

sciences & avenir

Dossier: les particules élémentaires

Schizophrénie: biochimie et hérédité

Radioactivité: première fuite en ville



les particules élémentaires

François de Closets
et Marie Farge

Il y avait l'atome. Puis sont apparus les électrons, les protons et les neutrons : histoire ancienne. Aujourd'hui les particules élémentaires, connues ou supposées, sont plus de 300.

Cette immensité de l'infiniment petit n'a pas fini d'étonner. La complexité toujours plus grande du monde particulaire n'a pas fini de susciter expériences et hypothèses.

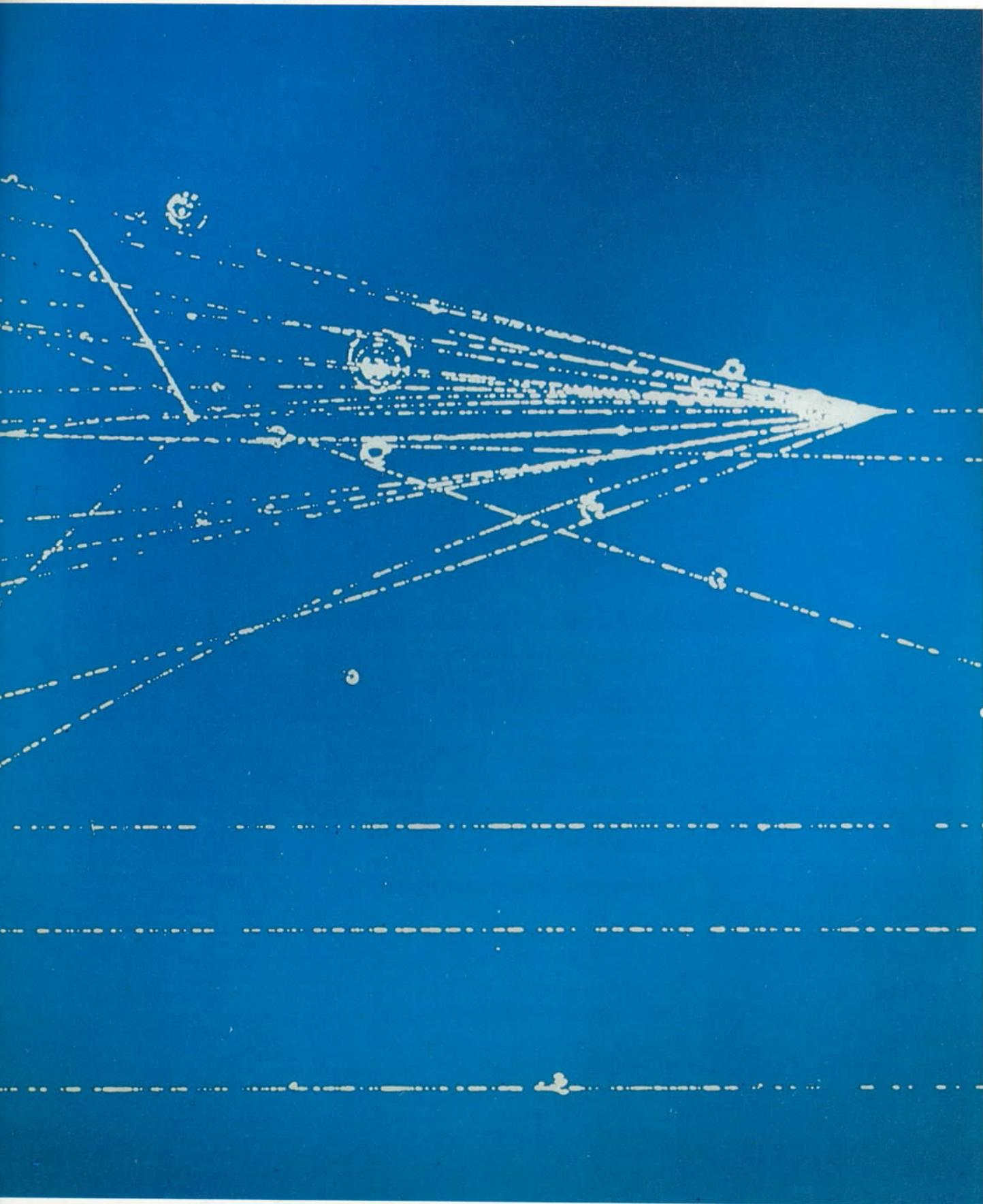
Car dans cette matière sans fin, il faut mettre un ordre. Au foisonnement de particules, il faut trouver une explication. L'hypothèse des quarks peut être la clef qui permettra de comprendre ce monde où le millionnième de seconde est une éternité. Mais sa seule vérification donnera du travail aux laboratoires jusque vers l'an 2000. Les physiciens sont loin d'avoir terminé leur voyage au bout de la matière.

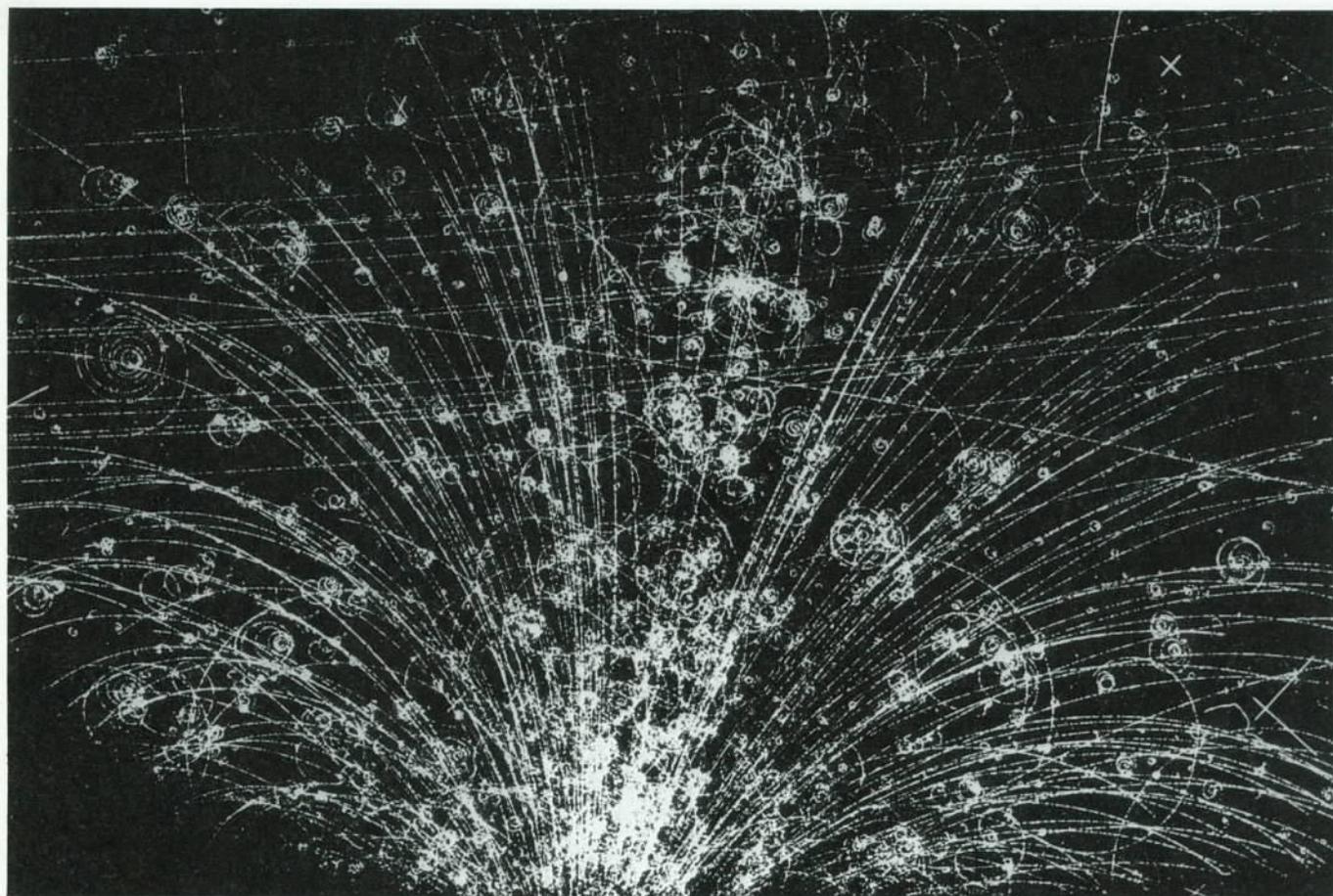
- I) Les concepts principaux
- II) La théorie des quarks
- III) Découverte de la nouvelle famille de particules
- IV) Peut-on libérer le quark ?

