

Détecteurs à gaz : développements récents et applications

F. Sauli

▶ **To cite this version:**

F. Sauli. Détecteurs à gaz : développements récents et applications. École thématique. Ecole Joliot Curie "Instrumentation en physique nucléaire et en physique des particules", Maubuisson, (France), du 26-30 septembre 1988 : 7ème session, 1988. cel-00645566

HAL Id: cel-00645566
https://cel.hal.science/cel-00645566

Submitted on 28 Nov 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

DETECTEURS A GAZ : DEVELOPPEMENTS RECENTS ET APPLICATIONS

F. Sauli

CERN, CH-1211, Genève 23, Suisse

1 - INTRODUCTION

Dans le domaine de la physique des particules, l'expérimentateur dispose aujourd'hui d'appareils perfectionnés et complexes qui lui permettent de localiser et d'identifier les événements engendrés par les interactions nucléaires. Une grande partie de ces systèmes utilisent comme éléments de détection la chambre proportionnelle multifils (Multiwire Proportional Chamber, MWPC) dont la conception et la mise au point ont été réalisées il y a environ vingt ans par Georges Charpak et son groupe au CERN /1/. Se présentant sous des formes diverses, planes ou cylindriques, ses dimensions dépassant parfois une dizaine de mètres carrés par élément, la MPWC, en raison de son excellente résolution temporelle (quelques dizaines de nanosecondes) travaille avec une très bonne efficacité de détection sous des flux de rayonnement élevés et atteint une précision de localisation submillimétrique. Pouvant fournir ses informations sous forme numérique, elle peut être connectée directement à des enregistreurs de données électroniques complexes. La fréquence typique d'acquisition varie de quelques centaines à quelques dizaines de milliers d'événements par seconde, selon leur complexité.

Un aperçu rapide de la situation de la physique nucléaire à la fin des années soixante devrait permettre de mieux apprécier l'impact considérable de cette nouvelle technologie. C'était une époque de grande effervescence due, d'une part aux premières prévisions quantitatives de modèles fondés sur la théorie des quarks, exigeant souvent pour la vérification expérimentale la détection d'événements de section efficace très petite, et d'autre part à la mise en oeuvre d'accélérateurs de haute énergie et de flux élevés. Pour détecter des événements de géométrie complexe, on disposait alors essentiellement de deux types d'appareils: la chambre à bulles, précise en ce qui concerne la détermination de la topologie des interactions, mais mal adaptée à la recherche d'événements rares en raison de sa non-sélectivité, et les détecteurs dits "électroniques", formés d'un ensemble de scintillateurs plastique en coïncidence géométrique et de chambres à étincelles, permettant d'observer les événements. La deuxième méthode, pour sélective qu'elle soit, était limitée dans le taux d'acquisition par les temps morts propres au mécanisme de l'étincelle dans les gaz.

Je me souviens encore des sentiments divers avec lesquels fut accueillie la première présentation internationale de travaux réalisés à l'aide de la chambre proportionnelle multifils, à l'occasion d'un congrès organisé au château de Versailles en 1968: admiration devant les caractéristiques opérationnelles possibles (sensibilité continue sous flux élevé et possibilité de sélection électronique à plusieurs niveaux de décision), mais aussi perplexité devant la nécessité d'employer des centaines, voire des milliers de canaux électroniques indépendants pour l'amplification et l'enregistrement des données.

Par un concours de circonstances qui n'est pas rare en recherche scientifique, le début des années soixante-dix a vu un développement fulgurant de la technologie de l'intégration monolithique des composants électroniques; ceci a permis de réduire substantiellement le coût et l'encombrement de grands détecteurs fondés sur cette nouvelle technologie. A la même époque, la généralisation de calculateurs électroniques toujours plus perfectionnés a permis de relâcher les critères de sélectivité avant l'enregistrement sur support magnétique, offrant ainsi la possibilité de découvrir au cours de l'analyse des événements inattendus à

priori. Le développement et l'utilisation de détecteurs à chambres multifils fut donc rapide et multiple et se poursuit encore, à preuve, le grand nombre d'articles qui leur sont toujours consacrés dans les revues d'instrumentation. Peut-être plus graduelle, mais en progrès continu, est la diffusion de la technique nouvelle dans des domaines collatéraux tels que l'astrophysique, la recherche biomédicale, et l'analyse structurelle notamment.

2 - CHAMBRES PROPORTIONNELLES ET CHAMBRES DE DERIVE

Je me bornerai à décrire rapidement les principaux processus physiques qui permettent de révéler des rayonnements ionisants à l'aide de compteurs de type proportionnel. Le passage d'une particule chargée ou la conversion d'un photon en gaz causent de multiples interactions électromagnétiques et peuvent notamment entraîner l'apparition d'une ou de plusieurs paires électron-ion positif (on trouvera une description approfondie des divers processus de perte d'énergie dans la référence 2, par exemple). Les électrons primaires produits dans le gaz par ces processus ionisants peuvent être assez nombreux pour être rassemblés et détectés directement sur des électrodes appropriées au moyen d'un léger champ électrique. Des particules de haute énergie n'engendrent toutefois que quelques dizaines d'électrons dans des couches minces de gaz; on a recours alors, pour la détection, à un mécanisme de multiplication à l'intérieur même du gaz. Un tel processus implique l'action de champs électriques élevés (10^5 V/cm atm ou plus) obtenus en général par utilisation de fils anodiques minces (grâce à une dépendance inversement proportionnelle à la distance du champ électrique). La multiplication en champ uniforme est d'ailleurs également possible et présente certains avantages, comme nous le verrons par la suite. La charge détectée dépendant de la charge initiale (bien que souvent d'une manière non linéaire), ce détecteur est dit proportionnel.

La structure de la chambre proportionnelle multifils est illustrée par le schéma de la figure 1. Elle consiste en un plan de fils anodiques minces, parallèles et

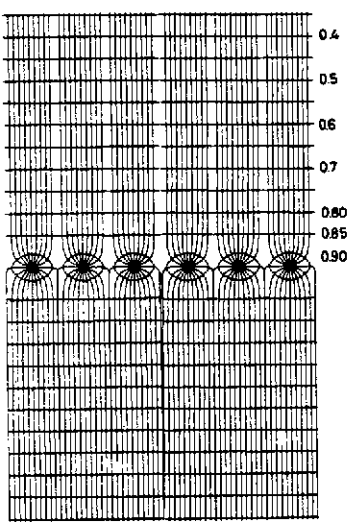


Fig. 1 Schéma de construction et carte du champ électrique dans une chambre proportionnelle multifils. Un plan de fils anodiques minces est tendu entre deux plans cathodiques. L'application d'une différence de potentiel symétrique entraîne la formation de champs équipotentiels et des lignes de champ indiquées. Les électrons produits par les événements ionisants dans le gaz de remplissage migrent vers les anodes et se multiplient par avalanche dans le champ élevé.

rapprochés, tendus sur un support isolant entre deux cathodes (feuilles, grilles ou fils). L'application d'une différence de potentiel entre anodes et cathodes, symétriquement par rapport au plan central, entraîne l'apparition des lignes de champ équipotentielles représentées sur la figure. Des valeurs typiques pour le diamètre des fils anodiques et la distance entre eux sont respectivement de 20 µm et de 2 mm, alors que la distance entre les plans d'anode et de cathode va de 5 à 10 mm. Cette structure est isolée de l'atmosphère par des fenêtres étanches formées de minces couches de matière plastique, et est remplie d'un mélange de gaz. Bien que la multiplication de charge puisse être obtenue dans presque tous les gaz, le choix du milieu est souvent dicté par les exigences expérimentales, par exemple une bonne proportionnalité, un facteur élevé de multiplication, le rassemblement d'électrons sur des épaisseurs considérables sans perte par capture.

Les électrons libérés dans le gaz par ionisation migrent vers les fils anodiques à proximité desquels, du fait de l'augmentation rapide du champ électrique, ils acquièrent suffisamment d'énergie pour subir des collisions inélastiques et ionisantes avec les molécules. Ceci conduit à la création d'une avalanche d'électrons et d'ions et à la multiplication de la charge initiale; le processus de multiplication s'arrête lorsque tous les électrons ont rejoint la surface des fils anodiques. Pour la détection et la localisation des particules ionisantes et des rayons X mous, on utilise des facteurs de multiplication proportionnelle typiques de 10^4 à 10^6, alors que, pour d'autres applications (par exemple, la calorimétrie des gerbes), on atteint des valeurs plus élevées (10^7 ou plus) grâce à des modes opératoires spéciaux. On trouvera ailleurs une description plus détaillée des processus qui interviennent dans une chambre proportionnelle, par exemple dans ma note qui fait l'objet de la référence 3.

Dans sa version la plus simple, une MWPC est dotée d'un circuit amplificateur-discriminateur sur chaque fil et d'un système de lecture numérique qui permet d'enregistrer le profil des fils activés au cours d'un intervalle donné. On obtient ainsi, pour chaque chambre, la projection selon un axe coordonné de l'événement ionisant avec une précision qui correspond à la distance entre les fils. La deuxième coordonnée est fournie par une autre chambre, dont les fils anodiques sont perpendiculaires à ceux de la première. La photographie de la figure 2 montre une des premières MWPC de grandes dimensions, à lecture numérique fil par fil, réalisée au début des années soixante-dix /4/. Compte tenu du perfectionnement rapide des techniques de construction et de la simplicité relative des circuits électroniques requis, les ensembles numériques de ce type ont été parmi les premiers à être utilisés à grande échelle pour des expériences en physique des hautes énergies.

Une plus grande précision de localisation ainsi qu'une véritable bidimensionnalité ont pu être obtenues en utilisant le profil des signaux induits sur le plan cathodique par l'avalanche anodique. Une analyse électrostatique simple de la charge induite par le processus d'avalanche permet de se rendre facilement compte que la plus grande partie du signal négatif observé sur le fil anodique ne résulte pas de la collection des électrons, mais du mouvement rétrograde des ions positifs produits. Ce mouvement induit des signaux positifs sur toutes les électrodes adjacentes, comme le montre la figure 3. Les deux plans cathodiques sont formés de bandes minces, ou de plans de fils perpendiculaires entre eux, et le profil de la charge induite est mesuré; on peut calculer les deux coordonnées orthogonales de l'avalanche dans un seul élément de MWPC. Cette méthode, dite du centre de gravité de la charge induite, permet d'obtenir une précision de localisation qui n'est parfois limitée que par la dispersion intrinsèque de la trace ionisante (quelques dizaines de microns pour des rayons X de faible énergie).

Il est à noter qu'une précision à peu près équivalente peut être obtenue pour la coordonnée parallèle au fil anodique et pour la coordonnée perpendiculaire, ce qui, à première vue, est surprenant. On attendrait en fait un effet de quantification dû à la distance entre fils. Cela est dû au fait notable et insoupçonné que le développement de l'avalanche, au moins aux gains modérés, demeure bien localisé autour de la direction d'origine de l'approche des électrons

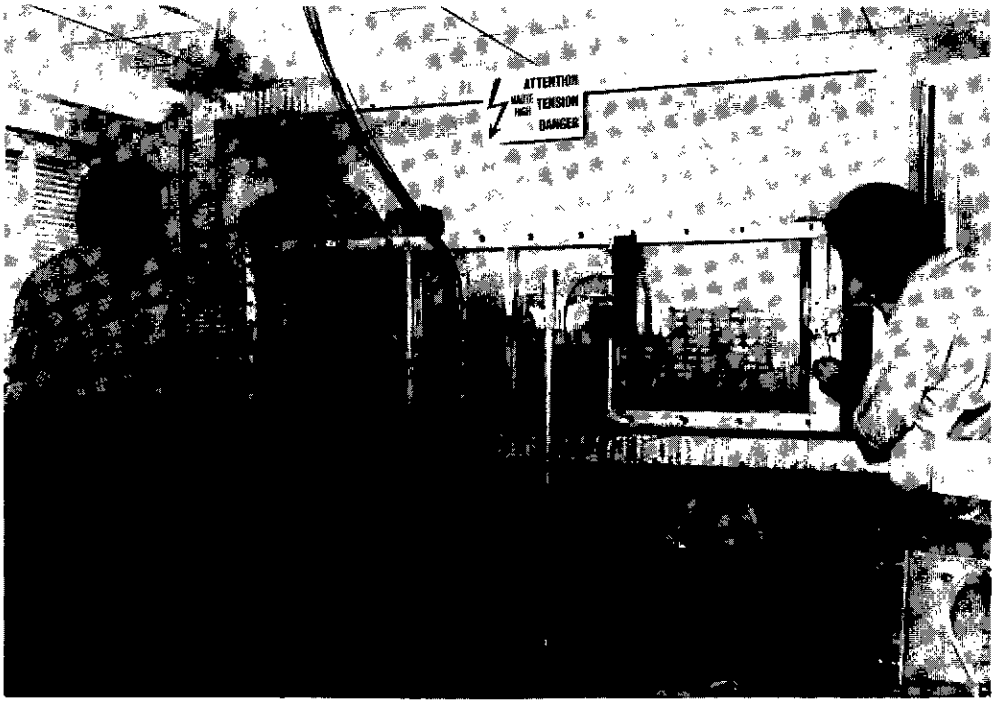


Fig. 2 Une des premières chambres proportionnelles multifils, construite au CERN au début des années 70. A gauche, Georges Charpak et à sa droite l'auteur.

