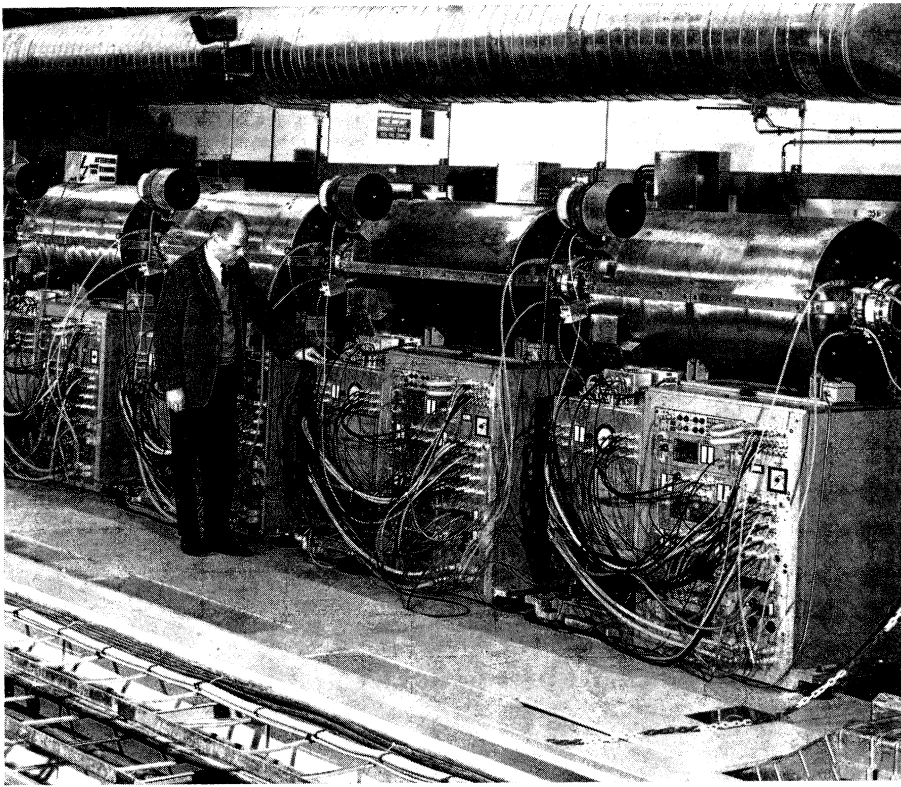


Les CPM au CERN



CERNPI 2.4.70

N° 1, s'est achevé à la fin de février et on procède actuellement à des essais.

Les cavités sont alimentées par une tension HF variable de 12 volts à 3,3 kV; leur fréquence est ajustable en fonction de l'énergie d'injection, de 9,25 à 9,55 MHz, ce qui correspond à une plage d'énergie de 3 à 28 GeV pour les protons injectés. Ces cavités fonctionnent en quart d'onde; étant donné la fréquence accélératrice leur longueur, qui devrait être de 7,5 m a pu être réduite à 1,86 m en plaçant sur chaque cavité une capacité fixe de 1000 pF.

Pour faire varier la fréquence de résonance, on utilise une capacité variable (de 10 à 110 pF, qui s'ajoute à la capacité fixe). Ce système d'accord des cavités est possible en raison de la faible étendue de la plage de fréquence (3%). (Dans le PS, ou dans l'élanneur, par exemple, la plage de variations de fréquence étant beaucoup plus importante, on a utilisé des ferrites dont la perméabilité, et par là la fréquence de résonance des cavités, peut varier largement en fonction de l'intensité du courant de polarisation). Le refroidissement des cavités des ISR se fait principalement par eau; il est complété par une circulation d'air.

Les amplificateurs de puissance, dont l'élément principal est une tétrode refroidie par eau, sont logés dans l'embase des cavités; ils peuvent en être extraits au moyen d'élévateurs télécommandés, ce qui réduit le temps de manutention. Pour l'accélération, il est prévu d'utiliser un système d'accrochage de phase analogue à celui du PS mais compliqué du fait qu'une sélection doit être faite entre le faisceau de protons dégroupé déjà stocké dans la machine, et les paquets qui viennent d'être injectés et qui restent groupés sous l'influence de la HF.