Pour « voir » les particules, les physiciens doivent se contenter d'observer les traces éphémères qu'elles laissent en traversant les chambres à bulles.

Ce cliché représente le « jet » de 14 particules secondaires, produites par collision, dans la chambre à bulles à hydrogène liquide de 2 mètres de long (HBC 200) du CERN, d'une seule particule incidente. C'est l'étude de tels documents, produits par centaines de milliers, qui permet de faire progresser la connaissance des particules élémentaires.







Sous la diversité des éléments, la physique a su retrouver une unité. La classification de Mendeleiev permet de comprendre comment trois particules constitutives – électron, proton, neutron – composent tous les atomes connus et en expliquent les propriétés. N'existe-t-il pas, de même, une structure simple subcorporelle qui explique les 300 particules découvertes et permet d'en trouver l'ordre secret sous l'apparent désordre ? Les physiciens n'en doutent pas et ont même des raisons de penser qu'ils tiennent les grandes structures de cet ordre intraparticulaire. C'est le physicien américain Murray Gell Man qui a joué ici le rôle de Mendeleiev.

Sa théorie des quarks, confirmée dans sa première version par la découverte du grand Oméga négatif, puis reconfirmée dans sa version élargie par les découvertes récentes de la particule ψ et du méson D, s'impose aujourd'hui comme un modèle solide et cohérent. Gell Man a reçu le prix Nobel en 1969 et voilà qu'en 1976 le jury de Stockholm récompense la découverte de ces particules de charme qui consacrent le modèle du quark « charmé ».

La physique des particules se trouve donc sur un palier. Après avoir fait des progrès spectaculaires dans les années 60, elle avait piétiné un certain temps. Les théories restaient à la fois intéressantes et insatisfaisantes, les découvertes se faisaient plus rares, la progression semblait stoppée. En deux ans, tout est reparti : théorie et expérimentation. Cette fois, le modèle paraît solide. C'est donc le moment d'ouvrir ce dossier.

I – LES PRINCIPAUX CONCEPTS

L'ordre subnucléaire est totalement imperceptible à nos sens. Nul n'a jamais vu un proton ni un électron. Nul ne peut s'en faire une représentation précise. Ces objets nous sont connus par leurs manifestations, mais échappent à l'observation directe et sensorielle.

Il sera donc question ici de choses

Une surprise pour les physiciens : lors du dépouillement à Heldelberg, de films pris dans la chambre à bulles à hydrogène de 2 mètres au cours d'une expérience CERN-Heldelberg, on a découvert cette spectaculaire gerbe de particules. On l'interprète comme un phénomène provoqué par un rayon cosmique d'une énergie de 100 GeV ou plus qui est entré en interaction dans le piston de la chambre, ce qui a donné cette gerbe d'une centaine de traces dans l'hydrogène.

qui ne sont pas représentables actuellement. Quand les biologistes parlent de la membrane cellulaire, ils font référence à une réalité invisible à l'œil nu mais bien précise et que chacun peut imaginer. La situation est toute différente quand les physiciens parlent de « parité », de « charme » ou « d'étrangeté ». Ces propriétés ne correspondent pas à notre expérience sensible. Nul ne peut dessiner une particule et mettre le charme dans son dessin comme on place un nez ou un sourcil sur un visage. L'ordre subnucléaire reste pour le moment essentiellement abstrait. Sa correspondance à la réalité tient à un enchaînement prédictible de causes et d'effets, non à une corrélation des représentations. Les physiciens ne savent pas à quoi ressem-

ble une particule et, pour tout dire, ce n'est pas leur problème. Ils essaient en quelque sorte de savoir « comment ça marche ». Bref, le monde des particules s'analyse en termes de systèmes et non de représentation statique.

Pour décrire ce monde, il est nécessaire de faire référence à un certain nombre de concepts, les uns nouveaux, les autres classiques.

Leptons, hadrons et antiparticules

Les particules constituant l'atome se divisent aisément en deux familles qui, en application de ce qui vient d'être dit, se distinguent non par l'apparence, mais par le comportement. Nous avons donc les constituants du noyau atomique : protons et neutrons, et le cortège des électrons satellisés tout autour. Il est

facile de constater que protons et neutrons sont beaucoup plus massifs que les électrons. Mais ce n'est pas là une différence essentielle. Il est important, en revanche, de constater que les protons qui portent une charge électrique positive cohabitent au sein du noyau. On sait bien pourtant que les charges électriques de même signe se repoussent. Or cette répulsion mutuelle ne semble pas empêcher une coexistence pacifique dans ce cas précis. Si, par contre, on tentait de faire coexister des électrons qui portent une charge électrique négative, on les verrait refuser de rester assemblés et se repousser les uns les autres. Pourquoi les forces de répulsions électriques paraissent-elles agir pour certaines particules et être occultées avec d'autres ? Voilà une différence significative de comportement.

L'électron appartient à une première famille : les leptons (léger en grec). Elle ne comprend que huit membres (ou plutôt on n'en connaît que huit) : le muon, une sorte d'électron lourd, et deux neutrinos, l'un qui s'apparente au muon et l'autre à l'électron. Cela fait quatre, mais comme toute particule a son antiparticule, nous arrivons à huit.

