

**Centre de recherches nucléaires de Strasbourg**

**C.R.N.**

CRN/HE 77-16

FR 77 02981

CONCEPTS ET MODELES EN PHYSIQUE DES PARTICULES

M. PATY

CENTRE DE RECHERCHES NUCLEAIRES  
UNIVERSITE LOUIS PASTEUR  
STRASBOURG

Institut National  
de Physique Nucléaire  
et de Physique  
des Particules

Université  
Louis Pasteur  
de Strasbourg

CONCEPTS ET MODELES EN PHYSIQUE DES PARTICULES

Michel Paty

Centre de Recherches Nucléaires et  
Université Louis Pasteur, Strasbourg \*

Contribution au Symposium  
Théorie Physique et Réalité,  
Neuchâtel, 10 et 11 juin 1977

1.- Les réflexions qui suivent vont s'agencer à partir d'une question. Mais cette question ne sera pas celle que l'on se pose généralement quand on aborde cette discipline et qui est la suivante : qu'est-ce qu'une particule élémentaire ? Cette question entraînerait en effet des considérations très techniques, et ce n'est pas elles que j'envisage de traiter ici ; au surplus, la réponse n'en est rien moins que simple et évidente. Il faut toutefois signaler que cette question traditionnelle est tout à fait spécifique à cette discipline, en ce sens qu'elle n'a d'équivalent dans aucune autre. On ne se demande pas ce qu'est un solide, par exemple, avec une telle perspective unitaire et réductrice ; quand on parle de Physique des Solides, on sait que l'on entend par là les problèmes de la structure des solides, et non pas du solide comme entité en soi, susceptible d'une seule structure globale.

Dans le cas des particules, l'appel à la notion d'élémentaire paraît requérir d'emblée un caractère beaucoup plus uni, plus explicatif, la description semblant devoir s'effacer sous l'explication. Lorsqu'on demande ce qu'est une particule élémentaire, on semble sous-entendre que, le savoir, cela voudrait dire connaître la Physique (du moins cette physique-là), dans sa totalité. Par cette prétention au moins implicite s'affirme une exigence unitaire contraignante dans cette discipline qui, plus que toute autre (et même plus que l'ancienne physique de l'atome puis du noyau), se réfère à l'unité, à l'élémentaire, et par là à l'universel. Et, malgré cela - ou plutôt, en regard d'une telle perspective - la réponse est morcelée, comme dans toute autre discipline, et se donne dans des aspects divers, selon des approches et des angles de visée variés dont on ne parvient pas toujours à saisir le lien qu'ils ont entre eux (s'ils en ont, ce à quoi du moins l'on s'efforce).

La question que je voudrais poser est moins directe : c'est une question sur la question, et bien entendu elle n'est pas indifférente à la première, celle sur l'objet (sans doute parce que "ce qu'est" une particule élémentaire, au bout du compte, ne peut être saisi que par un détour, une médiation). Elle est en tout cas utile à poser si l'on se propose d'étudier les rapports que la théorie physique entretient avec la réalité. Cette question est en effet la suivante : qu'est-ce que la connaissance des particules élémentaires ?, et elle se dédouble fondamentalement en deux :

- quel est l'objet de la science "physique des particules" ?
- à quoi vise cette science ?

Tenter une réponse complète à ces deux sous-questions nous entraînerait très loin. Qu'il nous suffise pour l'instant de donner quelques indications, sommaires mais éclairantes pour notre propos.

