminosité initiale supérieure à

$10^{29} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, il est nécessaire d'amasser des antiprotons dans l'accumulateur d'antiprotons (AA) pendant trois jours au moins avant le premier transfert au SPS. Ensuite, une fois établie la réserve initiale d'antiprotons, on atteint un équilibre sur le rythme d'un transfert au SPS de 30% de ce stock réparti en trois paquets. Pour autant que le SPS puisse conserver les faisceaux une vingtaine d'heures, l'AA dispose d'une durée suffisante pour compléter sa réserve d'antiprotons en vue du transfert suivant.

L'emploi de programmes informatiques améliore la sécurité du transfert; au coeur du système, on trouve un processeur évolué appelé le "séquenceur". Il commande l'exécution d'une série complexe d'opérations nécessaires pour préparer le SPS et ses lignes de transfert, ainsi que pour injecter les antiprotons. Il peut, jusqu'au tout dernier moment, bloquer le transfert si une faute

est détectée. Une commande logique aussi complexe rappelle davantage le lancement d'une fusée que l'exploitation d'un accélérateur.

Au cours des trois premières années d'exploitation, il a été possible de maintenir chaque cycle à un niveau intéressant de luminosité pendant une quinzaine d'heures, limitation due principalement à la "durée de vie" du faisceau d'antiprotons. Cette valeur convient bien à la cadence d'un transfert d'antiprotons par jour. Si le cycle est terminé intentionnellement, on prépare le SPS aussi rapidement que possible pour l'injection suivante. En général, trois ou quatre heures sont nécessaires pour compléter le processus: accorder la machine, vérifier les lignes de faisceau à l'aide de protons, injecter des giclées-pilotes d'antiprotons, etc. Toutefois, ainsi qu'on le verra plus loin, un tiers au moins des cycles se termine prématurément; dans ce cas,

Erwin Gabathuler (second depuis la gauche), alors directeur de la recherche au CERN, avait promis une caisse de champagne si l'on parvenait, au cours de la période de 1982, à décupler la luminosité maximale des collisions proton-antiproton obtenue au cours de l'exploitation initiale du SPS en 1981. André Faugier, Lyndon Evans (co-auteur de cet article), Jacques Gareyte et Robin Lauckner (de gauche à droite) apprécient avec lui son offre généreuse. La luminosité a été depuis considérablement augmentée et le champagne a coulé de temps à autre.



Gros comme une maison

La luminosité intégrée mesure le nombre total de collisions sur une durée donnée. Pour la calculer, on imagine une surface dont l'antiproton est le centre et on détermine le nombre de fois qu'un proton traverse cette surface. Le nanobarn, communément utilisé en physique des particules, ne représente qu'une petite surface de 10^{-33} cm^2 .

Le barn (10^{-24} cm^2) est la surface que présente un gros noyau-cible, l'uranium par exemple et, même aux débuts de la physique nucléaire, frapper ces noyaux géants était aussi facile qu'atteindre une grange. D'où l'anglais "barn" qui signifie "grange".

il est souvent inopportun d'effectuer rapidement les préparatifs pour un nouveau remplissage du SPS, car il faut plus de temps pour refaire le plein d'antiprotons dans l'accumulateur.

On constate également une augmentation progressive de la fraction du temps disponible pour l'expérimentation dans le total des heures d'exploitation programmées. Outre la fourniture des faisceaux aux expériences, quatre tâches sont de grosses consommatrices de temps de machine: les préparatifs pour les stockages, les études de la machine, l'accès dans l'anneau (essentiellement aux expériences) et enfin le diagnostic des fautes et la réparation des équipements.

Les équipes d'expérimentateurs jugent de l'efficacité du collisionneur d'après le produit de la luminosité instantanée par la durée du régime de collision de faisceaux; le vrai facteur de mérite est l'intégrale de la luminosité ainsi obtenue.

Sa croissance d'un facteur 2,6 entre 1983 et 1984 revêt une plus grande signification que celle du cycle utile, qui est passé de 43 à 50%.

Dans les premières phases d'une expérience, une forte luminosité ne présente pas un intérêt particulier; ce qui compte, c'est la durée totale en régime collisionneur. C'est également le cas au début d'une nouvelle période d'expérimentation et, par ailleurs, les physiciens demandent également des périodes d'étalonnage à faible luminosité. Toutefois, sur l'ensemble d'une année, la durée requise pour l'étalonnage et pour le rodage des expériences reste faible (moins de 10% du temps total programmé).

La durée moyenne de la préparation des remplissages est proche de six heures, ce qui ne reflète pas une inefficacité dans la préparation de la machine mais dépend surtout du nombre d'antiprotons disponibles dans l'accumulateur.

L'interruption entre cycles est particulièrement longue lorsque la perte des faisceaux stockés provient d'une défaillance technique.

Dans la mesure du possible, les demandes d'accès sont groupées et programmées par avance, car ces rares occasions doivent être utilisées de façon optimale. Au cours d'une période d'accès de quatre heures, il n'est pas rare de voir 30 personnes pénétrer dans la zone UA1. Des périodes d'accès plus courtes, entre les cycles, sont également possibles.