Le proton, lui, appartient à une famille beaucoup plus prolifique : celle des hadrons. On connaît actuellement 150 particules de ce type et nul ne sait combien il en reste à découvrir.

Chacune de ces particules a donc son double, son antiparticule. L'existence de cette antimatière a été postulée avant la guerre par le physicien britannique Dirac sur des bases purement théoriques. Mais cette prédiction a été pleinement confirmée par l'expérience, et le couplage particule-antiparticule n'a jamais été pris en défaut.

Ces antiparticules sont tout aussi réelles que les particules. Toutefois, elles sont pratiquement absentes de l'univers dans lequel nous vivons. On ne les voit apparaître que dans les accélérateurs lorsqu'elles se forment à très haute énergie. Chaque antiparticule est en tout point semblable à la particule correspondante. Mais un certain nombre de propriétés, notamment la charge électrique ou l'étrangeté, y sont de signe opposé. L'électron est porteur d'une charge électrique négative, l'antiélectron ou positron d'une charge électrique positive. Cette symétrie parfaite a pour conséquence que ces deux objets se dématérialisent lorsqu'ils interagissent, se rencontrent. La paire particule-antiparticule se transforme alors en énergie pure selon la fameuse relation $E = mc^2$.

Les forces

Ces deux familles se distinguent donc par des comportements différents en face des forces de répulsions électriques. Ce sont bien les forces qui vont permettre de classer le monde des particules. On ne connaît pas, en effet, de particule à l'état de repos absolu - un proton au repos sans nulle interaction est inobservable, car l'observation est précisément une interaction. On ne connaît les particules qu'en état d'interaction. Il faut donc examiner les forces qui permettent à ces particules d'interagir.

Ces forces fondamentales sont au nombre de quatre :

Les forces

| | Interaction forte | Force électromagnétique | Interaction faible | Force gravitationnelle |
|----------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------|-----------------------------------|
| Rayon d'action | 10^{-13} cm | Infini | 10^{-15} cm | Infini |
| Force relative | 100 | 1 | 10^{-9} | 10^{-37} |
| Particules sensibles | Hadrons | Toutes particules chargées | Hadrons Leptons | Toutes particules ayant une masse |
| Agent de la force | Hadrons <i>accélérés</i> | Photons | Boson intermédiaire | Gravitons |
| Exemple | Forces nucléaires | Forces atomiques | Radioactivité | Orbites des planètes |

Particules et interactions

| Interactions | Nucléaires fortes | Electromagnétiques | Nucléaires faibles | Gravitationnelles |
|--------------|-------------------|------------------------|--------------------|-------------------|
| Hadrons | oui | oui sauf part. neutres | oui | oui |
| Leptons | non | oui sauf neutrino | oui | oui |
| Photons | non | oui | non | non |
| Neutrinos | non | non | oui | non |

Les familles de particules

| Photon <i>Bosons</i> | Lepton | Hadrons | |
|-------------------------|------------------------------|--|---|
| | | Baryons | Mésons |
| γ | e ν_e μ ν_μ | p n Σ^+ Σ^0 Σ^- Λ Ξ^0 Ξ^- Ω | π^+ π^0 π^- K^+ K^0 η ρ ω ϕ |

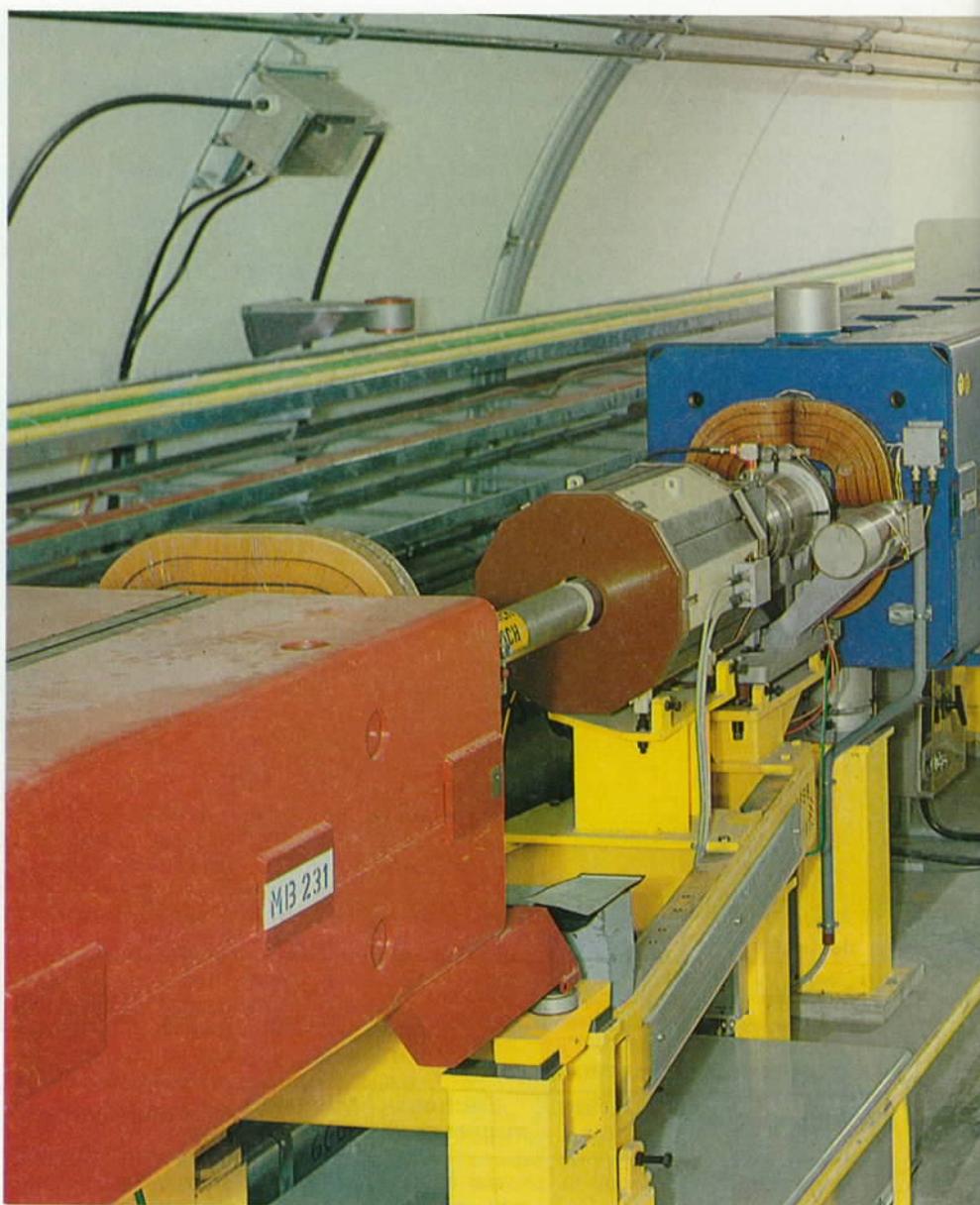


Tandis qu'à l'université de Stanford (ici l'accélérateur linéaire) Richter et son équipe découvraient la particule Psi, à Brookhaven les chercheurs avaient trouvé la particule J. C'était en fait la même particule.