La compensation de la charge due au faisceau est l'une des principales diffi-

cultés. Elle est assurée à partir d'un signal dérivé de l'intensité du faisceau, combiné à un servo-mécanisme à large bande de fréquence HF, ce qui réduit l'impédance présentée par un ensemble amplificateur-cavité à moins de 10 ohms.

Les essais des cavités doivent être terminés pour août 1970.

L'alimentation et une partie des commandes des cavités accélératrices seront regroupées dans deux des huit bâtiments auxiliaires placés au centre des anneaux et distants de 150 m du tunnel, la commande de l'ensemble se faisant à partir de la salle de commande principale des ISR.

Sept cavités sont disposées sur chaque anneau (un groupe de 3 et un groupe de 4). Six assurent l'accélération et la septième est en réserve. Des essais sur les cavités sont en cours depuis février; ils doivent s'achever au milieu de 1970.

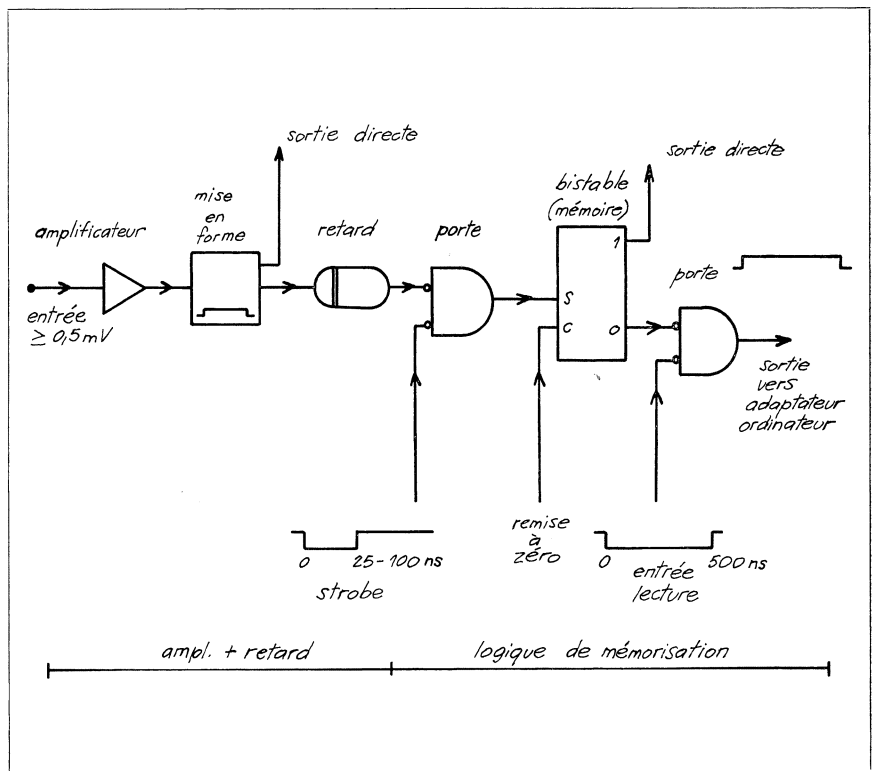
L'histoire des progrès de la physique des particules est éminemment liée à celle des détecteurs de particules. Aussitôt qu'un détecteur nouveau est inventé, des observations ou des mesures jusque-là inabordables deviennent possibles, et il s'ensuit un passage rapide du prototype de table aux systèmes géants permettant d'exploiter pleinement toutes les possibilités du détecteur. Il en a été ainsi pour les chambres à bulles et les chambres à étincelles. Les chambres proportionnelles multifils semblent suivre une progression semblable puisque, parti de quelques dizaines de fils en 1968, on prépare aujourd'hui pour des expériences des chambres de près de 10 000 fils tandis que des chambres à plus de 100 000 fils sont envisagées pour un avenir pas très lointain. C'est un domaine où le CERN a joué un rôle important puisque, pionnier de cette technique, il a pu y garder un rôle d'avant garde.

