



L'ÉVOLUTION DES DÉTECTEURS DE PARTICULES EN PHYSIQUE DES HAUTES ÉNERGIES

G. Charpak

► To cite this version:

G. Charpak. L'ÉVOLUTION DES DÉTECTEURS DE PARTICULES EN PHYSIQUE DES HAUTES ÉNERGIES. Journal de Physique Colloques, 1973, 34 (C10), pp.C10-73-C10-82. 10.1051/jphyscol:19731010 . jpa-00215474

HAL Id: jpa-00215474

<https://hal.science/jpa-00215474>

Submitted on 4 Feb 2008

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.

L'ÉVOLUTION DES DÉTECTEURS DE PARTICULES EN PHYSIQUE DES HAUTES ÉNERGIES

G. CHARPAK

CERN Genève 23 — Suisse

Résumé. — Comparaison des propriétés des divers détecteurs qui ont joué ou jouent encore un rôle important en physique des hautes énergies. Quelques travaux récents sur les chambres proportionnelles multifils et les chambres à dérive sont discutés.

Abstract. — A comparison is made between the properties of the various particle detectors which have played an important role in the evolution of high energy physics. Some recent work on multiwire proportional chambers and drift chambers is discussed.

Rien n'illustre mieux les problèmes qui attendent les physiciens travaillant avec les grands accélérateurs que la récente photographie, prise dans une chambre à bulles à hydrogène, d'une interaction d'un proton de 200 GeV avec un proton de la chambre. On voit sur la figure 1 près de trente particules produites en

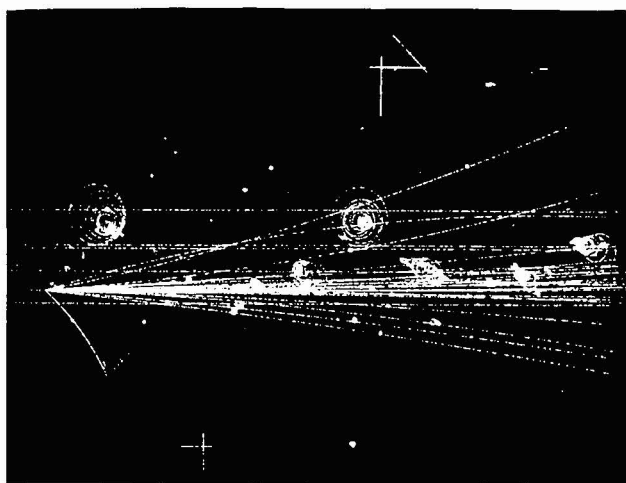


FIG. 1. — Interaction proton-proton à 200 GeV. Le cliché montre l'interaction d'un proton de 200 GeV produit par l'accélérateur américain de Batavia, dans une chambre à bulles à hydrogène.

un point émises vers l'avant dans un cône très étroit. Mesurer les coordonnées de chaque trace afin d'en déduire les coordonnées et la quantité de mouvement de toutes les particules est une tâche visiblement plus difficile qu'aux énergies plus basses ainsi que le montre la comparaison avec une interaction à 16 GeV dans une chambre à hydrogène (Fig. 2).



FIG. 2. — Interaction proton-proton à 16 GeV. Le cliché montre l'interaction d'un proton de 16 GeV, produit par le synchrotron du CERN, dans une chambre à bulles à hydrogène de longueur 2 m.

Pour étudier des réactions de cette complexité, il faut connaître la position des particules, leur quantité de mouvement et, si possible, leur nature. Sinon comment savoir si ces particules sont émises dans des processus statistiquement inextricables ou bien si certains ensembles ne sont pas émis, par exemple, par des particules, inconnues, très lourdes, dont la recherche est un des stimulants à cette course aux énergies plus élevées.

Les outils dont nous disposons s'avèrent être assez imparfaits pour ces tâches nouvelles et depuis quelques années un effort de pensée, probablement insuffisant, a été consacré à la recherche de méthodes nouvelles mieux adaptées à nos futures tâches. Lorsque des

TABLEAU I

Quelques caractéristiques des détecteurs de particules utilisés en physique des hautes énergies

Détecteurs visuels	Résolution spatiale	Résolution temporelle	Fréquence de répétition	Observations
Chambres à brouillard [1]				
à détente	0,3 mm	1/10 s	1/mn	Milieu gazeux
à diffusion	0,3 mm	∞	continu	Milieu gazeux
Emulsions photographiques [2]	1 μ m	∞	continu	Milieu d'interaction imposé par l'émulsion. Peut accepter un faible pourcentage de charges additionnelles
Chambres à bulles [3]	70 μ m	1 ms	1/s	Le milieu d'interaction peut être choisi à volonté de l'hydrogène aux liquides lourds
Chambres à étincelles [3]	à 1 mm	1 μ s	10/s	La précision dépend de l'angle d'incidence
Hodoscopes à tubes de verre [3]	à 1 mm	1 μ s	10/s	De récents développements utilisent des tubes de plastique flexibles
Chambres à streamers [3]	1 cm	1 μ s	10/s	
Détecteurs digitaux				
Compteurs Geiger	0,2 mm	1 μ s	100/s	La précision dépend de l'angle d'incidence
Compteurs proportionnels	à 1 mm	20 ns	10 ⁶ /s/cm ²	
Compteurs à scintillations	0,05 mm	5 ns	10 ⁶ /s/cm ²	Adapté à des détecteurs de très grande surface
Chambres à étincelles automatiques [4]	à 0,5 mm			
Chambres proportionnelles [4]				
Chambres à dérive [5]-[9]				

monstres tels que des spectromètres de plusieurs centaines de mètres de longueur sont proposés auprès des grands accélérateurs, lorsque des compteurs Cerenkov de plus de 100 m sont en construction, il est clair qu'il existe une stimulation puissante aux progrès des méthodes de détection.

J'ai commencé par évoquer les problèmes nouveaux soulevés par l'apparition en physique de faisceaux de particules dans une nouvelle gamme d'énergie. Ce n'est certes pas le seul facteur qui nous contraigne au progrès. Il ne faut pas oublier le développement parallèle de techniques nouvelles dont nous gratifient les progrès dans l'industrie ou l'ingéniosité de nos collègues d'autres disciplines ; pour ne citer qu'un exemple : les détecteurs semi-conducteurs ont bouleversé la physique nucléaire expérimentale aux basses énergies.

Enfin, un des facteurs essentiels qui préside aux progrès des détecteurs tient aux questions même que se posent les physiciens des hautes énergies. Ces questions varient au cours du temps, et des détecteurs se démodent simplement parce qu'ils ne correspondent plus au niveau de nos connaissances acquises.