- force de gravitation
- force électromagnétique
- force nucléaire faible
- force nucléaire forte.

Or toutes les particules ne réagissent pas de la même façon à ces forces et toutes ces forces n'agissent pas de la même façon.

On constate tout d'abord que la force relative des interactions varie énormément. Si nous donnons 1 à la force électromagnétique, la force nucléaire forte aura 100. En revanche la force nucléaire faible est cent mille fois plus faible, et la gravitation 10^{-37} fois plus faible. D'autre part, certaines forces, comme la gravitation ou la force électromagnétique, ont une portée théoriquement infinie alors que les deux interactions nucléaires n'ont qu'une portée très courte. Enfin chaque force a son agent de liaison particulier. En effet, ces forces se traduisent par des champs d'énergie quantifiés au sein desquels les interactions elles-mêmes sont médiatisées par des particules. Mais il s'agit de particules très spéciales. Elles ne sont pas, comme le proton ou l'électron, des objets qui subissent ces forces, elles sont la manifestation de la force elle-même. On les appelle les quanta des champs. Il faut donc introduire ici une deuxième division entre les particules. Du coup nous regroupons en



une même famille - les baryons - celles qui sont exposées aux forces, comme le proton ou le neutron et, dans une autre famille, celles qui sont les agents de ces forces : ce seront les bosons. Il existe un boson différent pour chaque force. On aura donc quatre types de bosons : les mésons, les bosons intermédiaires, les photons et les gravitons. Les baryons ne peuvent disparaître de façon aléatoire dans les interactions alors que les bosons, tout au contraire, apparaissent et disparaissent librement comme les étincelles quand on bat le briquet.

Les particules réagissent de façon évidemment très diverse aux différentes forces. Prenons tout d'abord la force de gravitation. Elle agit en

Le tunnel de l'accélérateur européen de 400 GeV construit au CERN. On voit ici, en rouge, les électro-aimants qui servent au guidage des protons et en bleu ceux qui servent à focaliser ces faisceaux de protons.

fonction de la masse. Toute particule pondérable en subira donc l'influence. Seuls les objets immatériels pourraient l'ignorer : c'est, en principe, le cas du photon ou du neutrino. En pratique, cette force est extrêmement faible et son action ne devient sensible que sur des objets réunissant une certaine quantité de matière. Autant dire que l'on peut ignorer purement et simplement la gravité au monde des particules.

Les forces électriques agissent, elles, sur toute particule portant une



nucléaires fortes, de type attractif, se manifestent. Comme elles sont cent fois plus puissantes que les forces électromagnétiques, l'attraction l'emporte sur la répulsion. Le phénomène ne se produirait pas si l'on accolait des électrons; ces particules ne sont pas sensibles aux forces nucléaires fortes. Telle est donc la vraie différence entre les hadrons (dont font partie les protons) et les leptons (auxquels appartient les électrons). Les premiers sont sensibles aux forces nucléaires fortes, les seconds n'y sont pas sensibles.

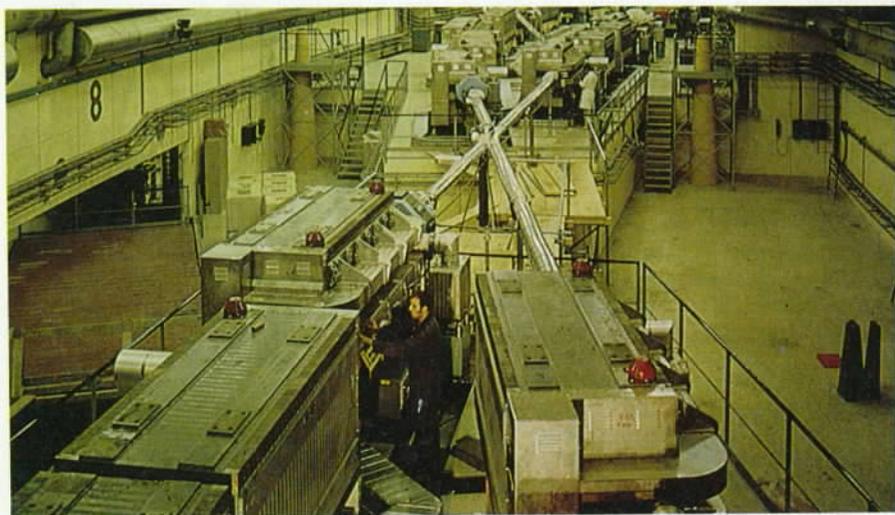
Restent les forces nucléaires faibles. Toutes les particules soumises aux forces nucléaires y sont sensibles. Mais ces forces ne viennent qu'en seconde ligne, derrière les interactions nucléaires fortes. Les forces faibles n'interviennent que si les forces fortes se trouvent, pour une raison ou une autre, dans l'impossibilité de jouer.

Les lois de conservation

Le monde des particules est très contraignant. Il impose tout ce qu'il autorise: c'est la règle fondamentale.

A côté des accélérateurs les physiciens disposent, pour provoquer des collisions de particules, des anneaux de stockage à intersection. Au CERN, il s'agit de deux anneaux magnétiques entrelacés, d'un diamètre de 300 mètres. Après avoir été accélérés par un accélérateur les faisceaux de protons sont injectés dans les deux anneaux de stockage pour y circuler dans des directions opposées. On peut ainsi les faire entrer en collision presque frontale dans les régions d'intersection. Au CERN, deux de celles-ci sont pourvues de grandes salles d'expérimentation tandis que cinq autres sont disponibles pour des expériences.

charge électrique. Des particules neutres, comme le neutrino ou le neutron, les ignorent. En revanche, le proton ou l'électron y sont sensibles. Gravitation et électromagnétisme, forces à longue portée, s'exercent dans le monde macroscopique; elles étaient déjà connues avant la découverte des structures subatomiques. Il n'en va pas de même des forces nucléaires. Nous les rencontrons avec les protons. Revenons à la différence entre le comportement du proton et celui de l'électron. Pourquoi deux protons peuvent-ils rester côte à côte dans le noyau alors qu'ils sont tous deux chargés positivement? C'est que ces objets sont à très courte distance l'un de l'autre au sein du noyau. Dans ce cas, des forces



Si une réaction est possible, elle doit se produire. Si elle ne se produit pas, c'est qu'il existe un obstacle inconnu et qui reste à découvrir. Principe essentiel à ne pas oublier : c'est lui qui a permis les plus grandes découvertes en ce domaine.