Les entrées pour réparation de l'accélérateur sont combinées aux accès aux expériences. Les essais et les améliorations des alimentations ont été en grande partie effectués au cours des périodes d'accès aux zones d'expériences.

Les études de la machine exigent l'observation des faisceaux sous diverses conditions. Outre les observations relatives aux conditions de l'arrêt de la machine à la fin des cycles d'expérimentation, il

Les fluctuations de la tension sur la ligne aérienne principale à 380 kV – particulièrement vulnérable au cours des orages de l'été – constituent la source importante de perturbations extérieures.

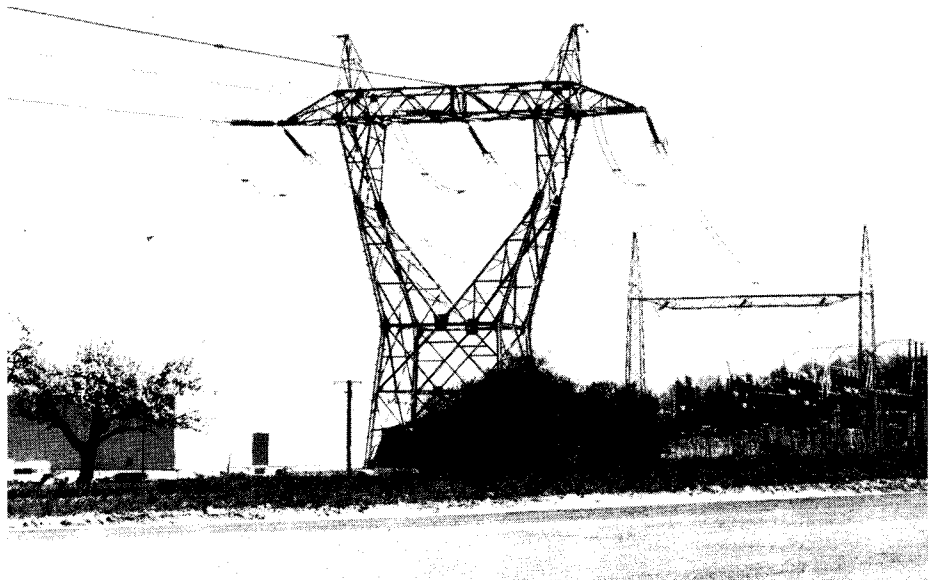
(Photo CERN 126.5.75)

faut réserver du temps pour les analyses du fonctionnement avec protons seuls et pour les collisions avec des faisceaux pilotes (faible intensité) d'antiprotons. Ces deux façons d'employer du temps programmé d'accélérateur sont nécessaires à une exploitation efficace et à la mise au point de l'accélérateur et des expériences et ne doivent pas être considérées comme contreproductives.

Pendant les treize semaines d'expérimentation de 1984, 25 des 77 cycles se sont achevés prématurément sur défaillance technique; les autres ont duré 17 heures en moyenne. En 1984, le record a été de 31 heures, le record absolu restant de 42 heures. Lorsqu'un cycle dépasse une durée de sept heures, il a toutes les chances d'atteindre la fin de sa vie utile et d'être "achevé" volontairement par l'équipe d'exploitation.

Le cycle cesse d'être intéressant pour l'expérimentation lorsque la luminosité se trouve fortement réduite. En général, en 1983 et 1984, la vie utile des faisceaux a été inférieure à 20 heures, les valeurs typiques se situaient entre 13 et 15 heures. Bien sûr, la décision d'interrompre dépend de la disponibilité de nouveaux faisceaux de remplissage. Si la fourniture de protons ou d'antiprotons présentait des difficultés, les faisceaux étaient gardés plus longtemps, ce qui explique des stockages exceptionnellement longs. A la fin d'une séance d'expérimentation, les faisceaux étaient souvent conservés pendant deux heures pour des études de la machine.

La tendance était d'adopter le rythme préféré d'un remplissage toutes les 24 heures: il est plus efficace de tenter de résoudre les problèmes durant les heures normales de travail du laboratoire. Or les équipements utilisés au cours des processus de transfert, d'injection et d'accélération ne peuvent être testés dans le mode collisionneur.



L'augmentation de la vie utile des faisceaux, de 20 à environ 26 heures, et l'amélioration de la fiabilité des équipements ont entraîné l'abandon de la périodicité de 24 heures au profit d'un stockage plus long produisant une plus grande luminosité intégrée.

Défaillances

En 1983 et 1984, la plupart des arrêts techniques provenaient de défaillances aléatoires en général mineures et indépendantes. Pendant l'exploitation du SPS avec cible fixe (53% des heures d'exploitation programmées pour l'expérimentation), on procède à l'analyse et à la réparation des défaillances en gardant à l'esprit les conditions plus sévères de l'exploitation en mode collisionneur.