Nous nous proposons ici de suivre l'évolution des chambres à fils proportionnelles au CERN. Il peut être bon auparavant d'en rappeler le principe ainsi que les avantages et les inconvénients par rapport aux autres instruments de détection électronique.

L'ancêtre de la chambre à fils proportionnelle est le compteur proportionnel utilisé depuis 1936, et qui n'a que très peu évolué entre cette date et 1968. Il consiste en un cylindre métallique rempli de gaz, traversé axialement par un fil métallique placé à un potentiel positif de quelques milliers de volts par rapport au cylindre. Lorsqu'une particule ionisante traverse le gaz, elle y produit des ions positifs et des électrons. Les électrons sont attirés par le fil, et dans les derniers microns de leur course, l'accélération devient telle qu'on assiste à une avalanche qui conduit à recueillir sur le fil une impulsion de quelques mV. Si la tension appliquée est comprise entre certaines valeurs (de l'ordre de quelques milliers de volts), ce courant est proportionnel à l'ionisation produite, indépendamment de la distance du fil. En amplifiant ce courant, on peut non seulement détecter une particule, mais aussi mesurer son pouvoir ionisant. Le défaut majeur du compteur proportionnel, qui le fit en grande partie abandonner au profit du compteur à scintillation, est son temps de résolution élevé proche de 1 μ s.

Dès 1943, on réalisa néanmoins pour des applications spéciales des compteurs proportionnels multifils plans offrant une plus grande surface de détection: entre

Schéma simplifié d'un circuit amplification-mémorisation pour un seul fil de CPM.
L'impulsion provenant de la gauche est amplifiée d'un facteur 1000 environ, puis mise en forme, puis retardée pour permettre de prendre une décision (fonction des indications d'un circuit de coïncidence éventuellement combinées au signal de sortie directe) en vue de sa mémorisation. Si la décision est positive une porte s'ouvre alors pour laisser passer l'information en vue de sa mise en mémoire dans le bistable; on voit donc que cette unité effectue déjà un prétraitement de l'information. Le transfert de l'information du bistable vers l'adaptateur de l'ordinateur se fait séquentiellement par groupe de fils (32 ou sous-multiples de 32). Il est commandé par un signal d'ouverture de porte venant de l'ordinateur dont le déclenchement peut dans certains cas être influencé par une seconde décision plus complexe concernant la validité de l'événement.



deux électrodes planes étaient tendus des fils parallèles à un potentiel successivement positif et négatif (celui des électrodes). On pensait en faisant alterner le voltage empêcher le couplage capacitif entre deux fils de même potentiel. Pour un intervalle entre fils détecteurs de 3 mm, on obtenait une résolution spatiale de 6 mm incapable de concurrencer celle des chambres à étincelles d'où les applications limitées à ce compteur (qui, du reste, avaient, comme corollaire de l'importante résolution spatiale, une résolution en temps médiocre).

En 1968, G. Charpak et son groupe du CERN partant d'une constatation simple, découvraient l'inutilité de faire alterner les potentiels des fils. Car, si l'impulsion principale est négative, on recueille sur les fils voisins des impulsions positives plus faibles (voir COURRIER CERN vol. 9, page 174). Il suffisait donc de placer sur chaque fil un filtrage éliminant les impulsions positives pour localiser le fil touché par l'avalanche électronique. La résolution spatiale devenait meilleure (d'un facteur 2) et arrivait presque au niveau de celle de la chambre à étincelles. En effet, tous les fils d'un plan étant au même potentiel, il était plus facile de les placer très près l'un de l'autre. On pouvait donc envisager de construire des détecteurs utilisant ce principe, détecteurs qui virent le jour au CERN en 1968 et qui prirent le nom de chambres proportionnelles multi-fils.

Comment se situent ces chambres par rapport aux chambres à fils à étincelles ?