Je voudrais par mon exposé vous donner une idée de l'évolution des détecteurs utilisés en physique des hautes énergies, au cours de ces deux dernières décennies.

1. Les principaux détecteurs de particules. — Il existe une grande variété de détecteurs et je me bornerai à ceux qui ont joué un rôle effectif dans l'histoire des

découvertes en physique des hautes énergies ou bien ceux qui sont l'objet actuellement de recherches intenses.

Le tableau I offre une comparaison entre les caractéristiques des détecteurs. J'ai omis de ce tableau certaines variantes de détecteurs mentionnés : par exemple, les chambres à bulles à recyclage rapide, qui peuvent être déclenchées vingt fois par seconde, les chambres à scintillations qui ont fait l'objet d'études poussées juste avant que les chambres à étincelles ne fassent leur apparition et les rendent caduques, les détecteurs à semi-conducteurs dont l'utilisation est marginale encore dans notre discipline.

J'ai classé en deux grandes catégories les détecteurs : ceux dont l'information est obtenue sur une photographie (les détecteurs visuels) et ceux dont les résultats sont stockés par des techniques électroniques (mémoires diverses, bandes magnétiques).

2. Les chambres à brouillard et les émulsions nucléaires. — Ce furent les outils essentiels à l'origine de la physique des particules élémentaires.

Leur trait essentiel est la perfection avec laquelle ils enregistrent les configurations les plus complexes. Il suffisait d'un cliché « anormal » pour mettre le physicien sur la voie d'une découverte fondamentale. Citons par exemple à leur actif, la découverte des V, particules neutres se désintégrant en deux particules chargées, mésons K_0 ou bien baryons Λ (Fig. 3). Dans certains cas la découverte d'un ou deux événements était suivie d'une période stérile d'une ou

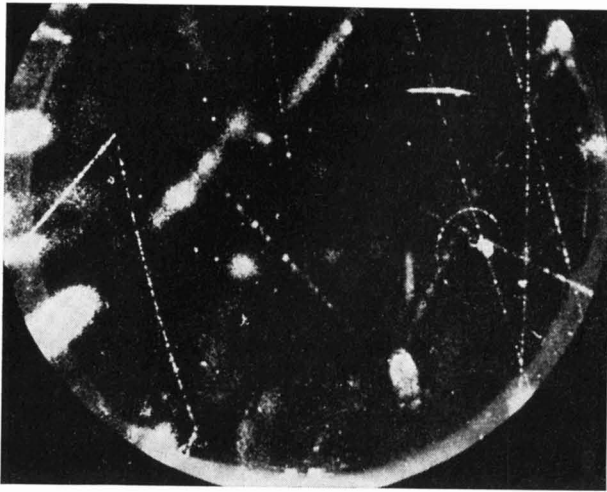


FIG. 3. — Un événement rare dans une chambre à brouillard. On voit sur la gauche la désintégration d'une particule étrange neutre, produite par les rayons cosmiques dans une plaque placée au-dessus de la chambre. On observe la désintégration $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$. La courbure des trajectoires permet de déterminer la masse de cette particule, environ 2 200 fois celle de l'électron. Un seul cliché de cette sorte était suffisant pour donner une forte indication en faveur de l'hypothèse d'une nouvelle particule.

ARMENTEROS, R., BARKER, K. H., CACHON, H. et CHAPMAN, A. H., *Nature* 167 (1951) 501.

plusieurs années pendant lesquelles personne ne retrouvait de tels phénomènes, mais la quantité d'informations contenue dans un tel cliché était telle qu'une coïncidence accidentelle de phénomènes connus simulant une telle configuration était improbable et, en général, rejetée par le physicien heureux d'avoir trouvé un phénomène nouveau. Inutile de dire que bien de faux espoirs ont été déçus dans ces recherches basées sur des événements rares.

La situation avec les détecteurs digitaux est tout autre et les phénomènes rares sont plus facilement inventés par l'appareil.

Au sommet de la gloire des chambres de Wilson, lorsqu'elles furent installées dans des observatoires en haute montagne, on obtenait environ une particule étrange par jour se désintégrant dans la chambre. Cette maigre récolte a suffi à établir les bases essentielles de la classification de ces particules : lorsque les accélérateurs sont apparus, les produisant en faisceaux intenses, ces détecteurs se sont trouvés inadéquats en raison d'une propriété qui n'était nullement un défaut tant que la source de particules était constituée par les rayons cosmiques : leur incapacité à enregistrer un grand nombre d'événements. Ce fut le cas de la chambre de Wilson, parce qu'on ne peut pas la pulser à un rythme supérieur à une détente toutes les cinq minutes pour lui permettre de retrouver son équilibre thermique entre deux expansions, et ce fut aussi le cas de l'émulsion nucléaire. Celle-ci n'est pas pulsée mais elle ne peut servir qu'à l'étude des phénomènes dont la probabilité de pro-

duction dans une collision aux hautes énergies est très grande ; sinon il serait nécessaire d'examiner un nombre trop grand de traces, tâche très fastidieuse.

J'ai présenté un cliché caractéristique d'un événement rare obtenu avec l'émulsion nucléaire (Fig. 4) :