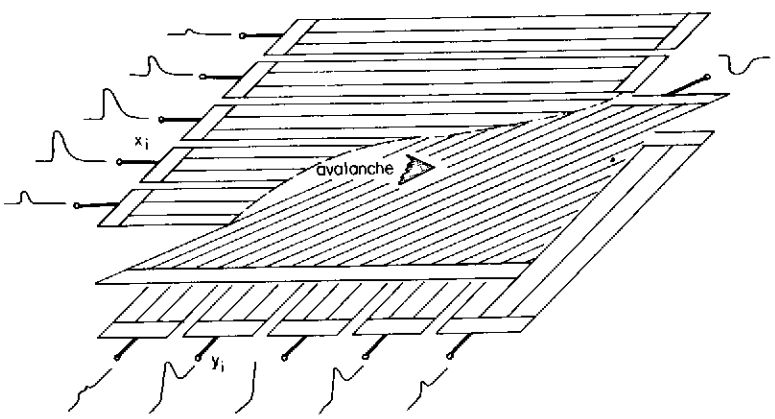


Fig. 3 L'avalanche de charge qui se développe dans le processus de multiplication aux anodes induit un signal négatif sur le fil anodique intéressé et des signaux positifs sur toutes les électrodes qui l'entourent. Une mesure du profil des charges induites sur les plans cathodiques permet d'obtenir les coordonnées bidimensionnelles de l'événement.

primaires. Les ions produits dans la multiplication reviennent alors sur les mêmes lignes de force qui aboutissent au point d'origine de l'ionisation détectée. Le centre de gravité des signaux induits (calculé à l'aide d'une fonction de transfert appropriée) reflète donc bien la position originale. La figure 4 donne un exemple d'image à deux dimensions, obtenue en irradiant une MWPC au moyen d'une source de rayons X à travers un masque de lettres découpées. Chaque point correspond à un événement, localisé par la méthode du centre de gravité des signaux induits /5/. Les dimensions réelles sont indiquées sur la figure. L'image est détectée en réalité par un seul fil anodique sur quelques millimètres de long. Les perspectives d'application de ces méthodes de microradiographie sont remarquables. Nous en donnerons quelques exemples par la suite.

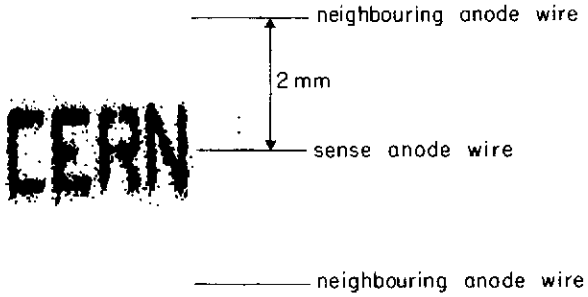


Fig. 4 Un exemple de la précision de localisation qui peut être obtenue avec la méthode de la charge induite. L'image est obtenue en irradiant la chambre proportionnelle avec une source de rayons X au travers d'un système collimateur. Chaque point représente une mesure de position; les dimensions extérieures du sigle sont de 4 mm x 2 mm.

Des chambres proportionnelles à lecture cathodique du type décrit ont été réalisées dans de multiples géométries, planes et cylindriques. Les coordonnées des événements ionisants sont obtenues en mesurant, avec des systèmes de convertisseurs analogiques-digitaux, le profil de la charge sur les bandes cathodiques. Puisque la meilleure précision de localisation résulte de l'emploi d'une largeur de bande identique à la distance anode-cathode, il faut disposer, même pour un détecteur de dimensions modestes, d'un grand nombre de canaux électroniques. La référence /6/ contient une étude détaillée de cette méthode de localisation.

Divers systèmes permettent d'utiliser l'information cathodique en évitant la complexité électronique de la méthode de lecture bande par bande, en particulier la division résistive de la charge et la sérialisation des impulsions sur lignes de retard électromagnétiques. Ces systèmes simplifiés limitent soit la précision de la localisation, soit la résolution temporelle, mais ils sont largement utilisés en recherche biomédicale (voir, par exemple, les références 7 et 8).

Dans la chambre multifils originale, les coordonnées des événements ionisants sont déduits d'une mesure des signaux induits, et la résolution temporelle de l'appareil correspond au temps maximal nécessaire pour recueillir les électrons libérés à proximité des fils anodiques (typiquement quelques dizaines de nanosecondes). S'il est pris note de l'instant auquel se produit un événement, par exemple pour les particules chargées avec un scintillateur externe, une mesure du temps de récolte ou de dérive des électrons primaires fournit ultérieurement des informations sur la position de la trace. Tel est le principe de fonctionnement des chambres multifils à dérive (Multiwire Drift Chambers, MWDC). Divers schémas ont été établis pour optimiser les caractéristiques de la récolte en vue d'améliorer la précision de la localisation. Puisque la vitesse de dérive des électrons dans un gaz dépend du champ électrique, on obtient les meilleurs résultats avec une MWDC dans laquelle le champ est constant sur la plus grande

partie du trajet. La figure 5 en donne un exemple /9/. Les fils anodiques sont centrés dans une cellule de dérive symétrique, où le champ électrique est créé par deux réseaux de fils cathodiques à potentiel décroissant des deux côtés de l'anode. Les lignes d'équipotentialité qui en résultent sont indiquées sur la figure. Les limites entre cellules adjacentes sont fixées par un fil cathodique ultérieur imposé par le champ. Le champ électrique et, par conséquent, la vitesse de dérive des électrons, sont constants dans la plus grande partie de la cellule (à l'exception de la région voisine du fil anodique, où se produit la multiplication). La cellule élémentaire de dérive représentée sur la figure peut se répéter pour former une chambre de grandes dimensions. Chaque fil anodique est alors équipé d'un circuit de mesure temporel ou d'un convertisseur numérique. L'ambiguité droite-gauche, implicite dans cette structure, est résolue à l'aide de plusieurs chambres déphasées de manière appropriée ou d'un couple de fils d'anode très proches du fil unique représenté sur la figure.

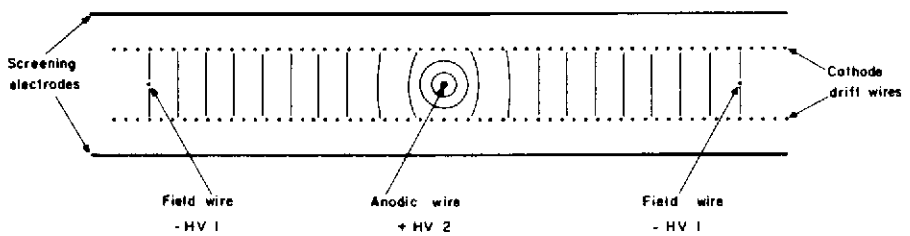


Fig. 5 Exemple de chambre à migration. Une disposition appropriée des fils cathodiques à des potentiels divers permet de créer un champ électrique uniforme qui conduit les électrons produits dans le gaz par les traces ionisantes et vers les fils anodiques où ils sont multipliés et détectés. Une mesure du temps de dérive fournit directement la distance de la trace du fil.

La précision de localisation que peut donner une MWDC dépend de divers facteurs systématiques ou dispersifs. La limite intrinsèque est déterminée par trois éléments principaux: la diffusion des électrons pendant leur trajet dans le gaz, la statistique primaire de production, c'est-à-dire la distance moyenne entre les groupes d'électrons produits par ionisation, et la dispersion électronique dans la mesure du temps de dérive. Ces éléments sont indiqués sur la figure 6, qui montre une mesure typique de précision de localisation pour des particules chargées de haute énergie en fonction de la distance par rapport à l'anode. La précision moyenne est proche de 50 μm. On peut obtenir une meilleure précision en travaillant sous forte pression, ce qui diminue la dispersion due à la diffusion et augmente la densité d'ionisation primaire.

Des chambre à dérive de grandes dimensions, offrant des précisions de localisation plus modestes que celle que nous avons citée, ont été réalisées au CERN par exemple pour les grands détecteurs de neutrinos.

3 – CHAMBRES A DERIVE VOLUMETRIQUES

Les chambres multifils que nous venons de décrire sont des structures minces de grande surface dans lesquelles les traces ionisantes sont mesurées une seule fois. Des événements ayant une géométrie complexe nécessitent davantage de plans de mesure indépendants sur le trajet des traces. Un autre système d'obtention de la topologie des interactions consiste à utiliser un important volume de gaz comme détecteur, les électrons d'ionisation migrant vers une MWPC mince placée à une extrémité de ce volume. Les chambres de ce type donnent une image ou une projection temporelle (chambre de projection temporelle ou Time Projection Chamber, TPC); avec un nombre restreint faible de canaux de mesure, les TPC permettent d'obtenir une représentation très fine des traces ionisantes grâce à leur important volume. Outre le temps de dérive, elles mesurent aussi la hauteur

d'impulsion de chaque segment de trace et peuvent identifier, dans certaines limites, les particules dans la zone du moment auquel la perte d'énergie différentielle dépend de la vitesse.

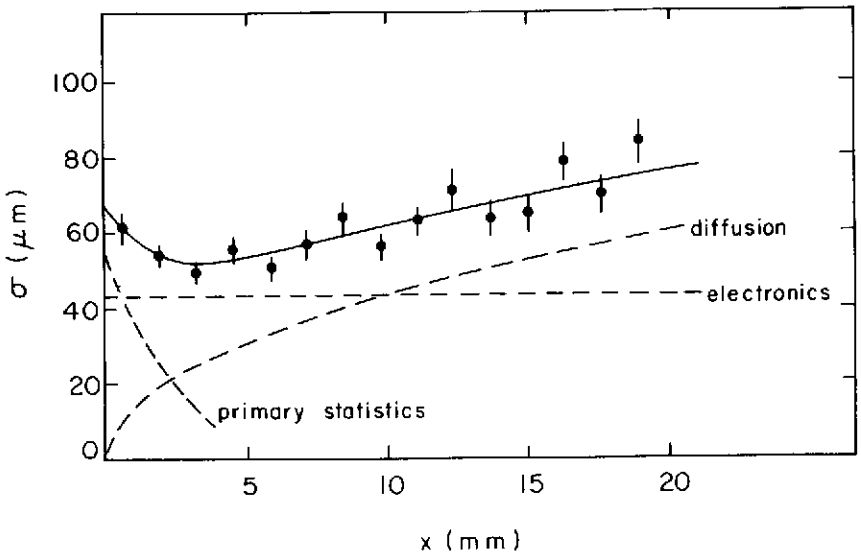


Fig. 6 Précision de localisation pour particules ionisantes rapides mesurée avec une chambre à migration en fonction de la distance du fil. Les diverses contributions dispersives sont également indiquées.

Des chambres à image de dimensions et de géométries variées ont été construites; pour les expériences à l'intérieur d'anneaux d'accumulation, la forme cylindrique est préférée. On peut, par exemple, citer la TPC de Berkeley, utilisée à Stanford, le révélateur JADE, à Hambourg, ISIS, et le révélateur central de l'expérience UA1, au CERN. La référence 10 contient des articles de revue traitant de détecteurs de ce type, et d'autres du même type.

Conçue dans les années soixante-dix par D. Nygren et son équipe à Berkeley /11/, la TPC est peut-être le plus sophistiqué de ces détecteurs; elle consiste en un grand volume de dérive à champ électrique uniforme. Les électrons produits dans le volume sensible migrent jusqu'à l'élément multiplicateur, une chambre proportionnelle multifils avec lecture des signaux sur les fils anodiques et sur des bandes de petits damiers sur le plan cathodique. Un exemple de TPC est montré sur le schéma de la figure 7 /12/.

Ce type de détecteur a été adopté par beaucoup d'autres chercheurs, en particulier pour les expériences ALEPH et DELPHI en préparation au collisionneur électron-positon du CERN (LEP). La figure 8 montre la TPC d'ALEPH en phase de montage. A cause des grandes dimensions du détecteur, la MWPC de la partie frontale est assemblée à partir d'éléments modulaires.

La figure 9 montre un événement détecté et reconstruit dans une TPC, pour l'instant obtenu à travers une simulation de Monte Carlo réalisée par le groupe ALEPH. La puissance d'analyse du détecteur pour des événements complexes est apparente.