Prenons la première : l'objet de la physique des particules, ce sont les constituants ultimes de la matière, les plus petites (ou plus élémentaires) particules dont les autres sont constituées, ce qui sous-entend en général qu'elles sont en petit nombre. Tous ces termes demanderaient des justifications : ils ne sont "ultimes", "plus petits" ou "plus élémentaires", en "petit nombre", que "comme on dit". Ils représentent des conventions ou des exigences qui mériteraient d'être analysées (et qui renvoient notamment au problème de la séparation des objets, par rapport à leur éventuelle totalité, qui fait référence à leur conceptualisation). Sans entrer pour l'instant dans ces "détails" (des détails qui conditionnent peut-être tout le reste pourtant), qu'il nous suffise de constater ici, à la lumière de ce que nous savons des lois fondamentales qui prévalent dès le niveau atomique, que cet objet n'est aucunement du genre de la "chose" intuitive, celle que peut se représenter notre "intuition pratique" et à laquelle elle fait constamment appel. Cet objet échappe aux sens, à la perception directe. Il s'inscrit, au mieux, dans le cadre abstrait de la Théorie Quantique qui remplace la Mécanique Classique, laquelle servait de cadre précisément à la physique de la perception intuitive (modulo toutefois des médiations conceptuelles parfois éloignées de la perception directe).

Qu'en est-il de la deuxième sous-question ? La physique des particules vise à représenter, et par là à rendre compte des grands phénomènes fondamentaux en physique que sont l'interaction nucléaire forte, l'électromagnétisme, l'interaction faible et peut-être même la gravitation. Elle prétend d'avantage encore : à trouver la formulation susceptible d'englober, en une loi ou une proposition unitaire, l'ensemble de ces phénomènes. Là encore, une analyse de termes employés en formulant cette réponse serait éclairante sur la nature de la connaissance dont il est question.

Par son objet comme par sa visée, la physique des particules se présente avant tout comme conceptuelle et théorique : cette thèse n'est pas arbitraire mais résulte de ce qui précède. La physique des particules ne se propose pas l'appréhension directe (à supposer que l'on sache ce que cela pourrait signifier...) des phénomènes ou de la réalité. Entre la compréhension et le réel elle propose

une médiation théorique abstraite : celle des concepts et des modèles. Concepts et modèles constituent l'essence même de la physique des particules dans son expression comme dans les modalités de sa mise en oeuvre ; les deux sont reliés, noués, en un formalisme qui est à la fois mathématisé et opérateur. Ce dernier caractère assure la prise sur le réel, la connexion expérimentale. (Je précise ainsi le sens que je donne à "opérateur". C'est l'ancrage de la théorie dans la réalité ; il ne s'agit aucunement ici de considérer que le concept serait engendré par la technique de mesure. Mais il est vrai que le concept, construit par la raison, dépend malgré tout de la technique de mesure : sans référence à elle il serait incomplet, mais cette référence peut fort bien recourir à des médiations indirectes).

2.- L'objet, au sens le plus général, de la physique des particules est essentiellement théorique. Les exemples abondent qui étayent cette constatation que l'objet de la physique est construit par une théorie préalable et n'existe pas à l'état de "donnée brute". Il réclame une grille de lecture. Et cela, dès le stade le plus général, le plus programmatique, celui de la recherche de l'élémentaire : car celle-ci fait appel à une idée de ce qu'est cette élémentarité, idée déterminée par le cadre théorique en vigueur comme par les modalités de sa mise en pratique. Les principes généraux des expériences découlent naturellement des relations théoriques les plus fondamentales : la recherche de l'élémentaire, c'est-à-dire des petites dimensions spatiales, est gouvernée par les relations de de Broglie  $\lambda = h/p$ , et de Heisenberg  $\Delta x \cdot \Delta p > \hbar$ , qui impliquent l'obtention de radiations de haute énergie. Quant au principe même des appareillages, il est hautement théorique ; il met en jeu des phénomènes complexes qui relèvent de la théorie physique dans son ensemble - et dans sa diversité : électromagnétisme, thermodynamique, théorie atomique, relativité restreinte ... (Notons aussi qu'il fait appel à des connaissances technologiques "de pointe" dans les domaines les plus variés : technologie des vides poussés, électronique rapide, supraconductivité, informatique, automation, etc...). Enfin, la construction d'un dispositif expérimental précis s'effectue en fonction d'une prévision théorique, ou à tout le moins d'une problématique théorique, qui détermine sa spécificité (c'est notamment le cas des expériences à détection électronique où l'on doit simuler à l'avance l'expérience à faire en faisant intervenir les prédictions théoriques relatives au phénomène étudié).