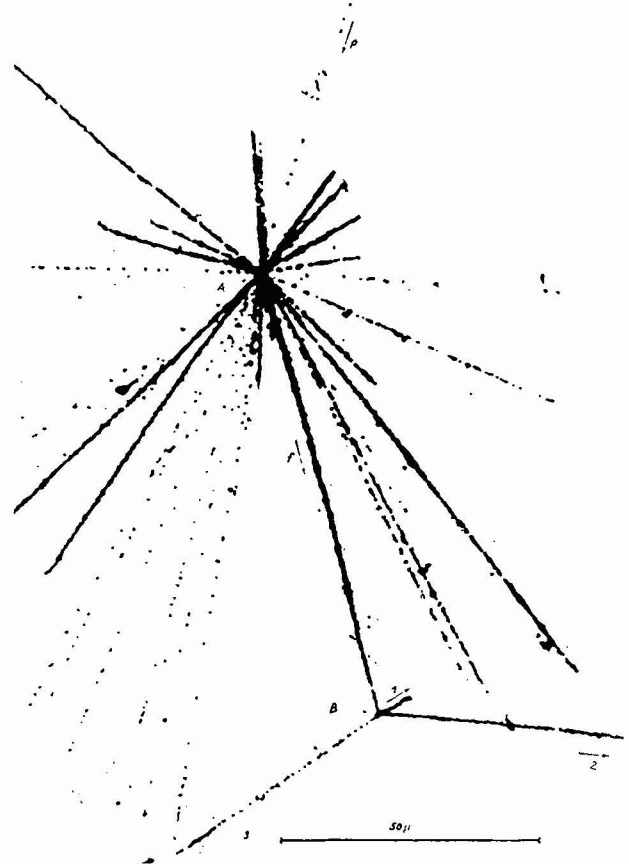


FIG. 4. — La découverte d'un phénomène nouveau dans une émulsion photographique. C'est la première observation de la désintégration retardée d'un noyau : un fragment nucléaire f, de charge ~ 5 e s'arrête en B et se désintègre par émission de trois particules chargées rapides, dont l'une provient probablement, d'après le bilan d'énergie, d'une particule étrange neutre, le Λ . On appelle hypernoyau ces noyaux exotiques où un nucléon est remplacé par un hyperon.

DANYSZ et PNIEWSKI, *Phil. Mag.* 44 (1953) 348.

la découverte des hypernoyaux, car il met en évidence une qualité pour le moment irremplaçable des émulsions : leur capacité de mise en évidence de désintégration très proches du lieu de production de l'interaction : de l'ordre de quelques microns. D'ailleurs chaque fois qu'un grand accélérateur est mis en marche les vieux routiers des émulsions sont enclins à exposer des émulsions nucléaires dans l'espoir de découvrir des configurations inattendues et intéressantes.

Mais la mise en œuvre, en 1948 et 1953, des premiers accélérateurs produisant des faisceaux de mésons ou de particules étranges a mis ces détecteurs sur la touche. Ils étaient incapables de faire face à la richesse d'information qui coulait de ces faisceaux intenses de π , μ , K, antinucléons. C'est en réfléchissant aux nécessités nouvelles introduites par les machines

qu'un jeune physicien américain, D. Glaser, inventa la chambre à bulles qui fut une source essentielle de découvertes pendant ces quinze dernières années.

3. La chambre à bulles. — La chambre à bulles s'est imposée en raison des qualités suivantes :

On peut la remplir de n'importe quel liquide. Cette propriété capitale a permis de développer les chambres géantes à hydrogène liquide. Sur le plan de l'art de l'ingénieur, ce n'est pas sans orgueil que les physiciens de cette branche peuvent contempler ces monstres contenant plusieurs mètres cubes d'hydrogène liquide et dont la détente contrôlée permet de mesurer des trajectoires avec cette précision assez extraordinaire : une centaine de microns.

On peut examiner tous les détails d'une interaction autour du point de production. La longueur de radiation (10 m) est suffisamment grande pour que la plupart des traces produites soient peu perturbées dans leur trajectoire et puissent donc être mesurées avec précision.

La chambre est en général déclenchée toutes les secondes. Elle est sensible pendant 1 milliseconde environ. On prépare les faisceaux pour que la chambre reçoive pendant son temps de sensibilité la quantité maximum de particules qu'on peut examiner sur un cliché : vingt traces.

Un défaut majeur de la chambre, qui sera peut-être la raison de sa disparition, est qu'elle n'a pas de mémoire, contrairement à la chambre de Wilson par exemple. On ne peut pas la déclencher sur un phénomène sélectionné d'avance par des compteurs. Elle est donc limitée uniquement aux phénomènes dont la probabilité de production n'est pas trop petite pour qu'ils soient vus dans une expérience typique de chambre à bulles : 1 million de clichés avec vingt traces ayant une longueur de 1 m environ, soit 60 événements pour une section efficace de 1 μb .

Les phénomènes trop rares pour être produits dans un millier de kilomètres de traces sont donc exclus de l'étude au moyen des chambres à bulles. Les limites de l'utilisation des chambres à bulles dans les phénomènes rares ont été reculées par le fait qu'on a appris à préparer des faisceaux séparés de particules rares : mésons K, voire hypérons (avec les très grandes machines en construction), neutrinos.

Très caractéristiques à cet égard sont les expériences sur les neutrinos avec les chambres à bulles. On prépare des faisceaux ne contenant que des neutrinos arrivant par bouffées pendant le temps de sensibilité des chambres à bulles remplies soit d'un liquide lourd soit d'hydrogène. Malgré l'extraordinairement petite section efficace d'interaction, on arrive à accumuler ainsi des clichés de milliers d'événements produits par les neutrinos. La richesse en informations de ces clichés est telle que ces chambres restent même dans ce domaine un outil très compétitif. La figure 5 montre une interaction d'un neutrino avec un noyau dans Gargamelle, la chambre à liquide lourd du CERN.

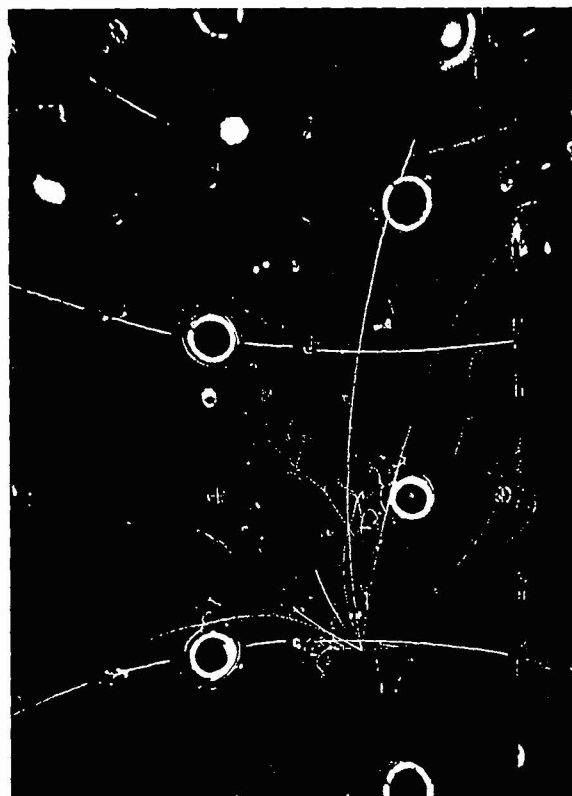


FIG. 5. — Interaction d'un neutrino dans une chambre à bulles : $\bar{\nu} + (N) \rightarrow \mu^+ + \pi^+ + \pi^- + \pi^- + \pi^0 + \pi^0 + (N)$, (N) nucleon. On voit sur le cliché un anti-neutrino produit par le synchrotron du CERN produisant une réaction inélastique sur un nucléon d'un atome du liquide de Gargamelle, chambre à bulles de 10 m³ remplie de CF_3Br , de longueur 5 m.