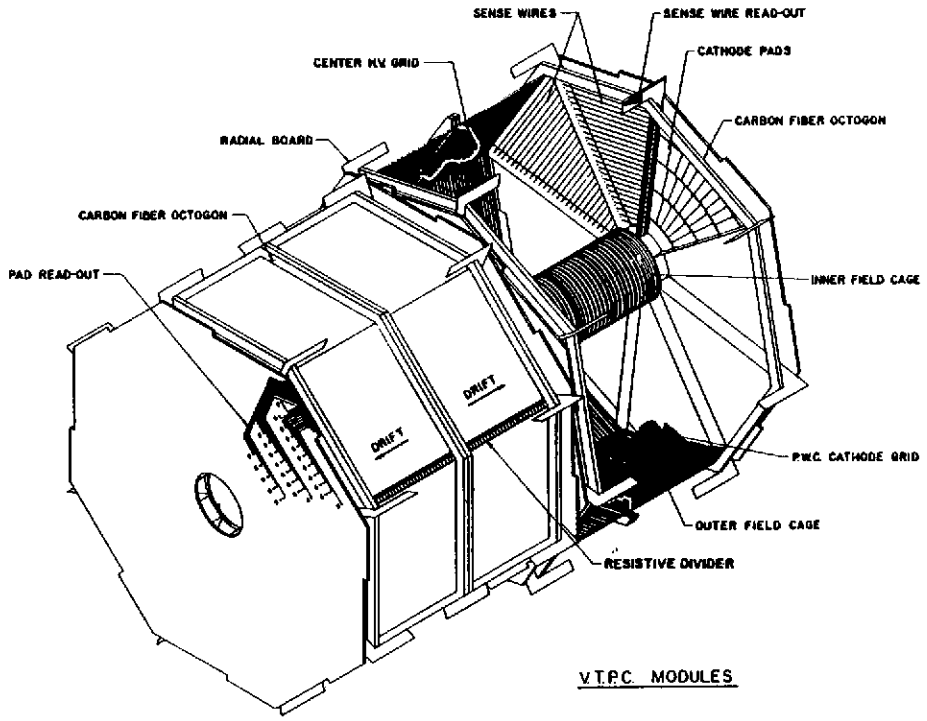


Fig. 7 Vue schématique d'une chambre à projection temporelle (TPC). Elle se conpose en réalité de deux détecteurs indépendants, de forme cylindrique mis bout à bout; une région de dérive épaisse, avec champ électrique uniforme, est suivie par l'élément de multiplication et détection (des modules de chambre proportionnelle multifils).

Lorsqu'on a des taux d'interaction élevés, le temps de dérive considérable d'une TPC (quelques dizaines de microsecondes) devient intolérable. On préfère alors partager le détecteur en plusieurs de modules de dérive, de dimensions plus modestes. Le grand détector de UA1 au CERN, qui a permis la découverte des bosons intermédiaires, en est un exemple (fig. 10) /13/.

Chaque module, de la forme d'une section cylindrique, comprend une région de conversion et de dérive, dans laquelle se forme la trace ionisée, et une chambre multifils à une extrémité, qui permet la multiplication et la détection (fig. 11). Comme dans la plupart des autres chambres de ce type, le plan sensible consiste en une alternance de fils anodiques et de champs qui, outre qu'ils améliorent l'uniformité du champ multiplicateur, servent à réduire l'induction mutuelle entre fils anodiques adjacents. Chacun des modules enregistre les temps de dérive et la largeur d'impulsion des segments de trace, et cela aux deux bouts des fils d'anode (choisis avec une résistivité élevée). Le rapport entre les amplitudes du signal de charge aux deux extrémités d'un fil résistif donne la position longitudinale de chaque segment de trace. Pour analyser l'impulsion de la particule chargée, le détecteur est inséré dans le champ magnétique créé par un aimant bipolaire à entrefer cylindrique. La figure 12 montre un exemple d'événement complexe, enregistré grâce au détecteur décrit, tel qu'il apparaît sur l'écran de l'ordinateur utilisé pour l'acquisition et l'analyse des données. Chaque point indique un élément de trace mesuré. D'autres informations, comme la hauteur d'impulsion enregistrée sur les éléments calorimétriques, sont également représentées.

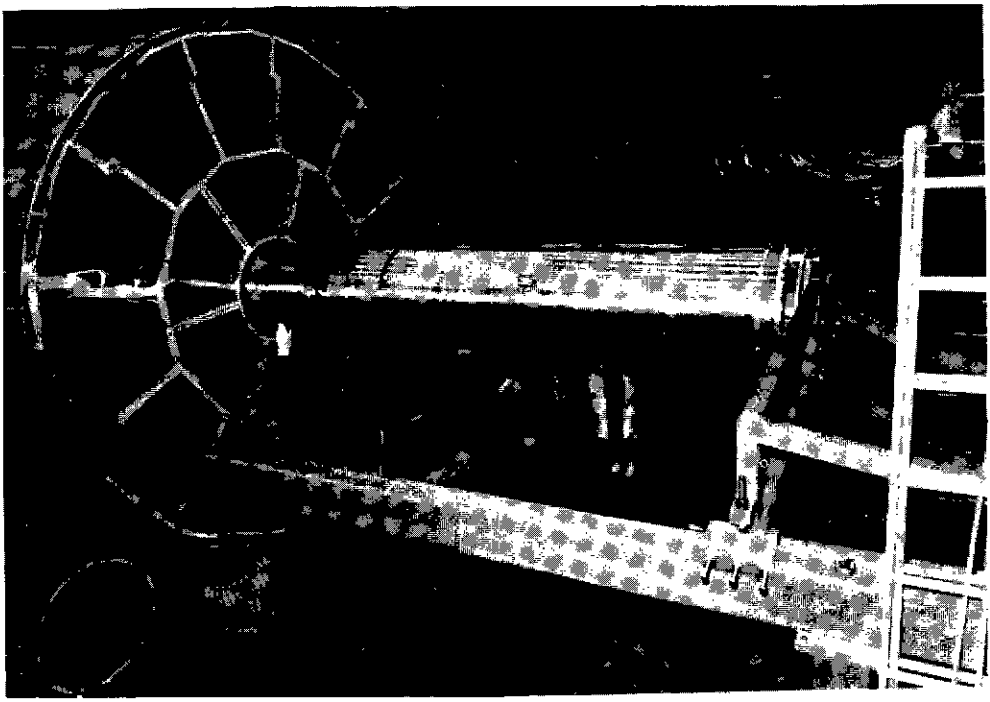


Fig. 8 Assemblage de la chambre TPC du détecteur ALEPH au CERN.

La précision de localisation obtenue avec ce type de chambres dépend essentiellement de la précision avec laquelle on connaît la fonction de corrélation entre les temps de dérive mesurés et la position réelle de la trace. Cette fonction est particulièrement complexe en présence de champs magnétiques qui induisent des distorsions notables dans les trajectoires des électrons migrants. A noter qu'il est possible de minimiser ces effets en construisant un détecteur dans lequel les champs électrique et magnétique sont parallèles (la déflexion latérale des électrons est alors nulle). La TPC de Berkeley est un exemple de cette géométrie.

Comme le montrent les exemples cités, les chambres à dérive volumétriques sont de puissants instruments pour déterminer la topologie d'événements complexes. La principale limitation de leur emploi réside dans le temps de migration des électrons (quelques microsecondes) et de récolte des ions générés au cours du processus de multiplication (quelques millisecondes). Avec des flux élevés, on peut avoir une superposition d'événements et des distorsions du champ électrique qui peuvent modifier la trajectoire de la trace ionisée. La décomposition du détecteur de UA1 en un grand nombre de modules à épaisseur de dérive réduite est précisément destinée à limiter ces effets.



Fig. 9 Vue bidimensionnelle d'un événement (simulé) dans la TPC d'ALEPH. Un électron de basse énergie traverse le champ magnétique en spirale.

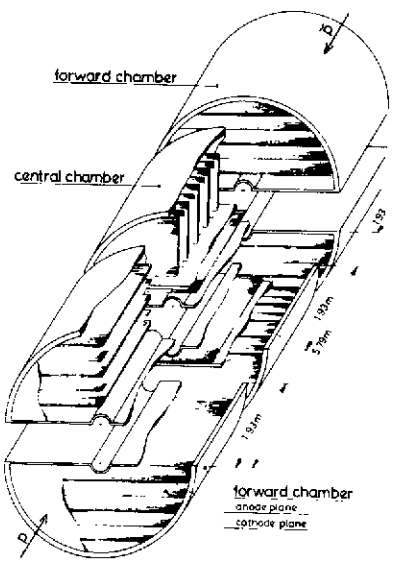


Fig. 10 Vue schématique du détecteur central de l'expérience UA1 au collisionneur protons-antiprotons du CERN. Il se compose d'une quarantaine de modules indépendants montés autour du tube à vide de la machine et à l'intérieur d'un aimant pour l'analyse impulsionnelle.

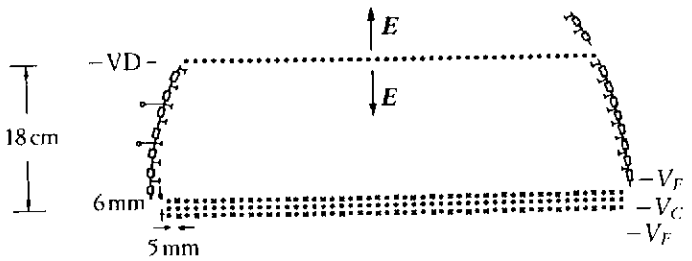


Fig. 11 Schéma d'un élément de chambre à dérive qui constitue le détecteur de la figure précédente. Les traces ionisées produites dans une région à champ uniforme migrent vers un plan de détection. La mesure du temps de dérive et de l'amplitude des impulsions aux deux bouts de chaque fil fournit les coordonnées spatiales du segment de trace recueilli.

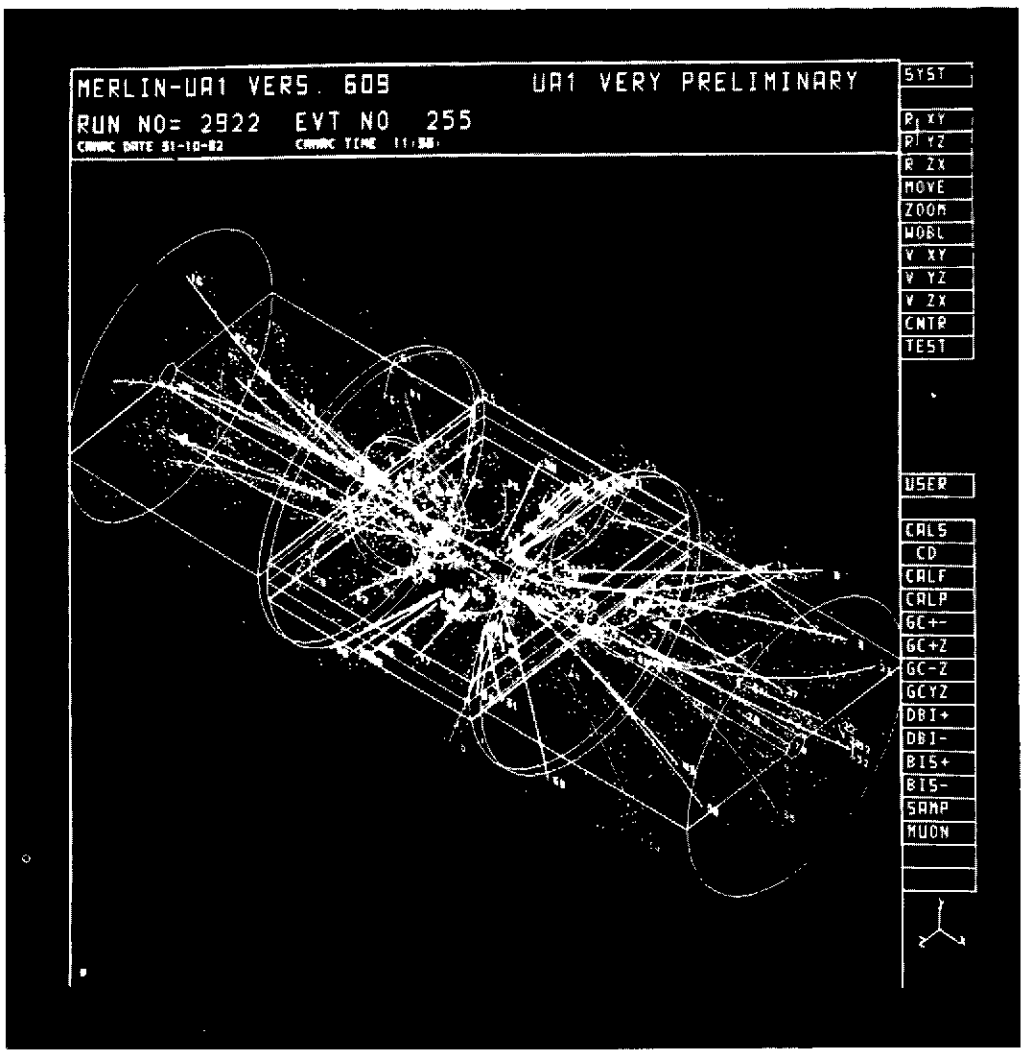


Fig. 12 Une interaction proton-antiproton dans le détecteur UA1. L'image électronique montre les traces chargées mesurées et reconstituées par la chambre à image (photographie CERN).