C'est là un monde que ne semble d'ailleurs guère apprécier les particules : il ne leur reconnaît pas le droit de vivre ; il ne leur reconnaît que l'obligation de mourir. Une particule est un objet qui, fondamentalement, est poussée à la désintégration par la recherche du plus bas niveau d'énergie possible. A ce jeu toute particule devrait disparaître et par conséquent toute matière. Fort heureusement, une particule ne meurt que dans les règles, c'est-à-dire en respectant des lois de conservation.

En l'absence de telles lois, tout objet subnucléaire serait instable et se désintégrerait plus ou moins rapidement. Mais ces lois sont telles qu'elles ferment à certaines particules la voie de la désintégration. Ces objets sont donc condamnés à vivre éternellement faute de pouvoir mourir. Ce sont les particules stables. Il en existe peu : l'électron et le proton évidemment, mais aussi certains neutrons (tant qu'ils sont emprisonnés dans le noyau atomique) et les neutrinos. Ce sont les constituants de la matière ordinaire. Pour les autres particules, il y a toujours possibilité, donc obligation, de mourir. Elles sont instables et se désintègrent dans le respect des lois de conservation.

La particule n'est pas une simple « goutte » de matière, une bille ou une brique élémentaire. C'est une structure complexe faite par l'assemblage d'un certain nombre de propriétés : charge électrique, mouvement de rotation, propriétés de symétrie, etc. Ces propriétés ne peuvent s'évanouir. « Rien ne se perd, rien ne se crée ». En revanche, elles ne sont pas indissolublement liées à la particule qui les porte. Un neutron (charge électrique nulle) peut fort bien donner un électron, un proton et un neutrino, permettant ainsi au neutron de devenir proton. Ce qui n'est pas possible, c'est qu'un neutron devienne proton par simple apparition de sa charge électrique. Une particule qui « meurt » donne donc naissance à des particules-filles qui se répartissent son héritage. Les lois de conservation deviennent alors des sortes de lois successorales. Lois relativement compliquées car les règles ne sont pas les mêmes pour chaque propriété et pour chaque force. Ce qui est permis avec l'éner-

gie ne l'est pas avec la parité, ce qui est permis avec les forces nucléaires faibles ne l'est pas avec les forces nucléaires fortes.

Première constatation, qui n'est pas faite pour surprendre : le monde subnucléaire respecte certaines lois de conservation qui régissent le monde macroscopique. Ce sont :

- La conservation du mouvement (produit de la masse par la vitesse) ; on aura donc : moment avant interaction = moment après interaction.

- La conservation de l'énergie ; il faudra donc vérifier que : énergie avant interaction = énergie après interaction.

- La conservation de la charge électrique : somme des charges avant interaction = somme des charges après interaction.

A ces lois classiques de la physique s'ajoutent des lois propres à l'univers subnucléaire. Par exemple :

- La conservation du moment angulaire total : somme du moment angulaire (produit de la masse par la vitesse de rotation) et du spin (c'est le moment magnétique créé par la rotation de la particule sur elle-même) : moment angulaire total avant interaction = moment angulaire total après interaction.

- La conservation du nombre baryonique. Il s'agit ici d'une propriété totalement « inreprésentable », d'un nombre quantique. Les physiciens ont constaté qu'un baryon ne peut se créer ou disparaître comme le fait au besoin un photon par exemple. Il semble exister dans ces particules une identité indestructible. C'est ainsi qu'un proton ne peut pas donner naissance à deux autres baryons : à un proton et à un neutron par exemple. Il ne peut pas davantage disparaître pour laisser la place à des mésons. On en vient à considérer qu'il existe une sorte de « charge baryonique » qui aura la valeur 1 pour le proton et la valeur 0 pour les mésons. Lors d'une interaction, le total des charges baryoniques au départ doit évaluer le total des charges baryoniques à l'arrivée.

Mais il faut encore distinguer la charge baryonique de la charge leptonique. Car la famille électron possède aussi son identité qui se conserve aussi jalousement que le nombre baryonique. Et, parmi les leptons, il faut même distinguer un nombre leptonique pour l'électron et son neutrino et un autre pour le muon et son neutrino. Chacun de ces

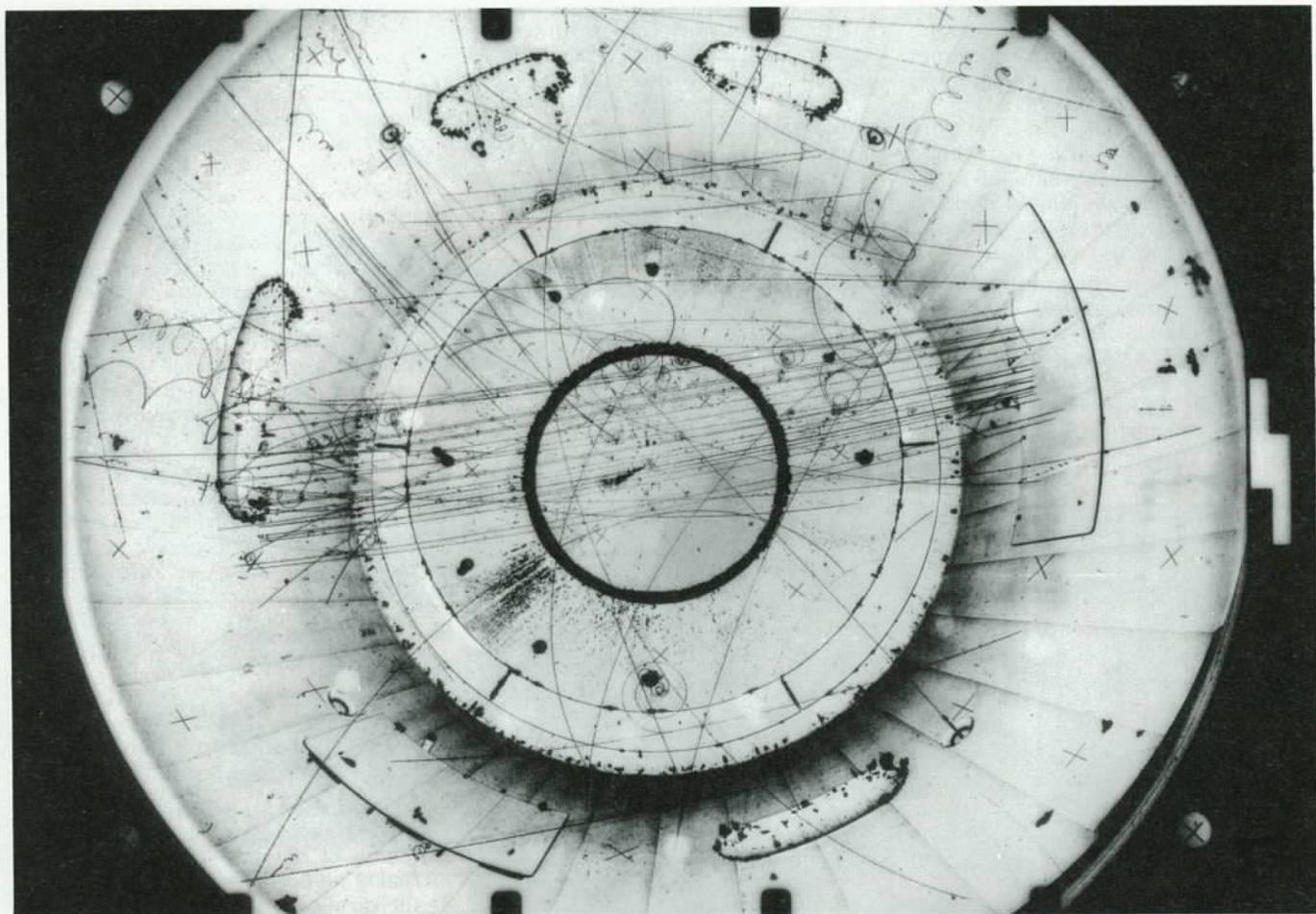
nombres doit se retrouver égal du début à la fin de l'interaction.