On pourrait dire, pour résumer, que l'expérimentation, du niveau des principes à celui de sa réalisation effective, se tisse dans un réseau théorique aux mailles de plus en plus étroites : l'étroitesse de ces mailles (conceptuelles, de modèles, de formules, etc...) étant déterminée précisément par la "grille de lecture" dont on a parlé plus haut. On peut penser que, à la limite, la détermination quasiment complète de la réalité dans un domaine donné ferait s'évanouir le caractère expérimental de la connaissance au profit de sa seule qualification théorique. Par ailleurs on peut se demander si par cette détermination à-priori du réel, on ne laisse pas s'échapper de la connaissance de ce dernier des caractères hautement imprévisibles ; en d'autres termes, si la grille de lecture n'entraîne pas une certaine myopie. Je laisse pour l'instant ce problème, voulant limiter mon propos. Il en sera un peu reparlé dans la suite, mais il n'est absolument pas épuisé par les considérations présentes.

Il faudrait aborder maintenant la description plus détaillée des objets dont il est question, afin de montrer comment ils sont caractérisés en fait, par quels concepts, quelles théories, quels modèles : afin de voir ensuite comment cette représentation est reliée à la réalité. Je ne saurais ici être complet ; je ne désire même pas être "descriptif". Je laisserai donc de côté la plupart des aspects "techniques" de la physique des particules, sur lesquels il existe d'ailleurs une littérature abondante <sup>(1)</sup>, pour n'en retenir que deux, sur lesquels je ne m'étendrai pas, mais qui se rapportent à des développements récents, lesquels ont d'ailleurs eu leur côté spectaculaire, et qui me paraissent particulièrement significatifs des dimensions des problèmes soulevés. Je me contenterai de les rappeler sommairement pour en éclairer quelques implications.

Le premier de ces aspects concerne la représentation des particules elles-mêmes, en entendant "représentation" aussi bien au sens du formalisme abstrait qu'à celui de leur constitution effective. Il se trouve que, aujourd'hui, ces deux abord, l'un formel, l'autre "réaliste" <sup>(2)</sup>, semblent converger : c'est

- (1) Pour un abord relativement non spécialisé, cf. les articles de La Recherche, par exemple.
- (2) il faudrait ici justifier ce que j'entends - ce qu'il faut entendre - par réalisme, ou réalité. Je ne le ferai pas et laisserai à ces mots leur sens habituel, courant, intuitif, même si celui-ci est ambigu. Si, par les indications de cet article, une certaine acception critique de ces termes est déjà envisageable, il faudrait à vrai dire développer une argumentation beaucoup plus profonde, mais qui excède les limites que nous nous sommes prescrites.

du moins ce que semblent indiquer les résultats physiques sur le "modèle des quarks". Sans entrer dans les détails<sup>(5)</sup>, il faut ici dire un mot de cette étonnante convergence. On sait que la classification des particules élémentaires, rendue nécessaire par leur multiplicité et possible par la régularité de certaines de leurs propriétés, fait appel à la théorie des groupes de transformation : les familles de particules sont des représentations de ces groupes. Le groupe de symétrie SU(3) étendu à SU(4) (qui inclut dans la classification les particules "charmées" encore pour la plupart hypothétiques, mais dont certaines ont été récemment observées) rend bien compte des propriétés connues de ces particules. La "représentation fondamentale" de ce groupe est d'ordre 4 ce qui, traduit en langage "corpusculaire" (encore que purement formel à ce stade), peut se comprendre comme : il existe quatre états "fondamentaux", c'est-à-dire à partir desquels les autres représentations peuvent être formées. Ces quatre (hier, dans SU(3), ils étaient trois, demain, dans des symétries d'ordre supérieur, ils seront peut être davantage) états sont les "quarks".