4 - IDENTIFICATION DES PARTICULES CHARGEES

Les détecteurs décrits ci-dessus nous permettent de reconstituer avec une précision optimale la géométrie d'événements complexes et nous fournissent, lorsqu'ils sont plongés dans un champ magnétique, la valeur de l'impulsion de chacune des traces chargées. Pour maintenant identifier les particules, il faut mesurer une grandeur cinématique indépendante, énergie, masse ou vitesse.

4.1 Mesure de la perte d'énergie différentielle

La perte d'énergie des particules chargées dans des couches minces de gaz dépend, comme nous l'avons vu, de leur vitesse. En raison de la grande dispersion intrinsèque du processeur, des centaines de mesures indépendantes sont nécessaires à une bonne estimation de la perte moyenne. On peut l'obtenir avec les chambres à dérive décrites ci-dessus puisqu'elles enregistrent la hauteur d'impulsion sur chaque fil d'anode. Un exemple de la résolution que peut donner cette méthode avec la TPC de Berkeley est donné à la figure 13 /14/. Nettement séparées dans la région des impulsions basses, des masses différentes sont identifiables dans les limites de l'analyse statistique dans la zone désordonnée au-dessus de quelques GeV/c (grâce à la légère remontée relativiste de la perte d'énergie).

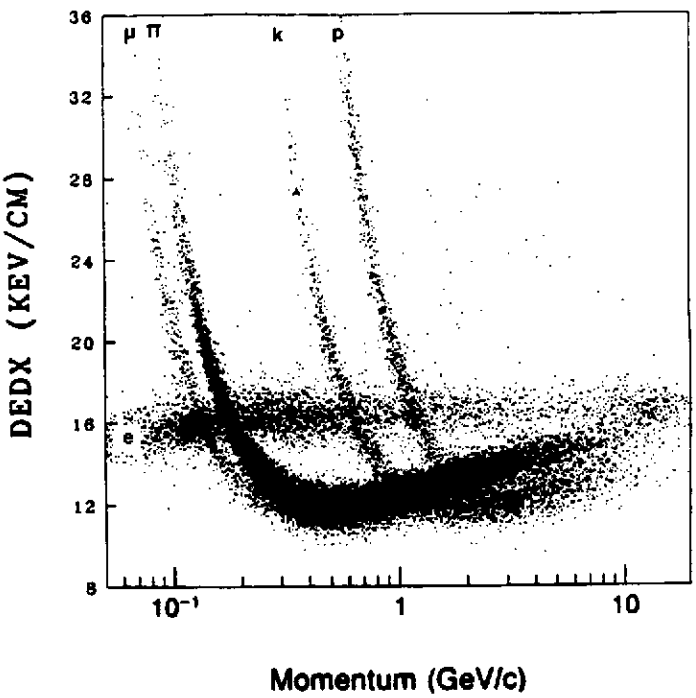


Fig. 13 Perte moyenne différentielle d'énergie mesurée en fonction de l'impulsion, pour une particule chargée rapide dans la chambre à projection temporelle de Berkeley. Des particules de masses diverses sont bien identifiées dans la zone des moments faibles.

4.2 Détection des anneaux de Cherenkov

Cette méthode, qui fait l'objet d'un autre cours /15/, est ici seulement brièvement rappelée.

Le développement récent de chambres multifils capables de gains élevés dans un mélange de gaz photosensibles, a permis d'exploiter une autre propriété physique des particules rapides en vue de leur identification. Soit β la vitesse d'une particule (par rapport à la vitesse de la lumière) et n l'indice de réfraction d'un milieu transparent; si la relation $\beta > 1/n$ est satisfaite, des photons sont émis par effet Cherenkov sous un angle θ_C = arc cos $(1/\beta n)$ dans le sens du mouvement. Ce cône de lumière, réfléchi par un miroir sphérique de rayon R, crée dans le plan focal un cercle de rayon $r = (R/2)\tan \theta_C$; la mesure du rayon de l'anneau donne la vitesse de la particule (fig. 14). Des photons sont émis par effet Cherenkov sur tout le spectre des fréquences, mais ils ne peuvent évidemment être détectés que dans la gamme pour laquelle le radiateur est transparent. A énergie élevée, qui impose l'emploi de radiateurs à gaz à faible indice de réfraction, seul un petit nombre de photons peuvent être détectés pour chaque trace, typiquement quatre ou cinq. La méthode d'identification décrite ci-dessus, qui implique la localisation de photons isolés, a été démontrée il y a plusieurs années en employant des amplificateurs d'image électroniques, sensibles aux longueurs d'onde du visible; cependant elle a été rarement appliquée à cause de ses limites d'acceptance. Avec la mise au point de chambres proportionnelles photosensibles, elle peut être utilisée dans des ensembles expérimentaux à grand angle solide. Puisqu'il n'existe pas de gaz à seuil d'ionisation dans le visible, la détection s'effectue dans l'ultraviolet, en choisissant de façon appropriée le milieu rayonnant et la fenêtre de séparation entre radiateur et détecteur /16/. A noter que l'efficacité quantique des gaz au-dessus du seuil d'ionisation peut être très élevée (50 à 60%), contre 10 à 20% pour une photocathode classique dans le visible.

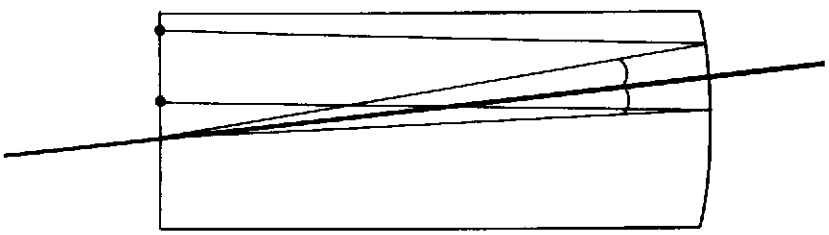


Fig. 14 Détecteur d'anneaux de Cherenkov. Les photons émis par effet Cherenkov par les particules relativistes dans le radiateur sous angle constant sont réfléchis par un miroir sphérique en une image circulaire dans le plan focal. Le rayon du cercle dépend de la vitesse de la particule.

Les premiers travaux sur les détecteurs d'image Cherenkov (détecteur d'image en anneau ou Ring Imaging Cherenkov Chamber, RICH) ont été effectués en utilisant des vapeurs de triéthylamine (TEA) en guise de produit photosensible, avec un potentiel d'ionisation de 7,5 eV (donc dans l'ultraviolet lointain), ce qui implique l'utilisation de fenêtres en fluorure de calcium, transparentes aux photons d'énergie jusqu'à 10 eV environ. On a récemment utilisé une vapeur dont le potentiel d'ionisation est encore plus faible (5,4 eV), le tétrakis-diméthylamine-éthylène (TMAE). L'emploi de ce produit photosensible permet d'utiliser des fenêtres de quartz, qui sont transparentes jusqu'à 8 eV et qui sont beaucoup plus robustes et économiques que celles en cristaux de fluorure. Surtout, ayant une longueur d'onde plus proche de celles de la lumière visible, ce gaz offre un plus grand choix en ce qui concerne le milieu radiant. Le désavantage essentiel du TMAE réside dans sa faible tension de vapeur à la température ambiante (une fraction de torr), ce qui entraîne la nécessité d'utiliser des épaisseurs de conversion de plusieurs centimètres pour obtenir une bonne efficacité. Il en résulte une résolution temporelle de quelques microsecondes et, par conséquent, une importante limitation des flux maximaux tolérables sans confusion. L'alternative, qui comporte des difficultés technologiques évidentes, est de chauffer le détecteur à environ 60-70°C pour augmenter la concentration de TMAE.

La réalisation pratique d'un identificateur de particules fondé sur ces principes dépend manifestement de la capacité à détecter et à localiser dans une chambre multifils les photoélectrons individuels produits dans le gaz. Cela implique un fonctionnement à gain élevé (10^5 ou plus) dans un gaz photosensible, particulièrement apte à engendrer des phénomènes secondaires dus à l'émission et à la reconversion des photons au cours du processus de multiplication par avalanche. Dans une MWPC classique, ces processus sont dominés par les gains au-dessus de 10^4 et donnent facilement lieu à un régime d'instabilité ou de décharge. Une solution proposée et réalisée par notre groupe est fondée sur une variante de la MWPC, la chambre proportionnelle multi-étages (Multistep Proportional Chamber, MSPC /17/) qui utilise un élément préamplificateur à faces parallèles (voir fig. 15). Un ensemble de grilles métalliques parallèles semi-transparentes, avec application de potentiels appropriés définit trois zones de champ électrique au-dessus d'une chambre proportionnelle classique. Dans la première de ces zones, la zone de conversion, en contact avec la fenêtre d'entrée, les photons ultraviolets émis par le radiateur ionisent la molécule de vapeur photosensible. Les photoélectrons ainsi produits parviennent à la deuxième zone, un champ très élevé où ils se multiplient, par avalanche, selon un facteur d'environ 10^4. Une fraction des électrons créés par l'avalanche (dix pour cent environ) pénètrent alors dans la troisième zone (zone de transfert) et continuent vers la MWPC où s'effectuent l'amplification et la détection conformément au processus déjà décrit. Puisque les deux structures d'amplification sont quasi indépendantes, il est possible d'obtenir des gains combinés très importants, proches de 10^7, sans phénomènes secondaires limiteurs /18/.

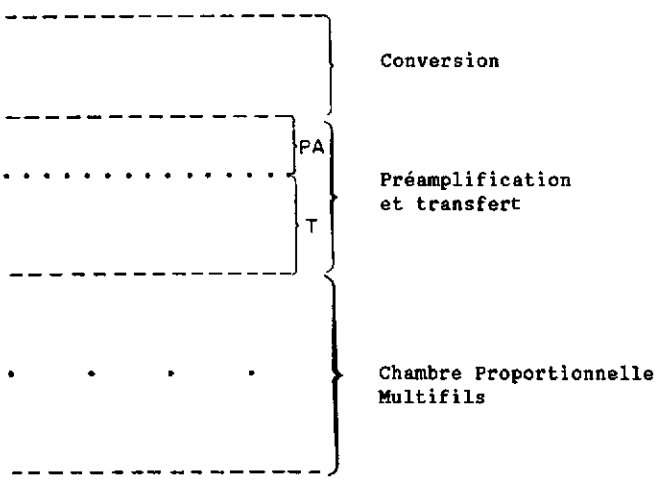


Fig. 15 Schéma de la chambre proportionnelle multi-étages. Une succession de grilles métalliques de potentiels variés est utilisée pour définir une région de conversion dans laquelle se produit l'ionisation, une région de préamplification qui permet de multiplier la charge initiale sous champ élevé, son transfert et une chambre proportionnelle qui complète le processus d'amplification. Cette structure permet d'obtenir des gains élevés dans un gaz photosensible: elle est utilisée entre autre pour la détection de photoélectrons isolés.

La figure 16 montre un exemple d'anneau de Cherenkov obtenu par superposition, sur l'écran cathodique d'un ordinateur, d'une centaine d'événements générés par un faisceau monoénergétique et colinéaire dans un instrument du type décrit. Chaque événement comporte en moyenne cinq photons détectés. Nous avons construit un ensemble expérimental capable d'identifier les particules ayant une impulsions entre quelques dizaines et quelques centaines de GeV/c et nous l'avons fait fonctionner au Laboratoire Fermi, en collaboration avec d'autres instituts de

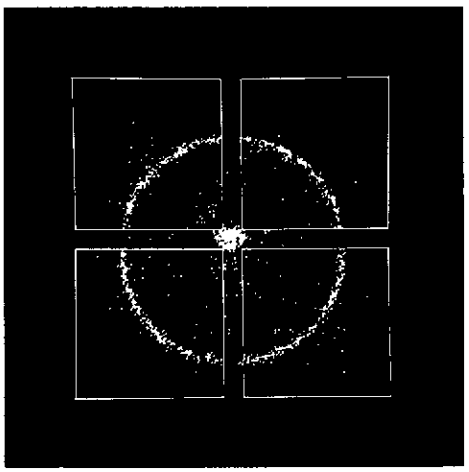


Fig. 16 Exemple d'anneau de Cherenkov, obtenu par superposition d'une centaine d'événements colinéaires. On voit sur la photographie les contours des quatre cristaux de fluorure de calcium utilisés comme fenêtres (de 10 cm x 10 cm chacune). Le faisceau de particules est également détecté et se voit au centre de l'image.

recherche. La photographie de la figure 17 montre l'élément le plus délicat de cet instrument: la fenêtre en cristaux de fluorure de calcium qui sépare le radiateur (hélium à la pression atmosphérique) de la chambre photosensible. Cette fenêtre doit manifestement être imperméable aux molécules de vapeur photosensible et doit résister aux efforts mécaniques et de dilatation thermique qui pourraient fendre ses cristaux. La figure 18 montre l'image obtenue avec un ordinateur d'un anneau de Cherenkov défini par cinq photons détectés. A noter que la mesure du rayon peut se faire aussi avec un seul photon, puisque la trajectoire de la trace chargée est connue après avoir été mesurée par des chambres proportionnelles employées pour l'analyse impulsionnelle et que le centre de l'anneau est établi sans ambiguïté. La résolution obtenue au cours de cette expérience est illustrée à la figure 19. Les particules π et K sont bien identifiées dans toute la gamme des impulsions /19/.