• Tout d'abord, elles offrent une série d'avantages:

1) Il n'est pas nécessaire de les puiser contrairement aux chambres à étincelles; la tension reste appliquée en permanence, et comme le passage d'une particule ne produit pas de baisse appréciable

de tension, on peut détecter simultanément un nombre de particules qui n'est limité que par celui des fils;

2) Le temps mort, nul pour 2 impulsions touchant deux fils différents, est inférieur à 100 ns pour un même fil (il n'est en fait conditionné que par l'électronique). On est arrivé à des taux de comptage par fil extraordinairement élevés par rapport aux chambres à étincelles (de l'ordre de quelques MHz), et c'est un avantage sérieux car il va dans le sens de l'évolution des accélérateurs qui fournissent des intensités toujours plus grandes. En outre, on peut, en multipliant les événements enregistrés, augmenter considérablement la précision statistique des expériences, ce que réclame notamment la vérification de certaines théories;

3) L'avantage essentiel des CPM réside dans leur temps de résolution, soit la fluctuation temporelle maximale qui s'écoule entre le passage d'une particule et son enregistrement. Elle est directement liée à la distance fil-trace et par là à l'entreuil: pour 2 mm d'entreuil, on a un temps de 24 ns; pour 3 mm, un temps de 36 ns. Il s'agit d'un gain de 10 à 30 par rapport aux chambres à étincelles, qui va également dans le sens de l'évolution des accélérateurs;

4) La chambre proportionnelle est pratiquement insensible au champ magnétique, ce qui constitue son deuxième gros avantage puisque pour nombre d'expériences, il est nécessaire de placer les chambres dans un champ élevé. (Toutefois diverses techniques devant permettre d'utiliser les chambres à étincelles dans des champs magnétiques intenses sont l'objet d'activités recherches et en particulier la méthode de stockage capacitif proposé par le physicien Quercigh);

5) L'efficacité de la détection est comprise entre 99,5 et 99,9% pour un nombre quelconque de particules; ces chambres

se prêtent ainsi à l'analyse de certains événements complexes, qui étaient jusqu'à présent l'apanage des chambres optiques;

6) La chambre à fils est capable de mesures d'ionisation d'une précision moindre que le compteur proportionnel, mais suffisante pour pouvoir séparer des particules d'énergies nettement différentes;

7) Enfin, ni l'efficacité ni la résolution spatiale ne sont affectées par l'angle d'incidence des particules, contrairement à ce qui se passe dans les chambres à étincelles.

• Les deux points où la comparaison est défavorable sont la résolution spatiale et le prix.

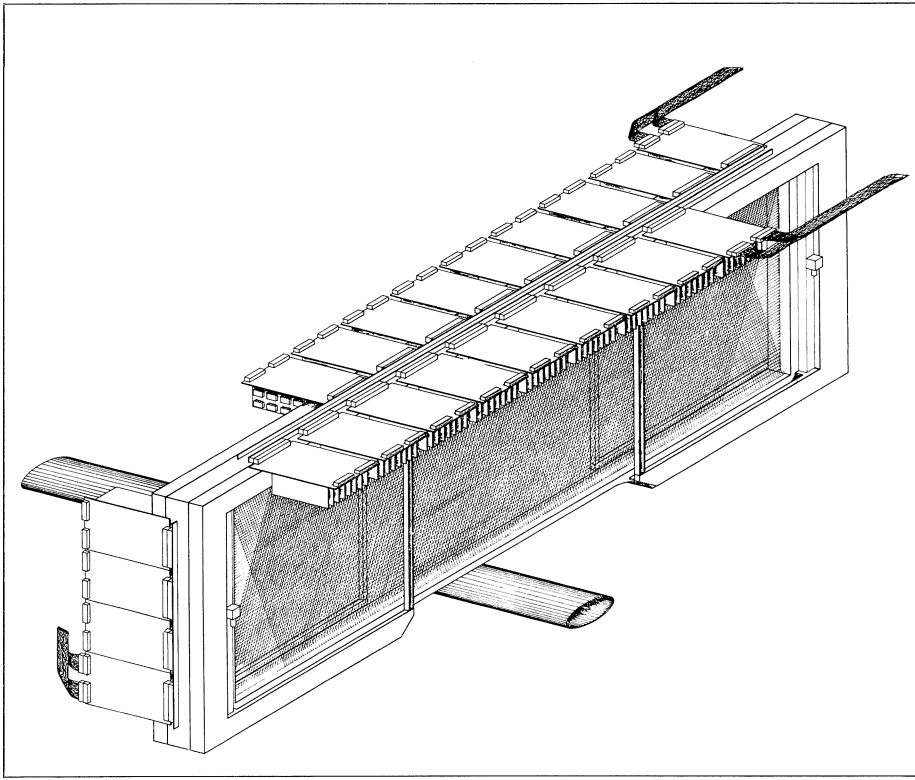
La résolution spatiale est fonction de l'entreuil; on atteint actuellement sur des grandes chambres en fonctionnement une résolution de $\pm 0,6$ mm, ce qui reste deux fois plus élevé que les meilleures chambres à étincelles à fils, mais le dernier mot n'est pas dit en la matière puisque, par exemple, sur de petites chambres on est arrivé à une résolution de $\pm 0,3$ mm.