Pour les autres lois de conservation, le jeu se complique encore un peu plus. En effet, celles que nous venons de citer sont valables pour tous les types d'interactions. Il n'en va pas de même pour d'autres lois de conservation qui se réfèrent à des propriétés typiques du monde subnucléaire. Ces trois propriétés - la parité, l'étrangeté et le charme - sont associées à des lois de conservation strictes tant qu'on reste dans le monde des interactions nucléaires fortes ou électromagnétiques, mais peuvent les violer pour les interactions nucléaires faibles. C'est précisément ce qui a permis de découvrir l'existence de ces propriétés. Il existe ainsi une demi-loi de conservation pour les propriétés de symétries droite-gauche que traduit la parité. L'histoire de l'étrangeté et de sa conservation mérite d'être exposée plus en détail.

Prenons le cas d'un gros baryon, une sorte de proton lourd, le Lambda. Tant qu'on ignorait la notion d'étrangeté, on pouvait penser que cette particule se désintégrerait par une interaction forte en donnant un proton et des particules légères de type méson : des pions. Tout y étant conservé, une telle interaction devenait donc possible et par conséquent obligatoire.

Les interactions nucléaires fortes se déroulent en un temps extraordinairement court de 10^{-23} seconde. Telle aurait dû être la durée de vie du Lambda. Or on constate qu'il vivait, en réalité, 10^{-10} seconde soit 10 000 milliards de fois plus longtemps. Cette durée est caractéristique des interactions faibles : si le Lambda succombait aux interactions faibles et non aux interactions fortes, c'est qu'il n'avait pas le droit d'utiliser ce dernier mode de désintégration. Seule une loi de conservation pouvait imposer un tel interdit. Mais aucune grandeur connue ne se trouvait perdue dans cette réaction où un Lambda donne un proton plus des pions. Il fallait donc supposer qu'existait une autre grandeur, encore inconnue, qui n'était pas conservée dans cette réaction.

Il fallait supposer également que cette grandeur devait être conservée dans les interactions fortes, mais pouvait être oubliée dans les interactions faibles. Au terme de ce raisonnement, Murray Gell Man en vint à postuler l'existence dans le Lambda d'une propriété toute nouvelle qu'il baptisa étrangeté.



Le mot sonne curieusement, mais il en vaut bien un autre puisque nul n'a la moindre idée, à ce jour, de la réalité qu'il recouvre. Tout ce qu'on sait, c'est que certaines particules en sont porteuses et d'autres non, que les forces nucléaires fortes la conservent et que les forces nucléaires faibles la violent. En effet, si l'on donne une étrangeté de + 1 au Lambda et une étrangeté de 0 au proton et aux pions, on voit que la désintégration du Lambda en proton et pions nous donne une étrangeté de + 1 au départ et de 0 à l'arrivée.

Le type de raisonnement qui a conduit à cette propriété est très significatif de la physique des hautes énergies. C'est en particulier lui qui a permis, par la suite, de découvrir le charme.

Cette dernière propriété sera évoquée plus loin. Disons simplement qu'il s'agit, comme pour l'étrangeté, d'une propriété typique du monde subnucléaire, sans équivalent dans le monde sensible et dont la vraie nature reste complètement inconnue. Certaines particules récemment

Interactions de kaons de 9 GeV provenant du synchrotron à protons de 28 GeV du CERN dans la grande chambre à bulles européenne BEBC. Les particules se manifestent dans les 38 m³ d'hydrogène liquide de la chambre par des traînées de bulles se détachant en sombre sur le fond clair du revêtement réflecteur de lumière recouvrant les parois du cylindre de 3,7 m de diamètre.

découvertes possèdent donc du charme et l'on constate que cette grandeur suit les mêmes demi-lois de conservation que l'étrangeté.

Pour résumer, il apparaît qu'existe une interaction-reine: la force nucléaire forte. C'est elle qui prime lorsqu'elle est autorisée. Mais, précisément, elle est la plus exigeante sur le plan de la conservation. Lorsqu'elle se trouve interdite au niveau des propriétés corpusculaires mineures (parité, étrangeté ou charme), un deuxième mode de désintégration peut intervenir, plus faible, plus lent, moins regardant sur le plan de la conservation. Une sorte de sortie pour les particules embarrassées, en quelque sorte, par leur charme et leur étrangeté.

II - LA THEORIE DES QUARKS

Ces concepts de base s'articulent aujourd'hui dans un modèle qui s'est révélé opératoire et, sans tout expliquer, permet de comprendre beaucoup de choses: le modèle des quarks. Il s'est développé en plusieurs étapes.

Ces « bêtes curieuses »

On dénombre environ 300 particules connues. Mise à part la petite famille des leptons, ces particules se répartissent donc en baryons et mésons - 200 pour les premiers, 100 pour les seconds. Toutefois, les physiciens ont rapidement constaté que certaines particules ne sont que des états excités d'une même particule. On pouvait ainsi distinguer six types de baryons: N (nucléon), Σ (sigma), Ξ

(ksi), Λ (lambda), Δ (delta), Ω (omega) que l'on observait à différents niveaux d'énergie. Mais pourquoi six? Pourquoi pas trois, cent ou mille? L'explication moderne de la classification de Mendeleiev montre que l'extrême diversité du monde atomique peut être ramenée à la combinaison de trois objets élémentaires: proton, neutron et électron. N'en irait-il pas de même ici?

C'est l'hypothèse de Murray Gell Man à la fin des années 50. Après bien des tentatives, le physicien américain parvient à reconstituer toutes les « vraies » particules sensibles aux interactions nucléaires à partir de trois objets fondamentaux seulement dont les propriétés se combinent

En choisissant correctement les valeurs des différentes grandeurs quantiques, on doit donc pouvoir reconstituer ainsi des objets tels que l'addition des propriétés particulières aux quarks constituants corresponde aux propriétés des particules connues.