Le modèle des quarks permet de rendre compte de la spectroscopie des particules. Mais à ce stade il n'est encore qu'une théorie formelle, et rien n'oblige à ce qu'il corresponde à une "constitution physique". L'état quantique représentant le proton est une combinaison des trois états de quarks uud. Mais le proton est-il effectivement constitué de trois particules effectives, physiques, les quarks u, u, d ? La réponse semble aujourd'hui être affirmative : mais c'est par une approche différente et, au début, indépendante du formalisme, que l'on est peu à peu parvenu à cette conclusion (encore provisoire certes, mais à laquelle la plupart des physiciens se rallient). La structure granulaire des particules dites hadrons (à interaction forte), dont le proton est un cas particulier, est apparue grâce à des expériences mettant en jeu une localisation particulièrement "fine" et précise. Ces grains appelés partons, ont été récemment identifiés comme n'étant autres, très probablement, que les quarks.

(5) M. Paty, "Voir les quarks", La Recherche, 8, 1977 (juillet), p. 673

Ainsi les quarks passent-ils du statut d'une abstraction mathématique à celui d'une "particule" physique : en fouillant suffisamment l'intérieur du proton, on "voit" les quarks. Mais pour accéder au statut de particule au sens usuel, ces quarks devraient pouvoir être séparés, isolés. Or, on ne parvient pas à "casser" le proton (ou tout autre hadron) en ses quarks qui le constituent. Actuellement, les quarks ont donc un statut paradoxal : ils ont les propriétés de particules quand ils sont liés dans un hadron, mais ne sont pas séparables, isolables, comme les particules usuelles. Pour tenter d'expliquer ce paradoxe sans renverser la notion de "particule" dans son acception commune, les physiciens ont recours au concept de "confinement", et de nombreux modèles tentent de rendre compte de cette caractéristique ontologique des quarks de demeurer confinés en la liant aux propriétés du champ des forces qui lient les quarks entre eux dans la matière nucléaire hadronique.

Un autre aspect des développements récents de la physique des particules concerne non plus cette fois la description (qui a un côté statique, et se réfère davantage aux propriétés "intrinsèques") des particules, mais les problèmes posés par la dynamique de leurs interactions. Les nouveautés majeures dans ce domaine concernent la théorie quantique des champs, relativement aux invariances ou symétries de jauge spontanément brisées. C'est dans cette direction qu'a été proposé ces dernières années un rapprochement, voire une unification, des champs électromagnétique et faible, dont certaines implications expérimentales ont été effectivement observées (courants neutres faibles, particules charmées). Là encore - encore moins peut-être que pour les quarks - il ne saurait être question d'entrer ici dans les détails. En réalité les deux séries de développement - constitution des particules et nature des quarks, théorie des champs de jauge - sont loin d'être déconnectées. L'hypothèse d'un quatrième quark, le quark charmé, est impliquée par la théorie de jauge unifiée des interactions électromagnétiques et faibles. Un des attributs des quarks, la "couleur", est liée au champ d'interaction fondamentale qui relie les quarks entre eux. Par ailleurs, ces mêmes champs font appel à d'autres particules (bosons intermédiaires, particules de Higgs, etc...). Il serait intéressant d'analyser en détail la relation qui existe entre les corpuscules élémentaires (et les plus "ultimes" d'entre eux, les quarks) et les champs d'interaction fondamentale : cela contribuerait à éclairer l'état actuel, en sa formulation et ses problèmes, du fameux dilemme corpuscule/onde.