L'impossibilité pour les chambres à bulles d'être déclenchées par des événements spécifiques a conduit au développement parallèle de détecteurs beaucoup plus imparfaits sur le plan de la qualité des traces, mais qui jouissaient de cette propriété, les chambres à étincelles. Elles ont connu des développements qui les font souvent préférer aux chambres à bulles en raison des questions que nous nous posons à l'étape actuelle de nos connaissances ; mais il est hors de doute que cette étape n'a été atteinte que grâce à la richesse des informations que nous ont fournies les chambres à bulles.

4. Les chambres à étincelles. — Le passage d'une particule chargée libère des électrons et des ions positifs dans un gaz. Il est aisé, soit avec des champs de balayage faibles, de l'ordre de 100 V/cm, soit avec des additifs électro-négatifs soigneusement dosés, de garder des électrons libres pendant une durée voisine de 1 μs , temps nécessaire pour prendre une décision logique à l'aide de compteurs auxiliaires très rapides.

L'application soudaine de la haute tension ($\sim 10 \text{ kV/cm}$) provoque une étincelle dont les germes sont les électrons libres, rendant visible la trajectoire grâce à la série d'étincelles dans des chambres successives.

A partir de 1960 ces chambres ont joué un rôle essentiel dans la physique des hautes énergies. Malgré la qualité très imparfaite de leurs traces, comparées à celles d'une chambre à bulles, elles ont été un outil incomparable en physique des hautes énergies.

Elles ont permis de découvrir des particules difficiles à détecter : neutrinos associés aux muons par exemple ; des modes de désintégration peu courants : la désintégration occasionnelle du K_L^0 en deux pions, qui constitue une violation d'une loi de symétrie fondamentale dans les interactions faibles et, enfin, elles ont permis de faire des mesures d'une bonne précision statistique relativement à des phénomènes rares.

Toutefois, l'utilisation du film photographique pour stocker l'information limite cette précision statistique. Le nombre maximum de clichés que l'on peut prendre dans une expérience est voisin de celui d'une expérience de chambres à bulles : 1 million environ.

En général, il est rare que l'on demande à une chambre à étincelles d'autres informations que la position de la trajectoire de particules chargées traversant une chambre en très petit nombre. Il arrive parfois que l'on demande plus. La densité d'ionisation ou le développement de gerbes dans la matière des plaques peut fournir des renseignements sur la nature de la particule (Fig. 6).

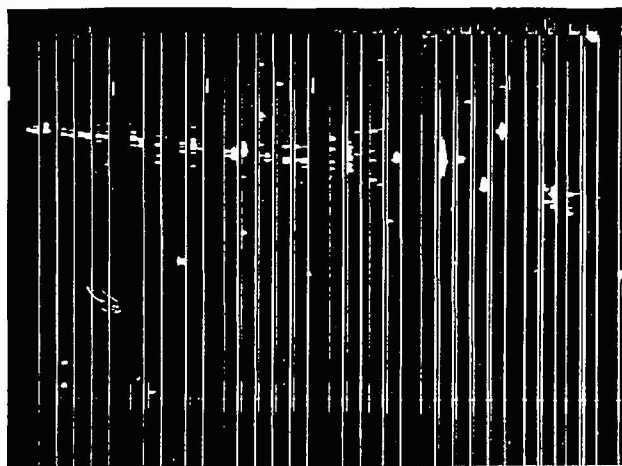


FIG. 6. — Interaction d'un électron dans une chambre à étincelles. On voit sur ce cliché un électron de haute énergie traversant les plaques d'une chambre à étincelles. La cascade d'électrons produite se reflète grossièrement dans les étincelles réparties le long de la trace. L'information est suffisante toutefois pour distinguer la trace d'un électron de celle d'un muon qui ne produit pas de gerbes d'électrons. Ce trait fut décisif dans la découverte du deuxième neutrino existant dans la nature, celui qui est associé à la production des muons dans la désintégration des pions. En effet, il ne produit que des muons lorsqu'il interagit avec la matière.

Elle reste toutefois un instrument trop imparfait dans ce domaine comparé aux chambres à bulles ou aux chambres à darts et il est en général impossible de se fier à un cliché isolé pour identifier un phénomène rare.

5. Les chambres à darts ou à streamers. — Dans la chambre à darts la distance entre les électrodes est très grande, de l'ordre de 25 cm. On applique, après le passage de la particule, une impulsion de tension tellement brève (~ 40 ns) que les avalanches se développent sur une longueur limitée (5 à 20 mm) ; la lumière émise par les « streamers » ou darts est malheureusement faible et il faut opérer avec des films très sensibles et des ouvertures très grandes. Mais on a une excellente image quelle que soit la complexité de l'événement. On peut aisément introduire la cible à hydrogène dans la chambre.

Il est aisé de réaliser des chambres de très grandes dimensions et il est possible que cette technique joue un grand rôle aux très hautes énergies. Dolgoshein, un des inventeurs de ce détecteur, utilise actuellement des chambres de 8 m de longueur auprès de l'accélérateur de Serpoukhov. Son avantage par rapport à une chambre à bulles est que la longueur d'interaction est beaucoup plus grande dans le gaz que dans le liquide, ce qui pour des événements à très haute multiplicité donne une grande probabilité d'observer et mesurer un événement complet sans que les particules interagissent dans le milieu de mesure.

La figure 7 montre une gerbe produite par des électrons dans la paroi d'une chambre à dart actuellement utilisée auprès des anneaux de stockage du CERN.

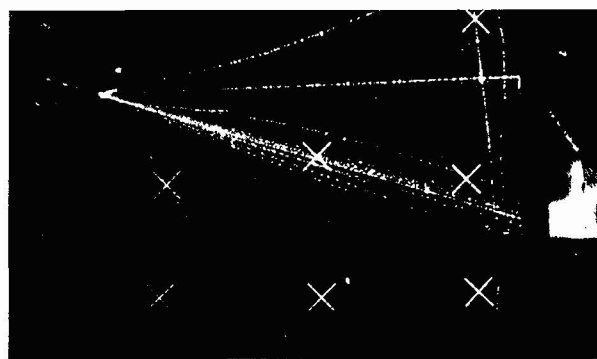


FIG. 7. — Chambre à darts. Interaction d'un électron rapide avec la paroi d'une chambre à darts. Longueur 2,60 m, largeur 1 m, profondeur 2×25 cm. Impulsion de 400 kV, largeur 40 ns, gaz de remplissage : néon-hélium.