On peut obtenir des gains élevés dans des mélanges photosensibles avec des révélateurs dont la géométrie minimise les effets secondaires induits par les photons émis au cours de l'avalanche. On y parvient, par exemple, en enfermant chaque fil d'anode dans une cathode constituée par un tube métallique mince, ayant une fenêtre longitudinale vers la région de conversion. Les potentiels sont choisis de manière à guider avec une pleine efficacité les photoélectrons vers un fil amplificateur; par ailleurs, ce fils réduit la reconversion dans le gaz des photons secondaires émis dans l'avalanche (qui sont absorbés par la cathode). Pour la conversion et la restitution des photons Cherenkov dans le cas où une résolution temporelle poussée serait nécessaire, on peut utiliser une géométrie semblable à celle de la TPC /15,16/. Les photoélectrons produits dans le gaz migrent dans le champ uniforme vers la région d'amplification réalisée, par exemple, de la façon décrite ci-dessus. La mesure des temps de dérive sur les fils anodiques intéressés fournit les coordonnées des points de conversion. Un instrument de ce type, de grandes dimensions, est en cours de réalisation au CERN pour l'expérience DELPHI. Grâce à l'utilisation du TMAE comme produit photosensible, qui permet un vaste choix de radiateurs, l'instrument atteint une puissance optimale d'identification dans une vaste gamme d'impulsions et couvre la quasi-totalité de l'angle solide autour de la région d'intersection du LEP.

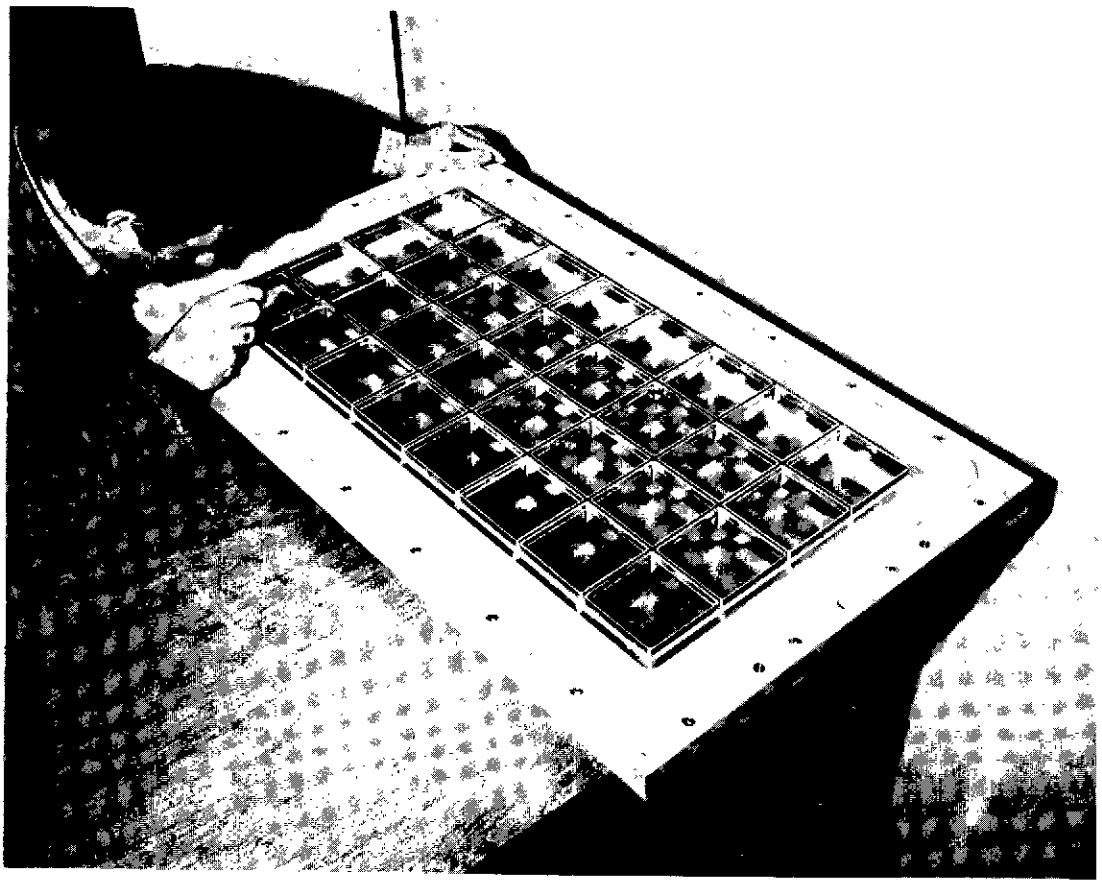


Fig. 17 Fenêtre formée de 32 cristaux de fluorure de calcium, réalisée pour un détecteur d'anneaux de Cherenkov de grande acceptance. Son montage est particulièrement délicat en raison de la fragilité des cristaux et de l'étanchéité exigée de l'ensemble qui sépare le gaz photosensible contenu dans la chambre proportionnelle du gaz ultrapur du radiateur.

4.3 Autres méthodes d'identification des particules

Je mentionnerai ici rapidement deux autres systèmes d'identification des particules rapides qui utilisent largement les chambres proportionnelles. Le premier de ces systèmes se fonde sur la détection de ce qu'on appelle le "rayonnement de transition", c'est-à-dire l'émission de photons de haute énergie (typiquement des rayons X mous) par des particules relativistes, lors de leur passage à travers l'interface entre deux matériaux ayant des constantes diélectriques différentes. Le spectre des photons émis présente un pic prononcé à un niveau d'énergie qui dépend de γ, le facteur de Lorentz de la particule, et leur nombre augmente rapidement avec la vitesse. Puisque la probabilité d'émission par interface est faible, il convient de recourir en guise de radiateur à un paquet de plusieurs centaines de feuilles d'un matériau léger (polyéthylène, lithium), séparées par des interstices minces afin de minimiser l'autoabsorption des photons. Il est ainsi possible de les détecter avec une bonne efficacité au moyen d'une ou de plusieurs chambres proportionnelles dans la gamme des rayons X mous en utilisant le xénon comme gaz de remplissage. Le pouvoir d'identification

est d'autant meilleur que le facteur γ est plus élevé, contrairement à ce qui se passe lorsqu'on utilise la méthode de la perte d'énergie différentielle (qui arrive à saturation à vitesse relativiste).

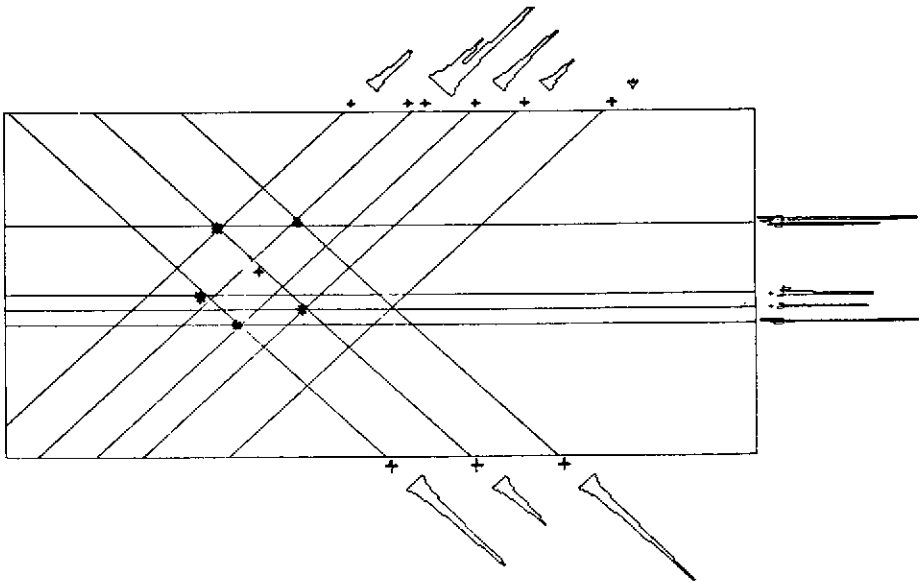


Fig. 18 Un événement à cinq photons détectés apparaît ainsi à l'analyse. La chambre proportionnelle enregistre les profils de charge induite sur les deux plans canthodiques et sur le plan anodique, donc sous trois angles différents. Si le nombre de photons n'est pas trop grand, l'association des coordonnées peut se faire sans ambiguïté.

Une deuxième méthode d'identification, utilisée pour des rayonnements chargés ou neutres, est la méthode calorimétrique. Elle consiste essentiellement à convertir toute l'énergie du projectile en signal détectable en faisant alterner des couches de matériaux denses et d'éléments de mesure de l'ionisation produite par les gerbes dans le gaz. Bien qu'il soit possible d'utiliser des chambres proportionnelles classiques comme détecteurs d'ionisation, il existe un instrument récent qui permet la réalisation de grandes surfaces sensibles pour un prix modique, le tube à dards (streamers) élaboré par Iarocci et ses collaborateurs /20/. Chaque élément sensible se compose d'un fil d'anode tendu au centre d'un profilé de plastique, de section carrée, revêtu intérieurement d'une couche conductrice de graphite. De nombreuses cellules adjacentes et indépendantes peuvent être réalisées sur plusieurs mètres de longueur au moyen de matières plastiques extrudées. En raison de la résistivité superficielle élevée des cathodes, et en utilisant des fils d'anode de fort diamètre (50 à 60 μm), il est possible de dépasser la zone de fonctionnement proportionnel pour arriver à celle du streamer. Avec un facteur de multiplication de l'ordre de 10^7-10^8, ce régime d'exploitation offre l'avantage de permettre la détection directe, sans amplificateurs, et de produire la même hauteur d'impulsion quelle que soit l'ionisation primaire. Cela est particulièrement intéressant en calorimétrie: En fait le signal délivré par le détecteur dépend du nombre total de traces dans la gerbe plutôt que de leur perte d'énergie. La dispersion provoquée par l'émission d'électrons lents mais fortement ionisés est donc minimisée. Le premier grand calorimètre à tubes à streamers a été réalisé pour l'expérience sur la vie moyenne des protons et installé dans le tunnel du Mont-Blanc où il est toujours en service. D'autres systèmes analogues sont en cours de montage pour diverses expériences, en particulier au LEP.

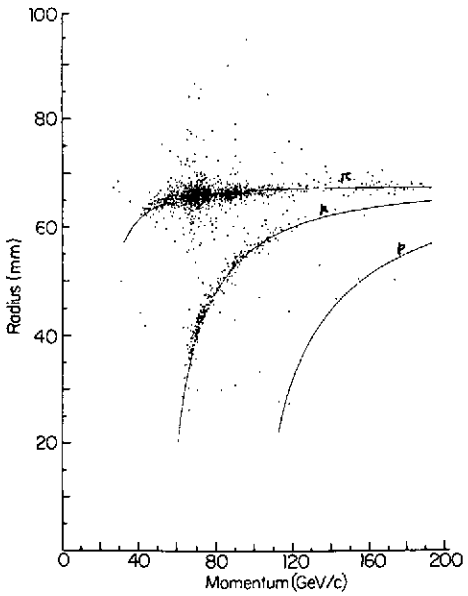


Fig. 19 Distribution des rayons de l'anneau de Cherenkov mesurés par des particules de masses diverses en fonction de leur moment. Dans les limites de la statistique, les ions μ et K sont bien séparés jusqu'aux impulsions plus élevées.

5 - CHAMBRES A IMAGE

Les détecteurs décrits jusqu'ici ont tous la caractéristique commune de recourir à une lecture électronique des signaux pour extraire l'information. On sait depuis longtemps que, dans certaines conditions, des photons sont aussi émis copieusement par les avalanches électroniques et qu'ils peuvent être détectés par des moyens appropriés, photomultiplicateurs ou autres. L'émission de photons est particulièrement abondante dans les gaz nobles purs, et ceci a donné origine à la famille de détecteurs dits proportionnels à scintillation; pour une revue voir référence 21.

Ce type de compteurs, possédant une très bonne résolution en énergie, a toutefois une bien modeste résolution spatiale, correspondant à la taille du photomultiplicateur; des méthodes de lecture à plusieurs tubes sont possibles, ce qui permet une interpolation, mais elles restent limitées aux cas d'avalanches uniques.