3.- Les exemples qui précèdent - auxquels on ne saurait se restreindre, mais ils sont assez parlants - recèlent à chaque pas le problème plus vaste et de portée générale des relations entre l'expression de l'objet (c'est-à-dire tel qu'il est connu, représenté) et la réalité. En cerçant ce problème par un aspect précis comme celui de la réalité de tel concept (le champ, par exemple), ou de la réalité de telle particule, et aujourd'hui des quarks eux-mêmes, l'on doit aboutir, sinon à une réponse claire et sans faille, du moins à la définition de quelques critères par quoi cette réalité se caractérise en tant que telle. (Loin de nous la prétention de quelque réponse définitive, puisque nous avons vu combien les données récentes relatives à notre connaissance dans ce domaine posent des problèmes bien plus qu'elles n'en résolvent : du moins la connaissance avance-t-elle, non seulement par la masse des informations recueillies mais par la possibilité de les mettre en ordre, ce qui provoque un effet en retour sur les questions antérieures qui souvent demandent alors à être formulées autrement. Par ailleurs le problème des rapports exacts entre la pensée sur le réel et le réel lui-même demande une mise en place philosophique qu'il n'est pas question de traiter dans ces lignes). C'est donc à ce programme relativement modeste d'une énonciation de quelques critères - qui nous renverront sans doute à d'autres problèmes - que le reste de cette intervention sera consacré.

Transcrite dans un langage intuitif relativement au domaine considéré, la question devient : quelle est la réalité, la matérialité, d'une particule élémentaire ?

Examinons le cas des "particules charmées", récemment mises en évidence (cet exemple est assez général pour être étendu en fait à toutes les autres particules dites élémentaires, qu'elles soient stables, quasi-stables ou métastables - dans ce dernier cas il s'agit des "résonances"). Trois types d'"évidence" expérimentale ont permis séparément d'identifier certaines particules comme des particules charmées, ou, plus exactement, d'identifier certains phénomènes comme révélant la présence de particules pourvues d'une caractéristique inédite, le nombre quantique dit de "charme".

Il s'agit tout d'abord d'une "signature", c'est-à-dire de la présence de particules, dans un processus donné (interactions de neutrinos sur des noyaux), qui serait inexplicable autrement (cf. fig. 1) : la présence d'un positon et d'une particule étrange simultanément aux autres particules "normales" de ce type de réaction (4). Il peut s'agir, d'un autre côté, de l'obtention d'un "pic" (c'est-à-dire un signal avec une fréquence relativement importante) dans un spectre de masse entre des particules de l'état final d'une réaction, en l'occurrence les systèmes de mésons K et  $\pi$  dans l'annihilation d'une paire électron-positon à haute énergie (cf. fig. 2) :  $K^+ \pi^+$ ,  $K^0 \pi^+$ , etc... Dans le premier cas, on induit la particule charmée individuellement à partir des traces de ses produits de désintégration, dans le deuxième cas on la reconstitue de manière statistique (en mesurant du même coup sa masse). Enfin si une particule charmée dure suffisamment longtemps (c'est-à-dire si elle est stable ou quasi-stable), on peut éventuellement observer sa trace, comme celles de particules suffisamment connues aujourd'hui pour qu'on soit capable d'en faire des faisceaux ( $\mu$ ,  $\pi$ , K, etc...). Une telle trace a été observée récemment (fig. 3). Cette "vision directe" (5) de la trace n'est à vrai dire pas un critère d'existence supérieur aux autres modes cités. Elle constitue, au même titre que les autres, une preuve, en ce sens que cela correspond à des propriétés définies : vie moyenne de l'ordre de grandeur attendu ( $\sim 10^{-12}$  seconde), charge électrique, désintégration en plusieurs corps... Les autres modes sont, pour leur part, le test d'autres propriétés, complémentaires.