6. Les détecteurs sans enregistrement photographique. — 6.1 LES HODOSCOPES A COMPTEURS. —

Divers compteurs ont joué un rôle important dans le développement de la physique : les compteurs Geiger et les compteurs proportionnels ont été les instruments de découvertes décisives. Ils ont été détrônés par les compteurs à scintillations, qui sont des instruments très répandus dans la physique des hautes énergies. Leur temps de résolution très bas, porté par certains expérimentateurs habiles jusqu'à 0,2 ns, permet la sélection d'événements dans des faisceaux intenses. Ils sont utilisés parfois pour localiser les particules en utilisant un grand nombre de

scintillateurs, jusqu'à 1 000 dans certaines expériences, ou bien en localisant la position de l'impact de la particule par le temps de propagation de la lumière dans le scintillateur.

Dans ce domaine toutefois leur usage est très limité en raison du coût élevé de chaque élément et si certaines expériences utilisent jusqu'à 1 000 photomultiplicateurs, c'est probablement le maximum que l'on puisse raisonnablement atteindre.

Les chambres à étincelles sans photographie ont été l'élément essentiel dans le développement des mesures automatiques de coordonnées des trajectoires.

6.2 LES CHAMBRES A ÉTINCELLES AUTOMATIQUES. — Ce sont les compteurs à scintillations qui sélectionnent les événements à mesurer. Ils déclenchent les chambres à étincelles qui transmettent à des calculatrices en ligne les coordonnées très précises des trajectoires matérialisées par des étincelles.

Un très grand nombre de méthodes ont été inventées pour extraire d'une chambre à étincelles les coordonnées de l'étincelle sans passer par le stade de la photographie.

La première méthode, et qui est encore en usage, fut de regarder les chambres avec des caméras de télévision décodées par des calculatrices. La figure 8

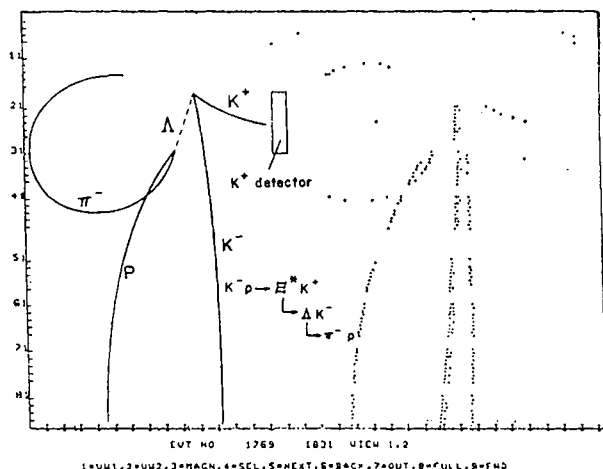


FIG. 8. — Chambre à étincelles sans photographie. On voit sur ce cliché, à droite, la reconstruction par une calculatrice d'un événement vu dans une chambre à étincelles par une caméra de télévision couplée directement à la calculatrice. On voit à gauche l'événement interprété par les physiciens qui ont construit leur système de déclenchement pour que les chambres ne soient déclenchées que sur cet événement hautement improbable, la création d'un Ξ .

montre un événement rare, reconstitué en ligne par une calculatrice couplée à une caméra « Plumbicon » qui enregistre les étincelles produites dans un détecteur géant, l'Oméga au CERN. C'est un ensemble de chambres à étincelles qui remplit un volume de 10 m^3 de champ magnétique. On a pu ainsi augmenter d'un ordre de grandeur le nombre d'événements étudiés, par rapport à la méthode photographique.

Cette étape a mis en évidence qu'un des goulots d'étranglement n'était plus seulement la capacité d'enregistrement ou de stockage des informations, mais aussi le temps de calcul nécessaire pour reconstituer les événements. L'avantage essentiel des méthodes digitales n'est pas seulement l'augmentation du nombre d'événements traités, mais le fait que l'on dispose de résultats préliminaires de l'expérience en cours et que l'on peut ainsi agir sur son développement, contrairement aux méthodes basées sur l'analyse de clichés.

Les chambres à étincelles automatiques ont permis de mesurer avec précision des phénomènes connus. Elles ont rencontré de sérieux échecs dans la recherche de phénomènes rares. Leur défaut essentiel réside dans le fait que leur efficacité décroît avec le nombre de particules qui les traversent et dépend étroitement de la distance entre les trajectoires voisines. Il peut donc facilement y avoir des corrélations introduites artificiellement par les chambres. Un nombre appréciable de fausses particules a été ainsi découvert avec les chambres à étincelles. Par contre, pour préciser la section efficace ou des modes de désintégration de résonances connues, elles ont été un instrument de grande efficacité.

7. Les chambres proportionnelles. — En 1968, nous avons pu montrer qu'il était possible de construire des chambres à fils dont chaque fil était un détecteur indépendant fonctionnant de façon continue.

Une précision spatiale de l'ordre de 1 mm pouvait être atteinte, comme dans les chambres à étincelles, mais avec des avantages substantiels :

— La résolution en temps est 10 à 50 fois meilleure. Elle atteint 25 ns pour des fils distants de 2 mm.

— Le taux de répétition n'est limité pratiquement que par les amplificateurs dont chaque fil est muni. Le temps mort est de 50 ns avec certains circuits ; c'est donc un gain d'au moins 1 000 sur les chambres à étincelles.

— La chambre n'a pas besoin de compteurs auxiliaires pour enregistrer un événement.

Tous les fils d'une chambre peuvent participer à la décision concernant le choix d'un événement et son stockage éventuel dans la mémoire constituée par des circuits électroniques, extérieurs à la chambre.

Très rapidement se sont développées des expériences utilisant les chambres proportionnelles avec quelques milliers de fils. Très typique à cet égard est l'expérience étudiant la désintégration du K_L^0 en deux pions chargés.