Un inconvénient qui s'amenuise

L'inconvénient majeur des CPM réside dans la nécessité d'amplifier et de traiter les signaux indépendamment pour chaque fil, ce qui se traduit par un prix qui, tout en étant faible pour un fil (de l'ordre de 60 francs suisses actuellement), devient élevé lorsqu'on veut des chambres à très grand nombre de fils...

Mais l'électronique est un domaine à évolution très rapide, et, comme on le verra plus loin, des perspectives d'abaissement des prix s'offrent à court terme avec l'emploi des circuits intégrés à moyenne ou grande échelle.

Toutefois, il est bon de distinguer l'amplification de la mémorisation. Pour cette dernière, les prix sont directement conditionnés par l'évolution de l'électronique. Même s'ils restent substantiels, ils pour-



Dessin d'un élément de chambre proportionnelle multifils (de 150 x 50 cm) à 3 plans détecteurs destiné à prendre place à l'intérieur de l'aimant à champ fractionné de la zone d'expérience 14 des ISR (voir également en page 148 de ce numéro). L'entrefer est de 2 mm. Pour exploiter au mieux le volume utile de l'entrefer, on doit réduire au maximum l'épaisseur du cadre de chaque côté duquel est disposée une partie de l'électronique d'amplification et de traitement. On distingue 3 plans de fils: 1 vertical et 2 obliques. Cette redondance, qui n'est qu'apparente, permet de lever l'indétermination sur les coordonnées, qui se produit en cas d'impulsions simultanées.

ront dans certains cas se justifier par rapport au prix des systèmes similaires des autres chambres à étincelles en raison de la grande flexibilité offerte par les CPM, et parce que dans ce prix entre celui des moyens de sélection de la particule, de rejet des événements parasites ou non intéressants, ce qui sur les autres chambres occasionne aussi des dépenses élevées. Il faut de plus considérer qu'avec les CPM on économise le prix des générateurs puisés à haute tension et aussi du gaz très cher des chambres à étincelles.

Pour ce qui concerne l'amplification, un nouvel élément vient de modifier assez radicalement le problème; en effet, des études systématiques entreprises par le Groupe chargé de la réalisation d'un grand détecteur pour les ISR (voir en page 147 de ce numéro) sur la corrélation entre la nature du gaz remplissant la chambre et le rapport d'amplification de l'avalanche viennent de conduire à la découverte d'un mélange « magique » qui permet de multiplier par près de 100 le facteur d'amplification. La nouvelle, objet d'une publication soumise à Nuclear Instruments and Methods, est encore trop fraîche (avril 1970) pour qu'on puisse analyser l'étendue exacte de ses répercussions, mais il est piquant que dans une technique aussi ancienne des progrès puissent encore être réalisés et que malgré la limite théorique de 10^4 admise pour le gain, on soit arrivé en pratique à 10^5 .

L'évolution des techniques

On peut considérer l'évolution des CPM sous le double aspect des techniques de construction et de l'électronique.

Construction

Lorsqu'il s'agit de chambres de grandes dimensions, la construction doit être très soignée et d'autant plus que l'entrefer est faible. On a mis au point au CERN une

machine à « tisser » les fils des CPM qui permet d'obtenir une tension régulière sur chaque fil (voir photo). Toutefois, lorsque les fils sont très longs, des problèmes originaux ont été rencontrés qui ne se posaient pas avec les chambres à étincelles, en raison notamment de phénomènes électrostatiques qui ont fait au CERN l'objet d'études poussées, en particulier de la part du Groupe CERN-Heidelberg.