Les critères nécessaires de l'"existence" d'une particule sont en fait très précis. Les propriétés qui garantissent l'existence individuelle d'un type de particule (dans un type donné, les particules sont indiscernables) sont représentées par des "nombres quantiques", tels que masse propre, largeur ou durée de vie, charge électrique, spin, isospin, étrangeté, charme, charges baryonique et leptoniques, etc... C'est dire que cette individuation est

(4) Sur la raison de ce signal, cf. les diverses prédictions sur le charme. (voir la bibliographie adéquate)

(5) Ce mot ne doit pas faire illusion : la trace d'une particule matérialisée sous forme de bulles ou de grains dans un détecteur résulte d'une série de phénomènes indirects (ionisation des atomes du milieu, ébullition du liquide, etc...)

seulement repérée dans un réseau de relations théoriques à formulation mathématique (elle n'est pas représentable en termes imagés ou intuitifs). Les valeurs des nombres quantiques sont déterminées par la mesure d'observables qui leur correspondent. Ainsi, plus que tous les caractères énumérés plus haut (illustrés par les figures), ce qui fait la réalité d'une particule, c'est sa cohérence dans un schéma théorique d'explication, le terme explication contenant ici une connotation opératoire (mais non de façon nécessairement directe), c'est-à-dire portant la connexion expérimentale. La réalité, en physique des particules, ne se satisfait pas de l'expérimentation "brute". Elle est marquée d'exigence rationnelle ; mais elle n'en exprime pas moins un aspect de quelque chose qui est en-dehors de la pensée. Cette réalité ne peut être approchée que par une conceptualisation étroite capable de l'enserrer.

On voit ici comment se retrouve le lien, constitutif à un degré exceptionnel de la physique des particules élémentaires, entre la théorie et l'expérimentation. Nous avons vu comment l'objet est hautement théorique. Mais ce n'est pas tout dire. Cette théorisation, quant à elle, est affectée par l'expérimentation jusque dans sa nature profonde.

La place manque ici pour détailler cette imbrication étroite de la théorie et de l'expérience en physique des particules : elle se marque notamment dans la pratique de l'une ou de l'autre, chacune ayant sur l'autre des effets en retour (par exemple, détermination de champs de spécialisation...).

Je terminerais seulement sur deux questions, reliées de très près à celles que j'ai abordées ici, et dont l'examen est également nécessaire à la caractérisation de ce qu'est la réalité physique. La première est celle des "trous théoriques", c'est-à-dire des manques dans la représentation, que l'expérimentation cherche précisément à combler : leur degré d'importance, qui peut aller du simple paramètre à mesurer jusqu'à la remise en cause de tout le schéma théorique lui-même, mais aussi peut être la "fuite en avant" qui aboutit parfois à complexifier les modèles sans faire sensiblement progresser la connaissance, voire qui élude des questions demeurées sans réponse. La deuxième est celle, souvent évoquée mais toujours troublante, du statut exact des relations entre la formulation mathématique et la réalité physique. Un de ses aspects est patent dans le cas des quarks et peut se formuler ainsi : comment

un schème simplement formel, voire un simple artifice mathématique, se trouve devenir, ultérieurement, l'expression d'une réalité physique ? <sup>(6)</sup>

Mais je n'en dirais pas plus aujourd'hui sur ces questions.

(6) Ce thème est l'objet d'un article en préparation à paraître dans la revue La Pensée.