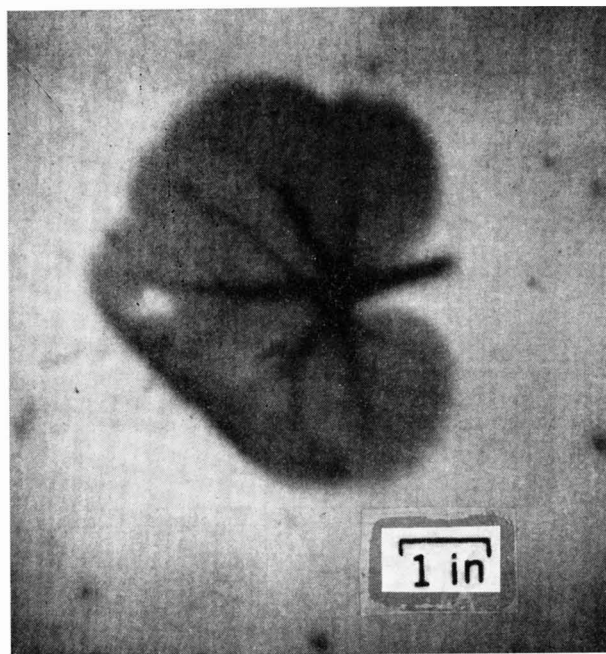
Cette désintégration fut longtemps considérée comme interdite par une loi de symétrie régissant des interactions faibles. Il fut découvert que cette loi était violée et que dans un cas sur mille environ le méson K_L^0 se désintègre suivant cette voie. La découverte fut faite à l'aide de compteurs à scintillations et

de chambres à étincelles avec 15 événements environ. Avec le système des chambres proportionnelles utilisé au CERN, on peut sélectionner près de 1 000 événements par seconde attribués à cette désintégration et se livrer à une étude qui nécessite des centaines de millions d'événements pour que la précision statistique atteigne la précision requise.

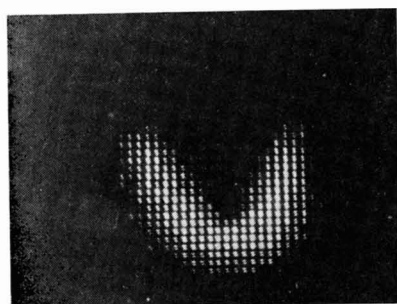
Cette expérience a conduit à stocker une information nécessitant près de 5 000 bandes magnétiques et illustre bien le besoin qui se fait sentir d'imaginer

d'autres méthodes d'accumulation des données, sujet sur lequel divers groupes au CERN sont très actifs.

On peut dans une chambre proportionnelle déterminer les deux coordonnées d'une avalanche. Ceci est très important pour la localisation des rayonnements neutres : γ et neutrons. D'importantes applications sont en voie de développement pour la localisation des rayons X en diffractométrie x ou bien pour la localisation des rayonnements γ émis par des radioéléments absorbés par des êtres vivants. Les clichés de la figure 9 illustrent ces deux applications :



(a)



(b)

FIG. 9. — Radiographie d'une feuille obtenue avec une chambre proportionnelle. Pour la détection des rayons X ou γ , il est indispensable de disposer d'un détecteur autodéclenché et donnant la mesure des deux coordonnées de l'électron secondaire de basse énergie produit par les rayonnements neutres. Des travaux sont en cours pour réaliser des détecteurs de grandes surfaces par cette technique : a) Photographie de l'image obtenue sur un oscilloscope à partir de la lecture des coordonnées des avalanches produites dans une chambre par les rayons X de 6 keV placés derrière la feuille (Groupe Perez-Mendez, Radiation Laboratory, Berkeley). b) Distribution des rayons γ émis par l'iode 131 absorbé par une thyroïde humaine obtenue à l'aide d'une chambre proportionnelle (R. Allemand et coll., CENG Grenoble).

8. Les chambres à dérive (ou à migration). — Les chambres à dérive sont des sœurs jumelles des chambres proportionnelles. Nous avons observé que le moment de l'apparition d'une impulsion sur un fil dépend de la distance de la trajectoire au fil. On peut construire des détecteurs dans lesquels les électrons libérés dans le gaz par le passage d'une particule dérivent à vitesse constante dans un champ électrique et sont finalement détectés sur un fil de compteur proportionnel [5], [6]. La mesure du temps de dérive fournit la distance au fil (Fig. 10).

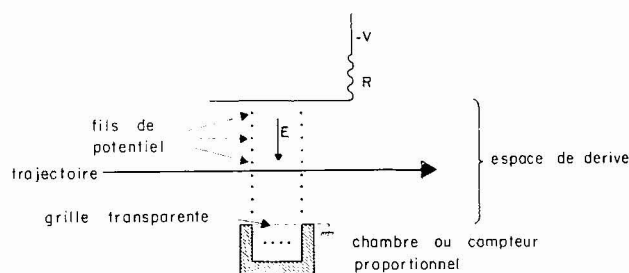


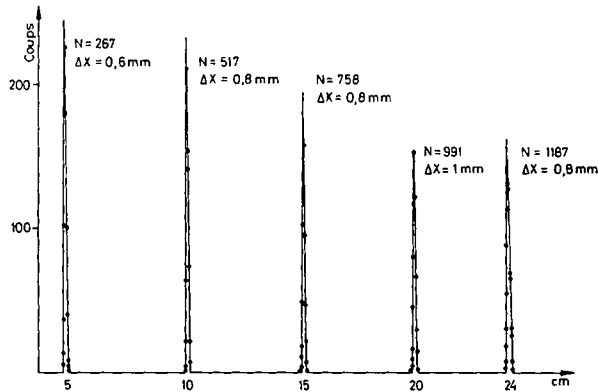
FIG. 10. — Chambres à dérive à champ électrique constant. Les particules libèrent des électrons dans l'espace de dérive (réf. [5], [6]). En mesurant le temps mis par ces électrons pour atteindre le fil, on mesure avec précision la position de la trajectoire.

A Saclay, le spectromètre de 1 GeV auprès de Saturne est équipé de chambres fonctionnant suivant ce principe. Les électrons dérivent sur 50 cm avant d'arriver sur le fil où ils fournissent le signal d'arrivée. Le signal de départ est fourni par un scintillateur [7].

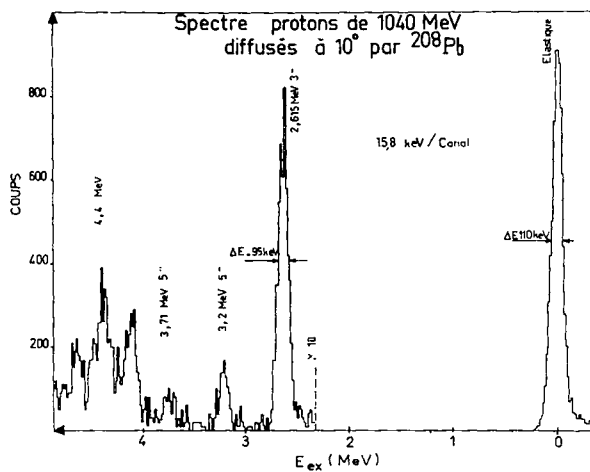
La figure 11a montre la réponse d'une chambre de 25 cm.