Un autre aspect, du reste relativement mineur, de la construction réside dans la nature des fils. On est arrivé à des résultats très satisfaisants avec des fils en molybdène ou en tungstène plaqués or qui offrent une surface très régulière et une bonne résistance à la traction. Leur diamètre est habituellement de 20 microns.

Par ailleurs, pour simplifier l'assemblage, on construit maintenant des chambres démontables faites de plans de fils empilables dont le nombre peut être adapté à loisir au type d'expérience.

Les plans hautes tensions sont faits de grilles ou de fils parallèles mais on utilise également des feuilles d'aluminium très minces (quelques μ) qui offrent une grande transparence vis-à-vis du faisceau.

Du point de vue de la diminution de l'entrefer, le problème principal est celui de l'abaissement du champ électrique par fil et par là, du taux d'amplification qui s'ensuit. On peut le compenser par une élévation de la tension, mais on est limité par les claquages. Pour certains plans focaux on construit néanmoins des chambres à 2 fils par millimètre.

L'électronique

Il s'agit là de l'aspect déterminant de l'avenir des chambres à grand nombre de fils. Amplification: Lorsqu'une particule ionisante passe à proximité d'un fil, elle y produit un signal d'environ 0,5 mV. Pour pouvoir travailler il faut amplifier d'un

rapport de 1000 environ. Sur les premières chambres construites au CERN, on utilisait des amplificateurs à transistors classiques. Dans un deuxième stade, on utilise actuellement pour l'amplification des circuits intégrés construits en grande série dans l'industrie.

Avec les nouveaux mélanges gazeux découverts au CERN, le voltage des signaux sera multiplié par 100 environ, et l'amplificateur verra son prix chuter jusqu'à ne plus présenter un problème financier.

Mémorisation: Sur les premières chambres faites au CERN en 1968, il n'y avait qu'un amplificateur par fil et l'électronique se bornait au comptage des impulsions.

Depuis la fin de 1968, il est apparu nécessaire, pour exploiter au mieux les avantages des CPM de concevoir des circuits électroniques de mémorisation spécifiquement adaptés à leur nature, et qui se chargent de sélectionner les impulsions, de les mettre en mémoire et de les restituer à la calculatrice. Plusieurs groupes du CERN se sont penchés sur le problème. On a mis au point des circuits amplification-mémorisation très compacts à base de circuits intégrés. La tendance est au regroupement sur une même plaque des circuits de plusieurs fils. (On est parti de 4, et l'on est à 8 ou 32.)

Ce regroupement permet de n'utiliser qu'une seule sortie vers l'ordinateur par groupe, ce qui simplifie considérablement l'encombrement des lignes et conduit également à réduire le prix.

Intégration à moyenne ou grande échelle

Toutefois, les prix des circuits amplification-mémorisation même regroupés (de l'ordre de 60 francs suisses par fil) sont encore prohibitifs pour des chambres à grand nombre de fils (plus de 10 000).

L'une des meilleures solutions consisterait à faire appel aux circuits intégrés à échelle moyenne ou grande qui réunissent dans une seule unité de quelques millimètres carrés, et pour un prix à peine supérieur à celui d'un seul circuit, les circuits correspondant à plusieurs fils. Mais, pour l'usinage de tels circuits des investissements élevés sont nécessaires — que seule une fabrication massive en série permettra d'amortir. Or, pour chaque expérience ou type d'expérience, la logique du circuit varie, notamment en ce qui concerne la sélection des impulsions, le groupement des signaux de coïncidence ou d'anti-coïncidence, le temps d'ouverture des portes, etc.. La construction en grande série est donc liée à la mise au

Pour tisser les chambres à fils de toutes sortes, il existe au CERN plusieurs machines automatiques mises au point à l'atelier Ouest qui tendent les fils sur un bâti en assurant à la fois une tension et un entrefil constant. La constance de l'entrefil est assurée par des crémaillères entre lesquelles évolue un chariot dévidoir doté d'un servo mécanisme de régulation de tension. Le fil, partant d'une crémaillère, vient s'accrocher autour d'une dent de l'autre, puis revient à la première crémaillère où il fait de même, etc. La tension du fil peut s'ajuster entre 10 et 50 g. Il existe différentes crémaillères interchangeables dont le pas va de 1 à 3 mm. On peut également, moyennant un artifice, obtenir un entrefil de moins de 1 mm. Pour une largeur de 1,20 m, il faut environ 7 s pour mettre en place un fil.