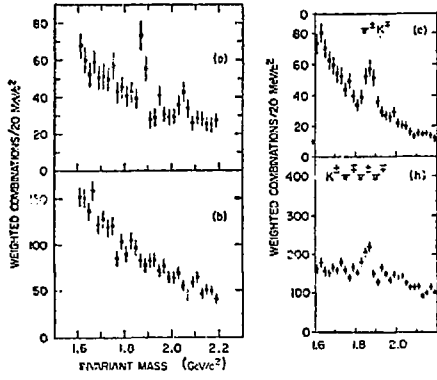


Fig.1

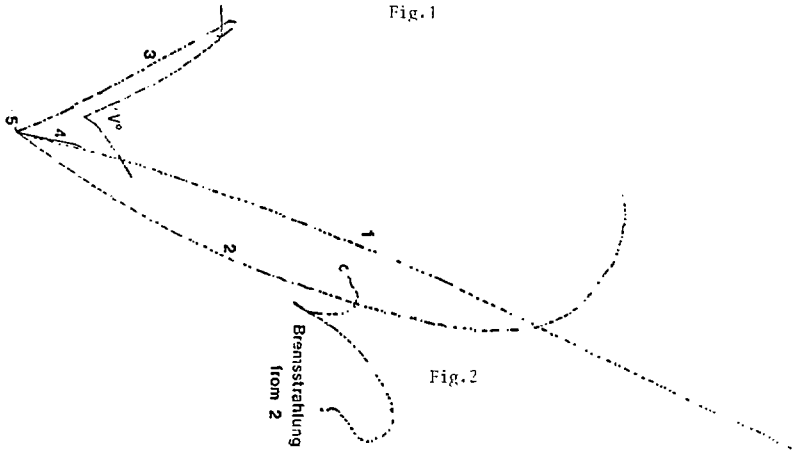


Fig.2

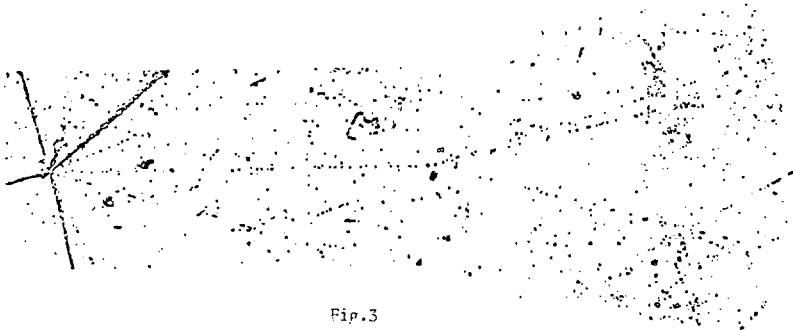


Fig.3

Fig. 1 : Spectre de masse invariante des combinaisons  $K\pi\pi$  (en haut :  $K^{\mp}\pi^{\pm}\pi^{\pm}$ , en bas :  $K^{\mp}\pi^{\pm}\pi^{\mp}$ ) dans des annihilations de  $e^+e^-$  à une énergie du centre de masse de 4,03 GeV (Phys. Rev. Letters 37, 1976, 569 voir aussi Phys. Rev. Letters 37, 1976, 255). Le signal du haut correspond à une particule charmée chargée, de masse environ 1,82 GeV. (Expérience à détection électronique, accélérateur SPEAR, SLAC, Stanford, U.S.A.).

Fig. 2 : Interaction de neutrino (venant de gauche à droite, invisible) sur noyau, donnant un muon négatif (trace n° 1), des protons de recul (traces 4 et 5), un pion (trace 3), une particule étrange ( $V^0$ , qui se désintègre en deux traces chargées de signes opposés, p et  $\pi^-$ ), et un électron positif (trace n° 2). Cet événement, obtenu dans la chambre à bulles Gargamelle exposée à un faisceau de neutrinos au CERN, Genève, est un excellent exemple de signal de particule charmée (celle-ci se désintégrant en  $e^+V^0\nu$  ; le neutrino sortant est invisible). (Phys. Letters, 60B, 1976, 207).

Fig. 3 : Interaction de neutrino (venant de gauche, invisible) sur noyau, donnant, parmi les particules produites, une trace (AB) d'environ 200 microns donnant lieu à une désintégration (en B) en 3 particules chargées et une particule neutre (détectée dans une chambre à étincelles, placée à la suite du bloc d'émulsion où a été visualisée l'interaction, obtenue à l'aide d'un faisceau de neutrinos au Fermilab, Batavia, USA, par une collaboration européenne). Cette configuration est caractéristique d'une trace de particule charmée de vie moyenne  $10^{-12}$  seconde. (Phys. Letters, 65B, 1977, 165).