La figure 11b montre un spectre ainsi obtenu dans ces chambres.

Un groupe de Heidelberg a également développé cette méthode. La structure multifils est essentiellement préservée avec une distance de 1 cm entre les fils. Malgré le champ électrique inhomogène un choix judicieux de gaz de remplissage permet une relation quasi linéaire entre le temps et la position, et une bonne précision est atteinte : 0,4 mm. L'ambiguïté droite-gauche est levée en utilisant un doublet de fils pour l'amplification, [8].



(a)



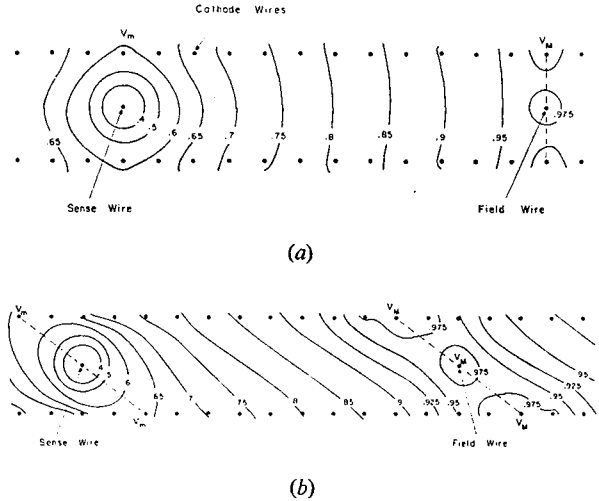
(b)

FIG. 11. — Précision obtenue dans les chambres à dérive de Saclay. *a)* Etalonnage avec des faisceaux de largeur 0,6 mm. On voit que la précision ne se dégrade pratiquement pas sur 25 cm. Plus récemment des chambres à dérive de 50 cm ont été utilisées par ce groupe. *b)* Spectre typique obtenu avec le spectromètre à protons de 1 GeV, équipé de chambres à dérive. Une résolution de 10^{-4} est obtenue avec ce spectromètre.

Un des grands intérêts de la chambre à dérive est sa grande précision. Nous avons récemment obtenu des précisions de l'ordre de 50 μ avec des chambres ayant la distribution des potentiels représentés sur la figure 12a [9]. En l'absence de champ magnétique, le champ électrique est uniforme dans la plus grande partie de la chambre et parallèle au plan des cathodes.

Avec un champ magnétique les électrons sont déviés en raison de la force de Lorentz. Dans le cas le plus défavorable, avec un champ magnétique parallèle aux fils, cette force dévie les électrons vers la cathode. Nous avons vérifié qu'après un centimètre, dans un champ de 15 kG, les électrons n'arrivent plus sur le fil. Avec le potentiel électrique modifié (Fig. 12b), cet effet est corrigé et les électrons sont attirés sur le fil quelle que soit leur distance du fil (Fig. 13).

La précision que nous avons atteinte est obtenue en utilisant pour la mesure le temps de l'arrivée du



(b)

FIG. 12. — Structure de chambres à dérive multifils. *a)* En l'absence de champ magnétique un champ électrique uniforme est assuré en appliquant un potentiel variable le long de la cathode. Avec une distance entre les fils de 5 cm, un champ de dérive de 500 V/cm, on obtient une vitesse de 5×10^6 cm/s et une précision qui va de 50 μ m près du fil à 200 μ m à 2,5 cm du fil. Gaz de remplissage : argon, isobutane, méthylal (réf. [9]). *b)* En présence d'un champ magnétique parallèle aux fils, il est nécessaire d'appliquer un champ électrique dans une direction différente de celle de la vitesse de migration des électrons [9].

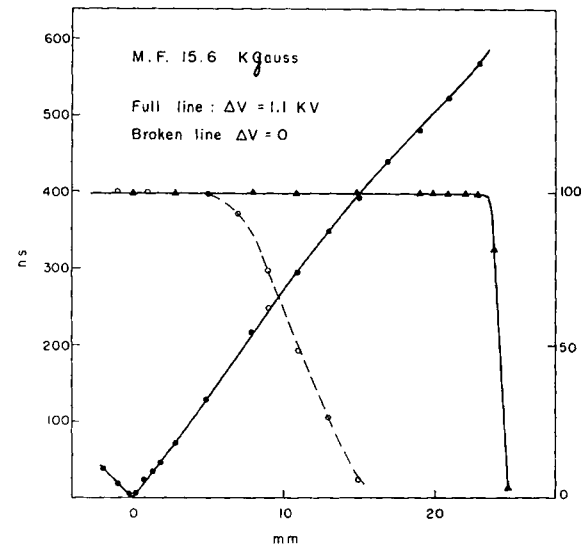
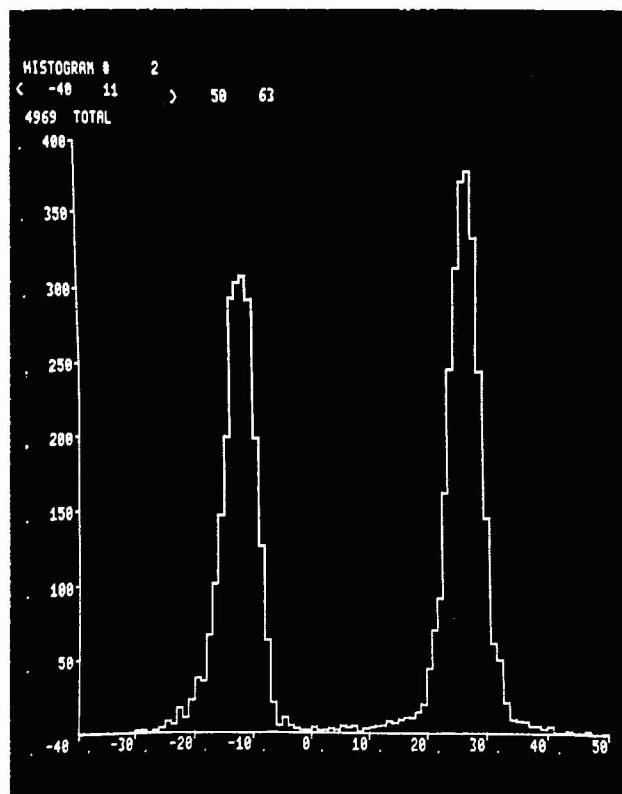
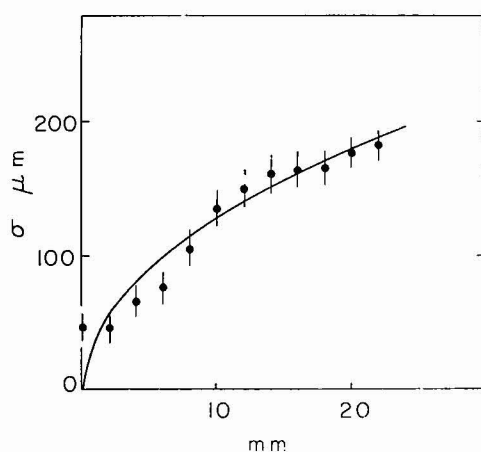