Avec la disponibilité sur le marché de capteurs optiques à grande granularité (comme des caméras à état solide ou CCDs) et de systèmes de digitisation rapide d'images, il est apparu qu'un détecteur à émission et détection de lumière pouvait être exploité; il suffirait, par exemple, de regarder le plan d'une chambre proportionnelle avec une caméra pour voir défiler les images des événements, même complexes. Il y a toutefois un problème majeur: les gaz nobles émettent des photons dans l'ultra-violet lointain (150 nm pour l'argon), ce qui demanderait l'emploi de fenêtres en fluorure de calcium ou de magnésium pour la détection. De plus, l'efficacité de scintillation est très fortement réduite par la présence de pollutions, même s'il ne s'agit que de traces. Récemment, et dans le cadre de la recherche sur les gaz photosensibles employés pour la détection de photons, on a trouvé que différentes vapeurs comme le TEA et le TMAE, ajoutées aux gaz rares,

déplacent la longueur d'onde de la scintillation vers le visible (280 nm pour le TEA et 490 nm pour le TMAE)/22-24/. Ces longueurs d'onde peuvent traverser des fenêtres de plastique (par exemple, l'Aclar est transparent au-dessus de 220 nm); la scintillation sera alors détectée par un système composé d'un amplificateur de brillance suivi d'une caméra à état solide et par un digitiseur vidéo.

La figure 20 montre un exemple d'image obtenue avec cette méthode, pour une petite chambre du type TPC exposée au flux des rayons cosmiques. Il s'est avéré que le meilleur rendement de lumière dans une chambre à image est obtenu en utilisant, comme élément de scintillation, une chambre à avalanches à faces parallèles (donc, pas du type multifils); ceci constitue un avantage pratique évident.



Fig. 20 Traces cosmiques visualisées dans une chambre à images.

La mesure de la lumière émise par les avalanches donne un renseignement sur la perte d'énergie; la figure 21 montre par exemple la représentation digitale (par tons de gris) de l'interaction d'une particule alpha dans l'hélium, enregistrée avec une chambre à image /25/; les chiffres représentent l'intensité de lumière, et la balance d'énergie est celle qui correspond à la réaction. Si l'on considère que la longueur réelle de la trace primaire est d'environ 3 cm, on se rend compte de la puissance de la chambre à image dans la restitution d'événements complexes.

Plusieurs applications de la chambre à image ont déjà été étudiées; je vais en décrire deux, pour l'imagerie Cherenkov et pour la calorimétrie électromagnétique.

5.1 La chambre à image pour la détection des anneaux Cherenkov

Dans le chapitre précédent, j'avais indiqué qu'une des limitations des méthodes électroniques employées pour la détection des anneaux Cherenkov était la difficulté de bien reconstruire des événements consistant en un grand nombre de photons ou des traces multiples. Il est bien évident que la méthode optique, véritablement bidimensionnelle et ayant un nombre d'éléments de résolution difficilement réalisable électroniquement (typiquement 500 x 500 pixels), ne souffre pas de ces limitations. Un prototype d'imageur Cherenkov basé sur la chambre à image a été développé récemment [23, 26]. Le détecteur est une chambre multi-étages, capable de gains élevés, avec une porte pulsée à la fin de la région

de dérive pour permettre la sélection des événements (fig. 22). Le dernier gap de la chambre, un élément à faces parallèles, génère l'image qui est analysée par l'amplificateur de brillance. Il a été choisi de faire fonctionner le détecteur à basse pression, pour réduire la contribution des pertes directes par ionisation des particules chargées traversant la chambre; cela permet aussi d'obtenir des gains élevés dans le mélange contenant du TMAE.

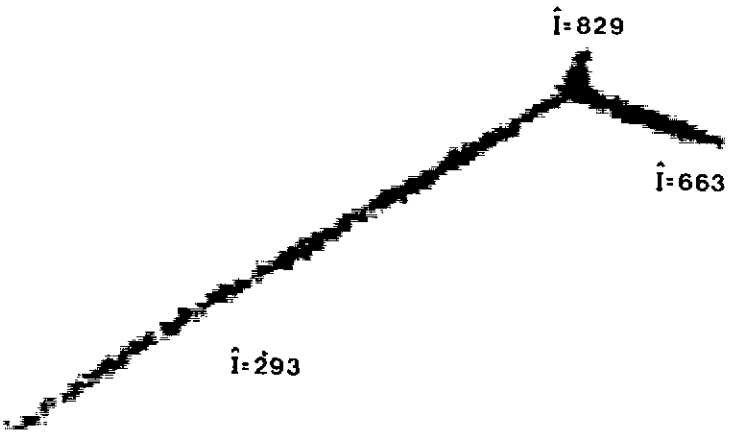


Fig. 21 Une particule α interagissant avec un noyau d'hélium, détectée avec la chambre à images; les valeurs numériques donnent l'intensité de lumière enregistrée par la caméra CCD, qui correspond à la perte d'énergie des ions.

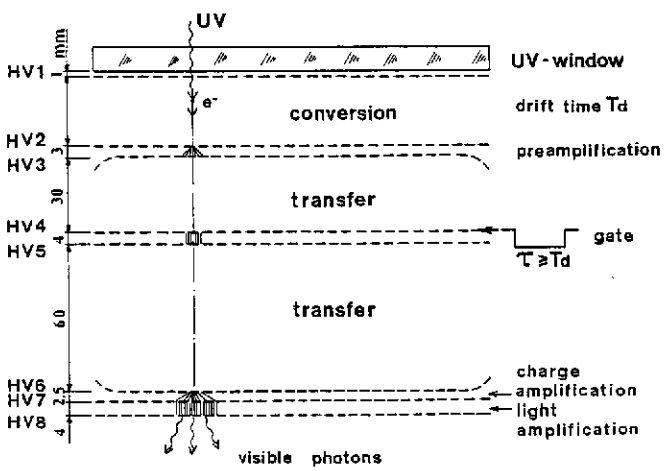


Fig. 22 Une chambre multi-étages avec porte électronique employée pour la détection de photons émis par effet Cherenkov.

La figure 23 montre un exemple d'anneau Cherenkov, enregistré avec la chambre à image dans un faisceau de particules chargées rapides; le nombre moyen des taches (chacune correspondant à un photon détecté) est de 10, et la précision de localisation (estimée par calcul du centre de gravité de chaque trace) est d'environ 2 mm.

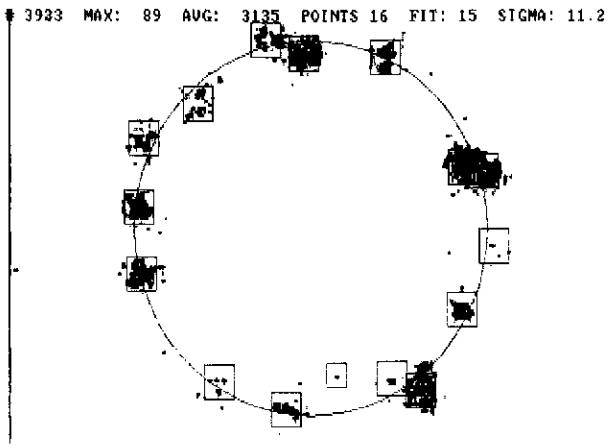


Fig. 23 Un exemple d'anneau de Cherenkov avec une douzaine d'avalanches détectées, chacune en correspondance avec un photon.

Le même type de détecteur permet aussi de voir les photons émis par effet Cherenkov dans un radiateur solide ou liquide, dans lequel se développe une gerbe électromagnétique. La forme et la position dans le plan de l'image permet en principe de déduire l'angle d'incidence du gamma qui était à l'origine de la gerbe /27/. Un exemple obtenu avec une chambre mutli-étages fonctionnant à pression atmosphérique est montré dans la figure 24 /28/.

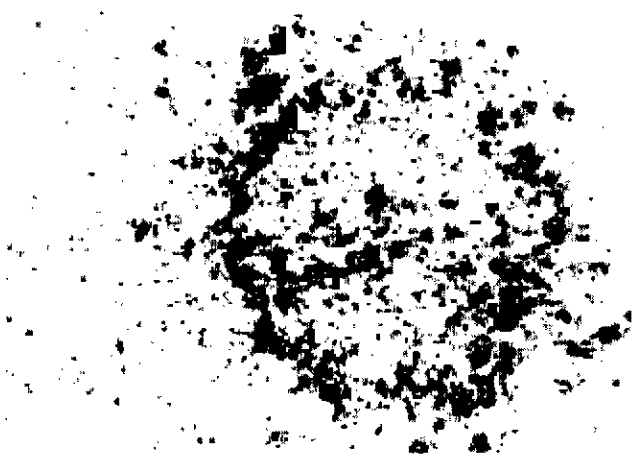


Fig. 24 Anneau de Cherenkov produit par une gerbe électronique dans un radiateur liquide épais, détecté par la chambre à images.

5.2 La chambre à images épaisse pour la calorimétrie électromagnétique

Les chambres gazeuses conventionnelles ne se prêtent pas directement à la détection des gerbes hadroniques ou électromagnétiques à cause de leur faible

masse. On les a toutefois employées comme élément sensible dans des calorimètres à échantillonnage, alternées à des couches de conversion lourdes. Une approche encore meilleure est celle de la chambre à projection épaisse, développée à l'origine par Charpak et collaborateurs pour la détection de gammas de 500 keV par une caméra à positons /29/ et adoptée depuis par plusieurs expérimentateurs pour la détection de gerbes /30/. Ces chambres contiennent une région de conversion constituée de plaques métalliques minces, parallèles et isolées entre elles, avec des canaux ouverts dans le milieu gazeux et à des potentiels tels qu'ils permettent la collection et la dérive des électrons d'ionisation vers l'élément de multiplication (une chambre proportionnelle multifils). La résolution en énergie de ce détecteur, appelé chambre proportionnelle à haute densité (HPC), est très bonne, mais les propriétés de localisation sont limitées par les problèmes habituels de résolution électronique.

Nous avons réalisé une chambre HPC à image en remplaçant la chambre proportionnelle par une chambre à avalanches avec détection de la lumière émise /31/. Deux exemples d'images obtenues avec un prototype sont montrés à la figure 25: en haut le développement d'une gerbe électromagnétique et en bas une interaction hadronique. La différence entre les deux types d'interaction est frappante, et prouve bien la puissance de la chambre à image.

Bien entendu, imbattable au niveau de la granularité, la chambre à image souffre d'une limitation sérieuse au niveau de la digitisation et de l'enregistrement des données. Les systèmes commerciaux, basés sur le standard télévisuel, ont des taux d'acquisition limités à 50 Hz; des éléments spéciaux sont probablement capables d'opérer à quelques centaines d'images par seconde. Il faut considérer toutefois que cette limitation concerne uniquement le système d'acquisition d'images; la chambre elle-même est aussi rapide qu'une chambre proportionnelle classique. En outre, en employant une structure multi-étages, on peut disposer d'un retard dans le gaz qui permet une prise de données sélective sur les bons événements; la chambre, ainsi que l'amplificateur de brillance, peuvent être activés sur une commande pulsée extérieure. Cela permet d'envisager l'utilisation des chambres à image dans des conditions de flux très élevé.

6 - APPLICATION DES CHAMBRES PROPORTIONNELLES DANS D'AUTRES DOMAINES

Depuis le début de leur développement, les chambres proportionnelles ont été utilisées, en dehors de la physique des particules, comme détecteurs de rayonnements pour des applications en biophysique, en recherche médicale et en astrophysique. Leurs caractéristiques, qui permettent une acquisition rapide et quantitative des données, en font des instruments adaptés à la recherche avancée en ces domaines. D'ailleurs, compte tenu de sa relative complexité d'exploitation (qui implique, par exemple, un système de circulation du gaz), les systèmes de diagnostic fondés sur la MWPC sont encore considérés comme étant dans une phase expérimentale.

Je me bornerai ici à décrire trois applications dans les domaines cités, choisis parmi ceux dans lesquels j'ai été directement impliqué.