Une fois les fils tendus sur le bâti, on les soude à un cadre de résine epoxide moulée dans lequel sont préparées des cosses espacées au pas des fils. Il ne reste plus alors qu'à couper les boucles faites par les fils et à procéder au raccordement des circuits d'amplification.

point de circuits polyvalents adaptables à une grande variété d'expériences. Plusieurs groupes du CERN et des Etats membres travaillent sur la question. Certains ont déjà adressé à l'industrie des spécifications correspondantes mais présentement il semble que l'industrie, européenne ou américaine, hésite à investir dans la réalisation de tels circuits, qui, précisons-le, sont parfaitement réalisables du point de vue technique, des sommes dont la rentabilité est liée à l'importance des séries. On voit à quel point la collaboration entre laboratoires est nécessaire pour permettre une uniformisation des spécifications. Rien a priori ne l'exclut et elle se trouve grandement facilitée par les étroits contacts existant entre le CERN et les autres laboratoires européens qui s'intéressent à la réalisation des grandes CPM (Heidelberg, Hambourg, Frascati, Orsay).

Les réalisations au CERN

La mise au point des premières chambres proportionnelles multifils s'est faite dans une expérience menée au SC par le groupe Charpak et al. Elle a depuis lors été suivie par une série de réalisations:

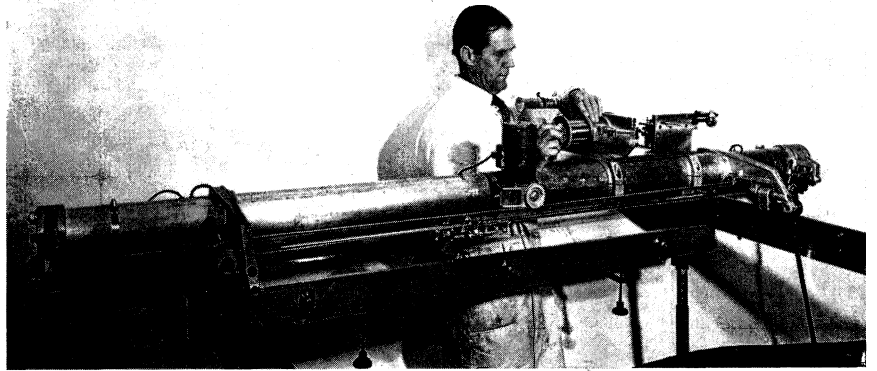
1) Analyseur de profil de faisceau (Amato, Petrucci)

La première, qui a vu le jour en 1968, était un analyseur de faisceau de petites dimensions (voir COURRIER CERN vol. 9, page 175) qui comportait deux plans de fils, et qui servait à déterminer le profil vertical et horizontal du faisceau, l'électronique se bornant à l'amplification.

2) Analyseur de faisceau

Peu après, un groupe CERN/Imperial College construisit un ensemble de sept chambres, assez semblables. Elles ont été utilisées dans différentes expériences pour déterminer la position et la quantité de mouvement des particules de différents faisceaux incidents. Elles se distinguent des précédentes par l'adjonction à l'étage amplification d'un étage de mémorisation à circuit intégré. Fiables et d'un emploi facile, elles se sont avérées des outils très appréciés.

3) Diagnostic de faisceaux



CERN/PI 301.3.70

Sur les spécifications du groupe de faisceaux de la division NP (Petrucci et al), un ensemble de six petites chambres reliées à une calculatrice possédant un système de présentation, une imprimante de bande, une machine à écrire et permettant notamment d'imprimer des diagrammes, etc., a été réalisé pour permettre le réglage des faisceaux secondaires alimentant les expériences (mesure de l'espace de phase, du spectre de divergence, du spectre d'énergie).