La grande difficulté, dans ce jeu de construction, est venue de la charge électrique. Pour toutes les autres grandeurs quantifiées, on pouvait donner aux quarks des nombres entiers et/ou fractionnaires, comme il est d'usage pour le spin, et retrouver sur la particule les nombres attendus. Mais il n'en allait pas de même pour la charge électrique: impossible de trouver les charges des

L'animal étrange : l'Omega négatif

Si la théorie était vraie, les quarks devaient se combiner selon tous les modes possibles, à trois pour les baryons, à deux pour les mésons. Il devait donc exister une particule sss. Et, dans ce cas, l'addition de trois quarks étranges conduisait à des propriétés extrêmement surprenantes. L'étrangeté, par exemple, devait atteindre -3 ... ce qui est vraiment très étrange. La masse quant à elle s'annonçait considérable. Bref, on pouvait s'interroger sur la réalité d'un tel objet. Mais la théorie « collait » si bien par ailleurs que les expérimentateurs se lancèrent sur les traces de l'Omega.

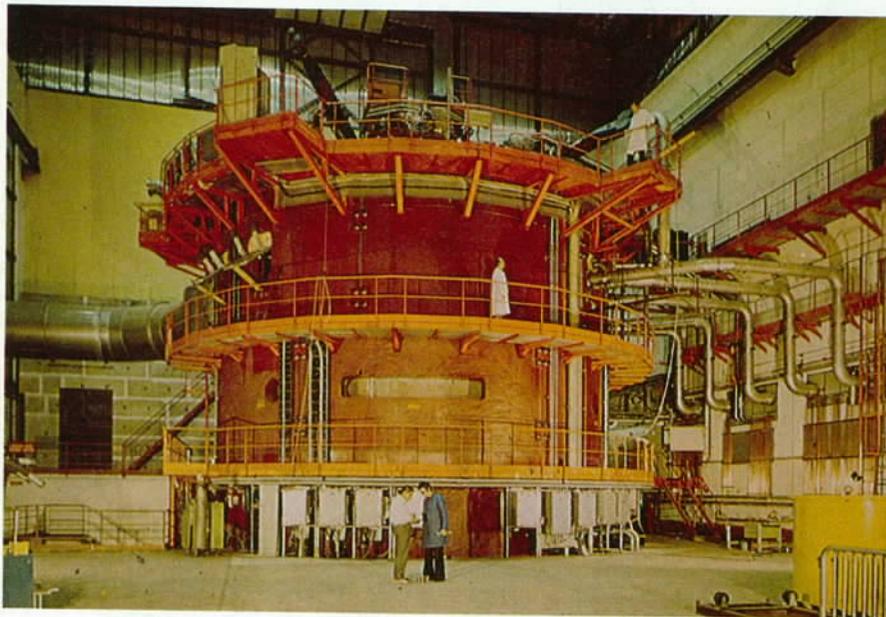
Dès le début des années 60, ce monstre du Loch Ness des chambres à bulles était découvert à Brookhaven. Gell Man se retrouvait en piste pour le prix Nobel et la théorie des quarks, cette fois, paraissait bien accrochée à la route. Pourtant elle était loin d'être achevée.

La prédiction d'une nouvelle espèce

Alors même que se confirmait la théorie, que sa cohérence en elle-même et sa correspondance avec la réalité ne permettaient guère de douter qu'elle comportât quelque chose de vrai, les physiciens butaient sur des difficultés assez comparables à celles qui les avaient conduits à postuler l'existence de l'étrangeté. En effet, certaines réactions attendues ne se produisaient pas. Il en allait ainsi de la désintégration du méson K^0 en un muon négatif et un muon positif, qui était pourtant autorisée par toutes les lois connues de conservation. Il fallait donc penser qu'il existait une propriété supplémentaire, encore inconnue, dont la conservation interdisait ce type de réaction. Lancée sur cette piste, les chercheurs prirent deux directions principales.

Dès 1964, Sheldon Glashow, de Harvard, et J.D. Bjorken de Stanford, proposèrent d'ajouter un quatrième quark au modèle. De même que le

La chambre à bulles à liquides lourds « Gargamelle », longue de 4 mètres, a été construite en France pour le CERN. On voit ici son installation dans un faisceau de neutrinos provenant de l'accélérateur de 400 GeV. En brun : aimant de la chambre ; en rouge : blindage d'arrêt des particules secondaires ; en vert : dispositif de détente de la chambre ; en noir dans l'aimant : le corps de la chambre proprement dit.



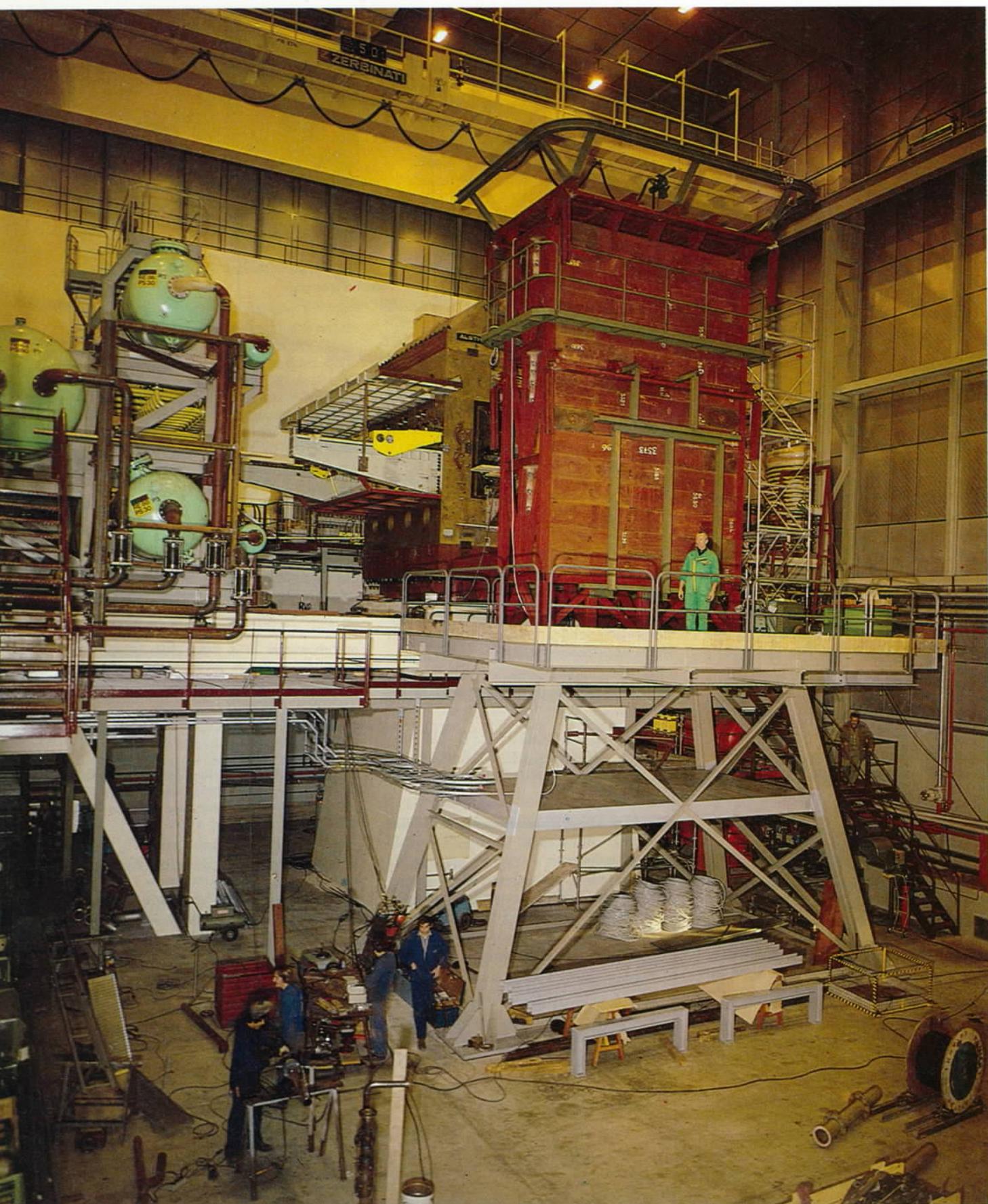
BEBC est une chambre à bulles à hydrogène liquide de 3,70 m de long, construite dans le cadre d'un accord tripartite CERN-France-République fédérale d'Allemagne.