6.1 Radiographie par diffusion nucléaire

La première, la radiographie par protons rapides, est celle qui se rapproche le plus de la physique des particules. Elle est fondée sur une expérience simple de diffusion nucléaire, dans laquelle les traces interagissantes et les fragments résultant de la collision sont détectés dans un ensemble de MWPC minces. L'analyse des trajectoires permet de reconstituer le vertex de l'interaction et de déduire, de la distribution spatiale des points d'interaction, la densitométrie de l'objet de l'analyse en termes médicaux, on réalise une tomographie tridimensionnelle /32/. La principale particularité de cette méthode, par rapport à celle de la tomographie par rayons X (le scanner CAT) est qu'elle n'a pas de plans de mesure préférentiels et que la totalité de l'image densitométrique est acquise en une seule exposition. En outre on a la possibilité de radiographier

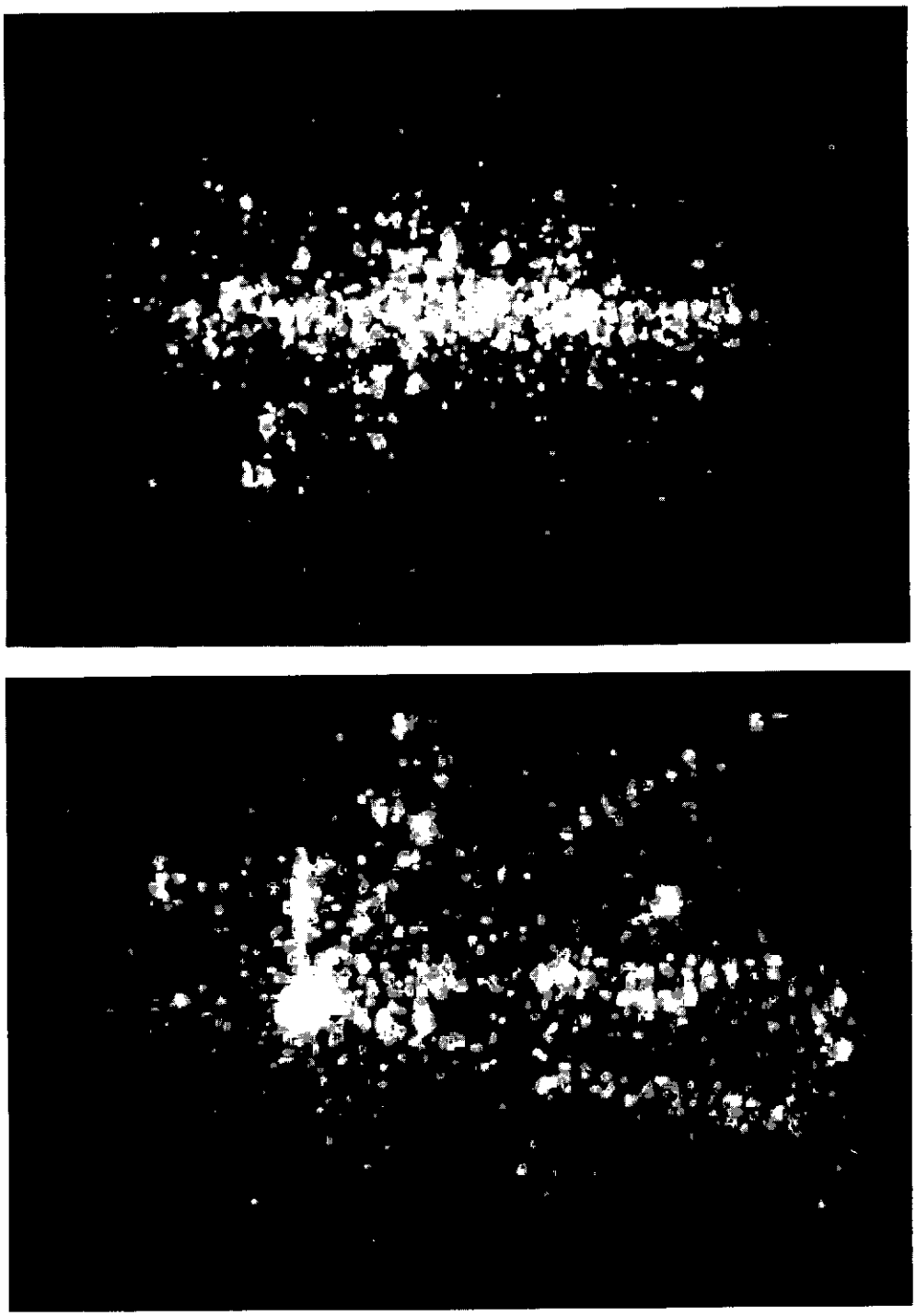


Fig. 25 Une gerbe électromagnétique (en haut) et une interaction hadronique visualisées par la chambre à images à conversion épaisse.

des solides de forte densité et de grande épaisseur tels que des lingots d'uranium, qui sont opaques aux rayons X, ce qui ouvre la voie à plusieurs applications d'intérêt industriel. La figure 26 montre un exemple de tomographie d'un moteur électrique réalisée au CEN, à Saclay. Grâce à la rapidité d'acquisition des données que permet cet appareil (environ cent mille événements par seconde), il est possible d'effectuer directement des études dynamiques ou de synchroniser la prise de données sur une phase déterminée de la rotation du moteur.



Fig. 26 Application industrielle possible de la tomographie par protons rapides: des matériaux de grande densité (sur la photographie, un moteur électrique) sont facilement analysés. Une synchronisation de la prise de données avec le mouvement du rotor permet aussi d'obtenir des images en régime dynamique (photographie CEN Saclay).

6.2 Cartes bidimensionnelles de traceurs radioactifs

La plus grande partie des préparations biologiques peuvent être marquées sélectivement à l'aide de traceurs radioactifs émettant des électrons β dont l'énergie est comprise entre quelques keV et quelques MeV. Certains isotopes, par exemple ^{3}H, ^{14}H,^{32}P et ^{131}I, peuvent remplacer les atomes correspondants d'une molécule; une carte uni- ou bidimensionnelle de leur distribution donnera des renseignements sur la composition de la préparation (à l'aide de méthodes analogues à la chromatographie classique). Etant fortement ionisés, les électrons émis sont facilement détectés et localisés par une chambre proportionnelle. Chaque désintégration étant enregistrée individuellement, un détecteur de ce type ne souffre pas des limitations propres aux méthodes photographiques, c'est-à-dire d'une gamme dynamique limitée et d'un long temps d'exposition. Les phénomènes dynamiques peuvent aussi être étudiés en enregistrant les données en fonction du temps. En outre, la possibilité de disposer des données sous forme numérique permet de leur appliquer des procédures de filtrage mathématique afin d'augmenter les contrastes et de donner au bruit un caractère stochastique. La figure 27 /33/ montre un exemple de radiochromatographie numérique de quelques couches monocellulaires, marquées au tritium et déposées sur un support plan à quelques millimètres de distance, réalisée par un groupe de l'Université de Pise. La carte d'activité est reproduite en haut, avant et après application d'un filtre mathématique de réduction du bruit (le blanc indique le maximum du comptage). Sur la moitié inférieure de l'image on voit une projection sur l'axe horizontal et une carte isométrique de l'activité. Cet instrument est utilisé dans l'étude de la reconstitution défectueuse de cellules mutantes endommagées par les rayons ultraviolets. N'étant pas destructive, cette méthode permet de multiplier la colonie cellulaire après l'obtention de la carte.

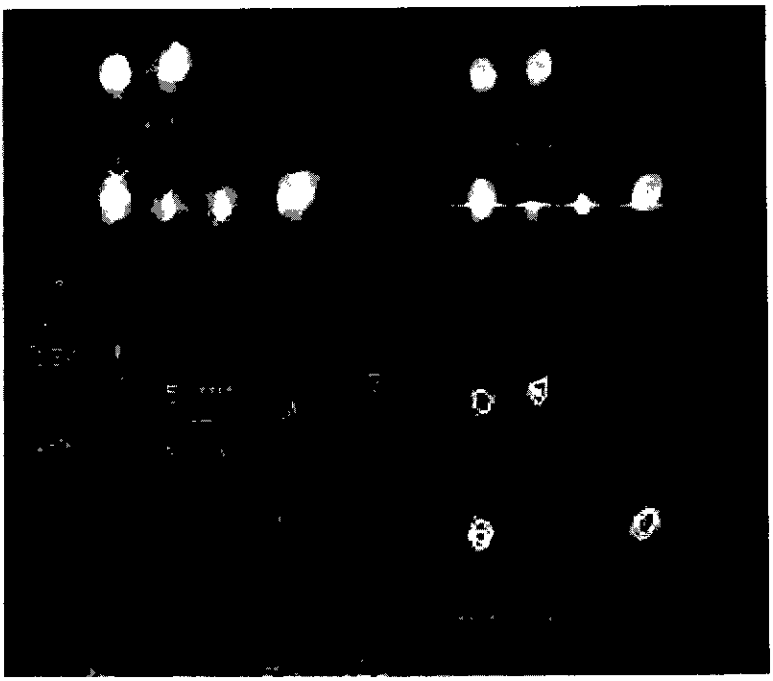


Fig. 27 Exemple d'autoradiographie numérique de composés marqués obtenue avec une chambre multifils. Dans la partie supérieure, on voit la distribution de l'activité avant et après l'application d'un filtre mathématique en vue d'améliorer les contrastes. Dans la partie inférieure, on voit la projection de l'activité sur un axe coordonné et un diagramme d'isolignes de cette préparation (photographie INFN Pise).

L'obtention d'images de bonne résolution de composés marqués à l'aide d'émetteurs d'électrons d'énergie élevée (carbone-14 par exemple) pose toutefois un problème en raison de leur parcours dans le gaz du détecteur. Nous l'avons résolu à l'aide d'une variante de la chambre multi-étages décrite précédemment. Revenant à la figure 15 et supprimant la région de conversion, on pose directement (ou au travers d'une mince fenêtre étanche au gaz) sur la deuxième électrode la préparation radioactive dont on veut étudier la carte. Les électrons émis dans le champ peuvent traverser sous des angles divers toute la structure indiquée en laissant une trace ionisée. Grâce aux caractéristiques de multiplication exponentielle par avalanche dans la zone de préamplification, seuls les premiers éléments de la trace, les plus proches du point d'émission, sont pleinement amplifiés et localisés. On a ainsi une précision de localisation submillimétrique, malgré le parcours de quelques centimètres fait dans le gaz par les électrons émis par le marqueur /34/. Ce même appareil a aussi été utilisé pour localiser les neutrons thermiques qui interagissent dans une feuille de gadolinium directement posée sur l'électrode préamplificatrice. Les électrons émis par conversion interne ont une énergie moyenne de 70 keV et ne donneraient pas une bonne localisation dans une chambre proportionnelle classique /35/.

6.3 Etude de la structure cristalline par diffraction de rayons X

Le spectre de diffraction de rayons X monoénergétiques sur les cristaux dépend, comme nous l'avons vu, de leur configuration électronique. Nombre de protéines et de macromolécules organiques, en raison de leur structure particulière, peuvent

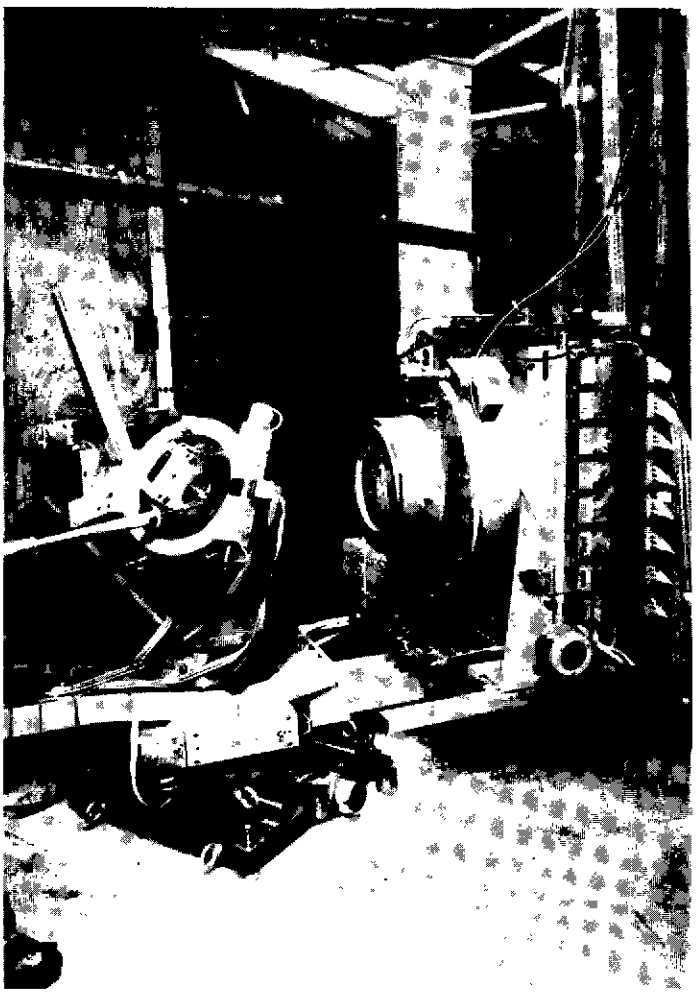


Fig. 28 La chambre proportionnelle à volume de converion sphérique utilisée pour l'analyse structurelle de macromolécules de cristaux à Orsay. Sur la gauche, on voit le goniomètre de haute précision qui permet de faire pivoter le cristal, frappé par un faisceau monoénergétique de rayons X produits par la machine à rayonnement de synchroton (photographie LAL Orsay).