FIG. 13. — Efficacité de détection d'une chambre à dérive dans un champ magnétique. La distance entre fils est de 5 cm. La ligne pointillée correspond à une direction de champ électrique parallèle aux électrodes (Fig. 12a). On voit qu'à 15,6 kG la force de Lorentz élimine les électrons distants de plus de 1 cm. L'efficacité est restituée à 100 % avec les lignes de force électrique inclinées à 45° (Fig. 12b), [9].

premier électron de la colonne libérée par le passage de la particule. Ce temps est altéré par la diffusion et varie de 50 μ s à 180 μ s après 2,5 cm de dérive (Fig. 14). On peut se demander si en prenant le centre de gravité des temps d'arrivée de tous les électrons



(a)



(b)

FIG. 14. — Précision des chambres à dérive. a) Distribution des temps de dérive pour 2 faisceaux distants de 2 mm. La précision dépend de la distance au fil. b) Précision en fonction de la distance au fil. La diffusion des électrons introduit un élargissement de la colonne d'électrons qui varie comme $\sqrt{2Dt}$, où t est le temps de dérive et D le coefficient de diffusion, [9].

libérés on ne peut pas améliorer sérieusement la précision et s'affranchir de la dégradation de la précision avec la distance du fil.

En raison de sa simplicité, je pense que c'est la méthode d'avenir auprès des grands accélérateurs. Elle est à la fois la plus économique pour réaliser de très grands détecteurs et la plus précise, permettant ainsi de réaliser des économies substantielles sur le volume de champ magnétique qui sera nécessaire pour dévier les particules aux très hautes énergies.

9. Conclusion. — Dans l'arsenal de détecteurs dont nous disposons actuellement pour aborder la nouvelle phase qui s'offre à nous avec l'avènement des grands accélérateurs, il est très probable que nous n'aurons à puiser que dans un nombre limité des détecteurs que nous avons eu à mettre au point jusqu'à ce jour. La chambre à bulles est appelée à jouer un rôle dans la phase d'exploration lorsque nous aurons l'ambition d'analyser les réactions où des dizaines de particules chargées sont produites. Cependant, la courbure de certaines trajectoires risque d'être tellement petite qu'on doit envisager derrière les chambres à bulles des spectromètres annexes utilisant des chambres automatiques pour effectuer les mesures précises de quantités de mouvement.

Toutefois, pour l'étude des interactions avec les neutrinos, les chambres à hydrogène géantes sont considérées encore sans rivales pour certains problèmes. Les chambres à darts peuvent s'imposer dans les expériences donnant lieu à une configuration complexe car elles sont beaucoup plus faciles à construire et à adapter à des expériences données que les chambres à bulles.

Les chambres à étincelles automatiques me semblent appelées à disparaître, car elles sont surclassées même sur le terrain des prix et de la simplicité par les chambres à dérive.

Je n'ai pas du tout abordé dans cet exposé les développements qui sont en cours pour améliorer l'identification des particules. Des études actives font apparaître que de sérieux progrès sont en vue dans l'utilisation de la radiation de transition et même dans celle de l'effet Čerenkov. Ce serait l'occasion de développements sortant du cadre de cet exposé que j'ai voulu limiter aux progrès dans les détecteurs visant à mesurer les coordonnées des trajectoires de particules.

Bibliographie

- [1] LES CHAMBRES A BROUILLARD : On trouvera de beaux exemples de clichés dans : *An Atlas of typical expansion chamber photographs* by GENTNER, W., MAIER-LEIBNITZ, H. and BOTHE, W. (Pergamon Press) 1954.
- [2] LES ÉMULSIONS NUCLÉAIRES : Une description de la méthode illustrée de très beaux clichés peut être trouvée dans : *The study of Elementary Particles by the Photographic Method*, by POWELL, C. F., FOWLER, P. H. et PERKINS, D. H. (Pergamon Press) 1959.
- [3] CHAMBRES A BULLES ET CHAMBRES A ÉTINCELLES : De nombreux ouvrages ont été consacrés à ces détecteurs, par exemple : *Bubble and spark chambers*, edited by R. P. Shutt (Academic Press) 1967.

ALLKOFFER, O. C., 1969, *Spark chambers* (München, Verlag Karl Thiermig K. G.).

CHARPAK, G., MASSONNET, L., FAVIER, J., 1965, *Progr. Nuclear Techniques and Instruments*, ed. F. Farley 1 (1965) 323 (North Holland Publish. Co.).

- DAION *et al.*, *Iskrovie KAMERA* (Atomisdat, Moscou) 1967.
- [4] CHAMBRES A ÉTINCELLES AUTOMATIQUES ET CHAMBRES PROPORTIONNELLES :
CHARPAK, G., The evolution of the automatic spark chambers, *Annual Review of Nuclear Service* **20** (1970).
- CHAMBRES A DÉRIVE :
- [5] CHARPAK, G., *J. Physique*, **30** (1969) C2-86.
- [6] BRESSANI, T., CHARPAK, G., RAHM, D. and ZUPANCIC, C., *Track localisation by means of a drift chamber* Proceedings Dubna Meeting Filmless and Streamer chambers (April 1969).
- [7] CHAMINADE, R., DUCHAZAUBENEIX, J. C., FONTAINE, J. M., GARETTA, D., LASPALLES, C., SAUDINOS, J. and VAN DEN BOSSCHE, M., Note CEA-N-1522, CEN Saclay (1971) 160.
- [8] WALENTA, A. M., HEINTZE, J., SCHÜRLEIN, B., *Nucl. Instr. Meth.* **92** (1971) 373.
- [9] CHARPAK, G., SAULI, F., DUINKER, W., High-accuracy drift chambers and their use in strong magnetic fields, *Nucl. Instr. Meth.* **109** (1973).