L'idée lancée fin 1968 a abouti au début de 1970 et l'appareil est en service depuis février 1970. Ce système extrêmement souple de diagnostic facilite énormément le réglage des lignes de faisceau et fournit aux physiciens tous les renseignements possibles à son sujet; certaines opérations jugées impossibles parce qu'elles auraient pris plusieurs journées de faisceau sont maintenant faites en moins d'une heure. L'électronique du type circuit intégré est groupée en plaquettes correspondant chacune à 4 fils.

4) Chambres pour expérience de physique

Des chambres, en construction au CERN par un groupe CERN/Caen seront utilisées pour une expérience de mesure de la distribution angulaire $K-n-^A K-n$ qui doit commencer au PS vers le début de 1971. Des essais auront lieu préalablement sur un faisceau du SC en octobre 1970. Il s'agit d'un ensemble de 9 plans de fils dont le plus grand a 1,20 m X 0,80 m. Le traitement sera assuré en ligne par un HP 2115A.

5) Grandes chambres pour une expérience de physique

Les plus grandes CPM jamais projetées sont en cours de réalisation au CERN dans le cadre d'une expérience CERN-Heidelberg. Deux des 6 plans de fils ont ont en effet 2,85 X 0,90 m. Le nombre de fils atteint un total de 5400. Cette expérience, qui doit commencer à la fin de 1970, servira à l'étude de la désintégration du kaon neutre (de 5 à 11 GeV/c) en deux particules chargées et en particulier à la détermination à 1° près de la phase du paramètre γ_{\pm} de la violation PC. Ce sera la première expérience de physique importante utilisant des chambres de ce type.

Le taux de comptage élevé permettra de travailler avec des faisceaux 5 à 10 fois plus intenses qu'avec des chambres à étincelles. On pourra ainsi enregistrer jusqu'à 2000 désintégrations de K^0 par impulsion du PS et accroître sérieusement la précision des mesures par rapport à

l'expérience précédente sur ce sujet. Le traitement s'effectuera en ligne au moyen d'un calculateur PDP 15-40.

6) Détecteur universel pour les ISR

Le second grand projet en cours de réalisation au CERN porte sur la construction des CPM qui prendront place dans l'aimant à champ fractionné de la zone d'expérimentation 14 des ISR (voir en page 148 de ce numéro).

Différentes conditions sont imposées:

a) tout d'abord, il s'agit, contrairement aux deux cas précédents, d'un détecteur qui devra pouvoir s'adapter à une gamme aussi étendue que possible d'expériences. Il faut donc que l'électronique de mémorisation (encore à l'étude) offre le maximum de polyvalence;

b) en raison du volume limité de la zone soumise au champ, il est nécessaire d'exploiter au mieux la place utile, donc de gagner au maximum sur les dimensions de la structure et le volume occupé par l'électronique.

Les plans de fils auront 150 X 50 cm et l'on prévoit 10 000 fils dans une première phase. Plus tard, d'autres plans de fils pourraient être ajoutés pour obtenir un nombre très élevé de fils (jusqu'à 100 000) permettant d'analyser des événements complexes. Ces chambres seront reliées à un ensemble de calculateurs en ligne (voir COURRIER CERN vol. 10, page 46) et un effort important est fait sur les programmes qui devront pouvoir, eux aussi, s'adapter à une grande variété d'expériences.

Conclusion

On comprend, en raison de ces nombreux avantages l'intérêt que suscitent les CPM. On a vu que le prix de l'électronique restait un facteur limitatif pour les chambres à très grand nombre de fils. L'abaissement de cette barrière des prix conditionnera donc leur avenir. Si faute d'arriver à des commandes massives on est restreint à se borner aux progrès faits dans la construction proprement dite, par exemple ceux qui sont réalisés dans l'amplification gazeuse, alors il est probable qu'elles verront leur emploi se généraliser comme instruments de déclenchement des chambres optiques ou automatiques, en économisant du temps de machine et du temps de calculatrices; si par contre cette barrière peut être franchie, rien n'empêche d'imaginer d'énormes détecteurs capables de supplanter les meilleures techniques de détection actuelles: qui vivra verra.