être obtenues sous forme cristalline et analysées au moyen de la méthode indiquée. Cependant, compte tenu de la complexité de leur structure, les spectres de diffraction doivent généralement être détectés sur plusieurs centaines d'expositions, sous des angles et avec des énergies multiples, ceci est vrai non seulement dans le cas de molécules d'origine, mais aussi pour des molécules dont certains atomes, situés dans des emplacements déterminés, ont été remplacés par des métaux présentant des lignes d'absorption caractéristiques pour l'énergie des rayons X utilisés. Avec la création de centres de recherches spécialisés, exploitant la lumière de synchrotron émise par un accélérateur d'électrons, on peut disposer de faisceaux de rayons X monoénergétiques fortement collimatés; les électrons rapides détecteurs comme la chambre proportionnelle ont permis

d'automatiser les mesures de ce type. Nous allons décrire un détecteur particulier, la chambres proportionnelle sphérique, que nous avons construite au CERN et qui est utilisée depuis quelque temps au Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (LAL) d'Orsay.

Comme nous l'avons vu dans l'introduction, la chambre proportionnelle multifils se prête bien à la localisation des rayons X mous. Mais, pour une énergie interne comprise entre 8 et 10 keV, on ne peut obtenir une bonne efficacité de détection qu'en recourant à de notables épaisseurs de conversion. Dans le cas qui nous intéresse, la diffraction à grande ouverture angulaire sur un cristal, une structure de conversion plane entraînerait une forte erreur de parallaxe (car il n'y a pas moyen de mesurer la pénétration des photons convertis dans le gaz). Ce problème se résout en organisant une région de conversion et de migration à structure de champ radiale, centrée sur le cristal à l'aide d'électrodes de section sphérique. Les charges produites par photoionisation dans la direction du champ sont conduites vers la structure plane de détection formée par une MWPC classique /36/. La photographie de la figure 28 montre l'appareil pendant la prise de données à Orsay; le faisceau de rayons X collimaté frappe le cristal monté sur un goniomètre, et le spectre de diffraction bidirectionnel est détecté par la chambre visible à droite de la photographie. Les données recueillies par le système d'acquisition sont enregistrées sur bande pour analyse ultérieure afin de déterminer la position et l'intensité des réflexions pour toutes les rotations du cristal, ces informations servant ensuite à établir la structure de la macromolécule. La figure 29 montre un exemple de structure électronique obtenu grâce à cet appareil. La protéine analysée a une masse d'environ 10.000 Da /37/.

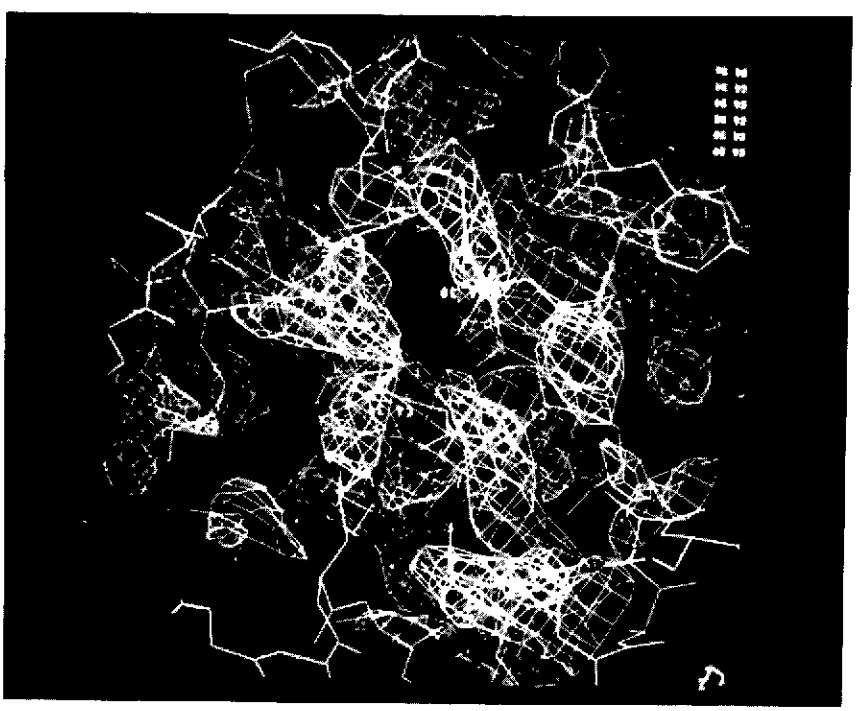


Fig. 29 Exemple de structure électronique d'une macromolécule reconstituée à Orsay au moyen de mesures de diffraction réalisées avec la chambre sphérique de la figure précédente (photographie LAL Orsay).

Grâce à la rapidité d'acquisition des données et à l'élaboration d'algorithmes de calcul semi-automatiques, on a pu résoudre en quelques jours des structures qui, il y a quelques années, eussent nécessité plusieurs mois d'analyse.

6.4 Radiographie industrielle

Pour des applications industrielles il est intéressant de trouver des moyens de rendre les chambres proportionnelles efficaces dans la détection de rayons X durs, de quelques centaines de keV. Une méthode, la chambre à dérive épaisse, ou HPC, a déjà été décrite, mais elle est beaucoup trop complexe et coûteuse pour présenter un intérêt commercial en tant qu'instrument à grande diffusion.

Récemment, un groupe opérant dans la société Schlumberger a développé une méthode alternative assez élégante pour résoudre la problème [38]. Il s'agit d'une chambre proportionnelle classique, dont la cathode est d'une feuille de conversion métallique, suffisamment mince (quelques centaine de μm) pour permettre au photoélectron produit par une conversion de rayons X de sortir et d'ioniser la gaz de la chambre. L'astuce consiste à faire arriver le faisceau de rayons X sur la feuille de conversion à un angle très petit, ce qui réduit évidemment l'acceptance angulaire, mais augmente l'efficacité. L'ensemble générateur-détecteur se déplace ensuite par rapport à l'objet pour réaliser la radiographie. Un exemple d'image obtenue (en quelques minutes) par scannographie d'une voiture est montré à la figure 30.

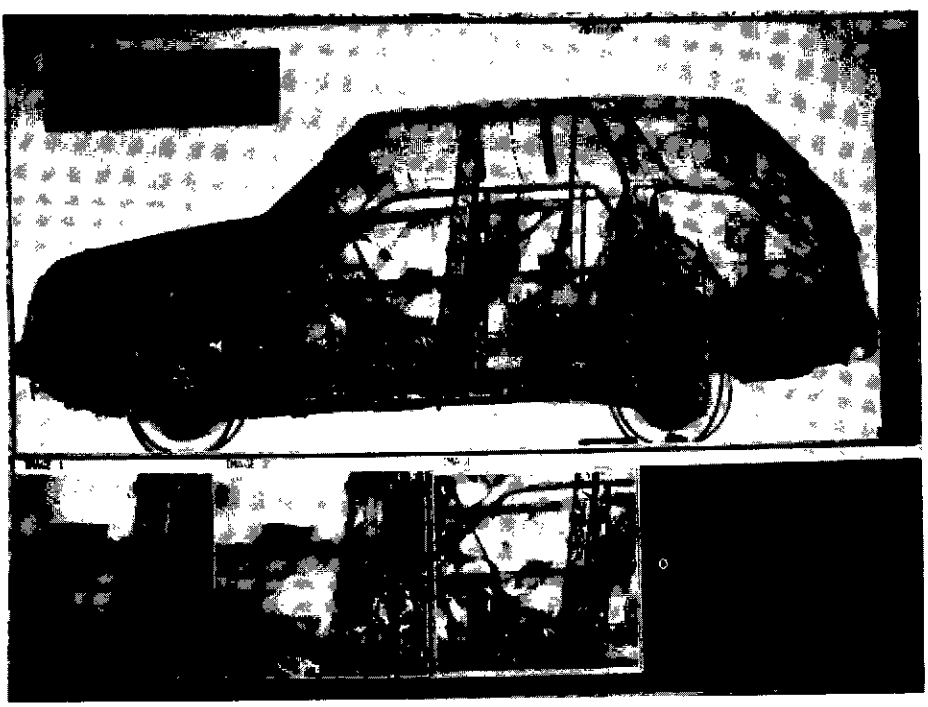


Fig. 30 Radiographie d'une voiture réalisée par la méthode qui utilise une chambre proportionnelle multifils avec convertisseur mince et une incidence rasante du faisceau de rayons X durs. (Photo Schlumberger).

7 - CONCLUSION ET RESUME

Nous nous sommes efforcés dans ces quelques notes de décrire le fonctionnement et les caractéristiques principales d'exploitation des chambres proportionnelles multifils et des diverses structures qui en découlent. Les quelques exemples de construction et d'application donnés sont loin d'être exhaustifs. En outre, les recherches en cours laissent prévoir que de nouveaux progrès seront prochainement réalisés, tant en ce qui concerne les techniques de construction que pour ce qui est de la simplicité et de la fiabilité ou des caractéristiques de fonctionnement. Ces appareils, qui sont largement utilisés aujourd'hui comme détecteurs en physique des particules, suscitent toujours plus d'intérêt chez les expérimentateurs travaillant dans d'autres domaines de recherche.

REFERENCES

/1/ G. Charpak, R. Bouclier, T. Bressani, J. Favier et C. Zupancic, Nucl. Instrum. Methods 62 (1968) 235.

/2/ L.G. Christophorou, Atomic and Molecular Radiation Physics (Wiley, New-York 1971).

/3/ F. Sauli, Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers, CERN 77-09 (1977).

/4/ G. Charpak, G. Fischer, A. Minten, L. Naumann, F. Sauli, G. Fluegge, Ch. Gottfried et R. Tirler, Nucl. Instrum. Methods 97 (1971).

/5/ G. Charpak, G. Petersen, A. Policarpo et F. Sauli, Nucl. Instrum. Methods 148 (1978) 471.

/6/ G. Charpak et F. Sauli, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 34 (1984) 285.

/7/ V. Perez-Mendez, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-23 (1976) 1334.

/8/ F. Sauli, Proc. Second Int. Conf. on Application of Physics to Medicine and Biology, Trieste, 1983 (World Scientific Pub., Singapore 1984), p. 273.

/9/ A. Breskin, G. Charpak, F. Sauli, M. Atkinson et G. Schultz, Nucl. Instrum. Methods 124 (1975) 189.

/10/ The time projection chamber, Vancouver, 1983 (Amer. Inst. Phys. Conf. Proc. 108, New York, 1984).

/11/ A.A.L. Clark et al., PEP-4 (1976).

/12/ F. Snider et al., FERMILAB-Pub-87/183-E.

/13/ M. Barranco Luque et al., Nucl. Instrum. Methods 176 (1980) 175.

/14/ H. Aihara et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-30 (1983) 63.

/15/ J. Séguinot, note de cours dans ce volume.

/16/ J. Séguinot and T. Ypsilantis, Nucl. Instrum. Methods 142 (1977) 377.

/17/ G. Charpak and F. Sauli, Phys. Lett. 78B (1978) 523.

/18/ R. Bouclier et al., Nucl. Instrum. Methods 205 (87) 403.

/19/ M. Adams et al., Nucl. Instrum. Methods 217 (1983) 237.

/20/ E. Iarocci, Nucl. Instrum. Methods 217 (1983) 30.

/21/ A. Policarpo, Space Science Instr. 3 (1977) 77.

/22/ M. Suzuki, P. Strock, F. Sauli and G. Charpak, Nucl. Instr. Meth A254 (1987) 556.

/23/ G. Charpak et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-35 (1988) 237.

/24/ D. Sauvage, A. Breskin and R. Chechik, Weizmann Inst. preprint WIS-8818 (1988).

/25/ G. Charpak et al., Nucl. Instrum. Methods A269 (1988) 142.

/26/ A. Breskin et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-35 (1988) 404.

/27/ Y. Giomataris and G. Charpak, preprint CERN-EP/88-94 (1988).

/28/ Y. Giomataris et al., preprint CERN-EP/88-96 (1988).

/29/ A. Jeavons, G. Charpak and R. Stubbs, Nucl. Instrum. Methods 124 (1975) 591.

/30/ H. Fisher and O. Ullaland, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-27 (1980) 38.

/31/ P. Astier et al., IEEE Nuclear Science Symposium NS-36 (1989).

/32/ G. Charpak et J. Saudinos, Progr. Nucl. Med. 7 (1981) 164.

/33/ R. Bellazzini et al., INFN/TC-82/1 (1982).

/34/ G. Petersen, G. Charpak, G. Melchart and F. Sauli, Nucl. Instrum. Methods 176 (1980) 67.

/35/ G. Melchart, G. Charpak, F. Sauli, F. Petersen et J. Jacobe, Nucl. Instrum. Methods 186 (1981) 613.

/36/ R. Kahn, R. Fourme, R. Bosshard, B. Caudron, J.C. Santiard and G. Charpak, Nucl. Instrum. Methods 201 (1982) 203.

/37/ R. Kahn et al., FEBS Letters 179 (1985) 133.

/38/ J. Dorion et al., IEEE Symp. Nucl. Sci. NS-34 (1987) 442.