Les chutes de tension du secteur (alimenté directement depuis la source hydroélectrique de Génissiat, à 50 km du CERN, par une

ligne aérienne) ont été responsables d'environ 30% des défaillances techniques en 1982 et 1983. Vers la fin de la période d'expérimentation de 1983 et pendant celle de 1984, le système a été durci pour tolérer, sans interruption de l'alimentation, des chutes de tension atteignant 25% sur l'une quelconque des trois phases. Le SPS n'est jamais utilisé en collisionneur au cours de l'été. Les orages sont courants le soir, en juillet et en août, et produisent de sérieuses perturbations, même pour l'exploitation avec cible fixe.

L'une des améliorations effectuées en 1984 en vue de porter l'énergie des faisceaux stockés de 273 à 315 GeV a été l'installation de pompes de surpression dans tous les sextants de la machine. Cette amélioration, bien que fructueuse, a coûté la perte de deux stockages. Le diagnostic et l'élimination efficace d'un défaut peuvent être gênés par des erreurs humaines, du fait d'un manque de

familiarité, quand de nouvelles conditions d'exploitation sont adoptées. Il s'agit d'un dilemme constant car il faut comparer les nécessités d'une exploitation fiable aux exigences d'amélioration des conditions de fonctionnement.

Il faut prendre bien soin de fabriquer tous les aimants qui agissent sur les faisceaux primaires aux mêmes spécifications sévères que celles imposées aux éléments de l'accélérateur. Quelques stockages ont été perdus parce que des aimants des détecteurs n'ont pas produit la réponse correcte (parfois l'équilibre nécessaire entre un aimant et ses aimants de compensation n'a pas été respecté).

Qualité du faisceau

L'exploitation du SPS en mode collisionneur est limitée par la disponibilité des antiprotons. Le degré de fiabilité nécessaire pour les équipements est plus élevé et la perte des faisceaux stockés est plus sérieuse que dans le cas d'un collisionneur proton-proton.

Mais tous les collisionneurs doivent fournir des conditions stables, avec des bruits de fond faibles, sur de longues durées. C'est ce que l'on entend par "qualité du faisceau".

De bons moyens de diagnostic sont nécessaires à un bon fonctionnement. Dans le cas du collisionneur, la mesure des paramètres du faisceau et la confiance dans ces mesures revêtent une importance capitale. En fait, l'amélioration des performances est allée de pair avec la mise au point de meilleurs moyens de diagnostic. L'incertitude qu'entraîne une mesure douteuse peut gêner une recherche de défaut et empêcher de parvenir au diagnostic logique. Par exemple, sans mesure fiable, il n'est pas possible de découvrir que l'existence d'un bruit de fond élevé peut provenir du déplacement de

l'orbite fermée produit par la dérive d'un aimant ou de distinguer cette cause d'un problème dans le système de rabotage du faisceau.

Ainsi, un problème de bruit de fond élevé fut remonté jusqu'à sa source: un potentiomètre linéaire commandant la position d'un bloc collimateur. Après identification du problème, la solution fut rapide, mais de nombreuses heures avaient été passées à suivre de fausses pistes.

Il est important pour parvenir à une meilleure qualité de faisceau de disposer d'un système de commande permettant une exploitation souple. Les idées nouvelles et les sources de difficultés reconnues depuis peu doivent être prises en compte par le logiciel, de manière à réduire l'intervention humaine. Il faut s'en souvenir et, dès qu'une manière de procéder devient routinière, on doit l'incorporer dans le logiciel.

Il est important de disposer de bonnes bases de données, non seulement pour les paramètres des équipements, mais également pour les caractéristiques des faisceaux, si l'on veut obtenir une bonne qualité des faisceaux et du diagnostic. La possibilité d'étudier l'évolution d'un paramètre sur un certain nombre de "tirs" est très importante et favorise une vue plus large des problèmes.

Comme pour tout autre anneau de stockage, l'exploitation du SPS en collisionneur proton-antiproton impose des exigences très sévères de fiabilité de l'équipement. En particulier, la rareté des antiprotons exclut un remplissage rapide à la suite de défaillances de l'équipement et amplifie l'importance de ces défaillances sur la productivité d'ensemble.

Le collisionneur est spécialement vulnérable aux fluctuations des services de base. Les perturbations les plus importantes, et hors du contrôle de l'équipe du SPS, sont celles du secteur, c'est-à-dire des fluctuations de la ten-

sion d'alimentation à 380 kV. Ce problème est aggravé par le fait que l'alimentation électrique du CERN est assurée par une ligne aérienne exposée aux intempéries, ce qui exclut l'exploitation en mode collisionneur pendant la période des orages (presque tout l'été).

La durée moyenne de 5,9 heures nécessaire pour les préparatifs de remplissage dépend avant tout de la quantité d'antiprotons disponible dans l'accumulateur. Néanmoins, l'obtention de la meilleure qualité possible pour les faisceaux, l'efficacité du transfert, l'émission, etc. exigent une mise au point soignée, systématique, pour chaque remplissage, lequel demande au moins deux ou trois heures.

Bien que l'amélioration des performances déjà obtenues au collisionneur SPS soit impressionnante, l'ingéniosité et l'imagination des équipes d'exploitation sont loin d'être épuisées. Nous pouvons garder l'espoir de voir les antiprotons franchir de nombreux caps dans les années à venir.