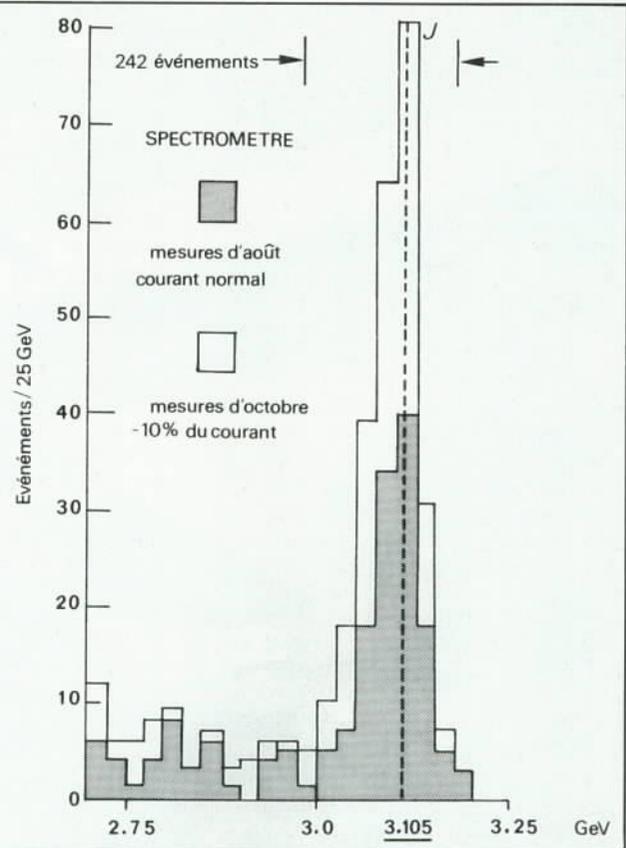
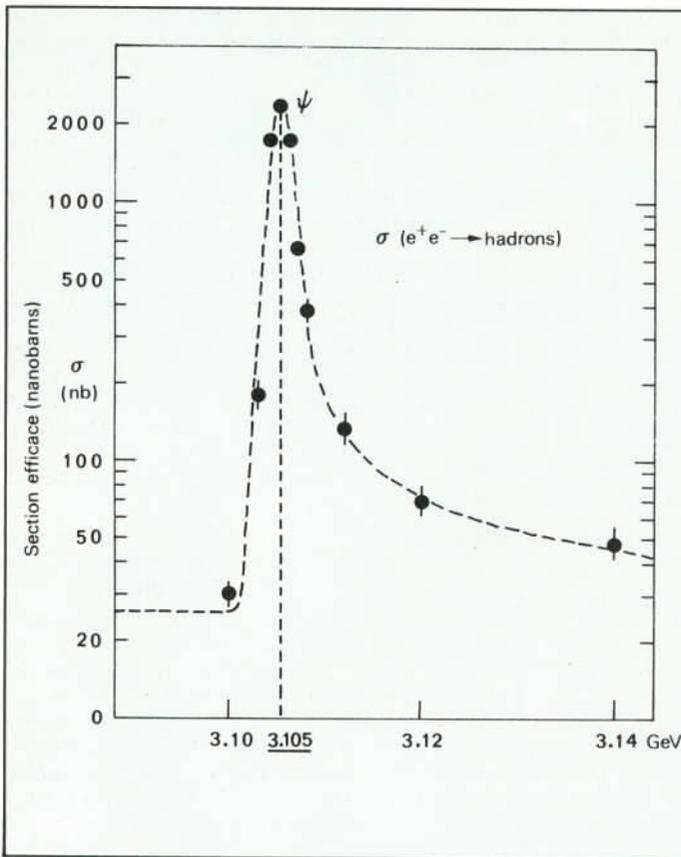
selon des lois de symétrie, celles des groupes SU3. Ces objets sont baptisés quarks. Gell Man explique tantôt qu'il a tiré ce mot bizarre de James Joyce et tantôt qu'il l'a tiré de Lewis Carroll...

Les quarks possèdent donc les grandeurs caractéristiques que l'on retrouve dans les particules : masse, charge, spin, parité, etc. Et l'un de ces quarks, un seul, sera gratifié d'étrangeté. Les particules étranges seront celles qui auront un, ou plusieurs, quarks étranges. Il existe donc trois quarks baptisés u (pour « up »), d (pour « down ») et s (pour « strange ») et, naturellement, les trois antiquarks correspondants. Les baryons sont composés d'un triplet de quarks, les mésons d'une paire quark-antiquark.

particules avec des quarks de charge entière.

Alors Gell Man décida de sauter le pas : les quarks auraient des charges fractionnaires : $+ 2/3$ pour u , $- 1/3$ pour d , $- 1/3$ pour s . Des charges électriques fractionnaires ! Cela ne s'était jamais vu en physique. Depuis que l'on connaît l'électricité, la charge élémentaire s'est toujours révélée indivisible. Ce postulat d'une charge fractionnaire choquait les physiciens et faisait douter de la théorie. Certes on voyait bien que uud donnait un proton ($+ 2/3 + 2/3 - 1/3 = + 1$), que udd donnait le neutron ($+ 2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$), mais cela semblait une explication commode. Pour être crédible, le modèle devait se révéler opératoire, permettre la prédiction.





troisième était porteur de l'étrangeté, le quatrième serait porteur d'une nouvelle propriété que ces physiciens baptisèrent le « charme ». L'hypothèse des trois quarks conduisait à utiliser des groupes de symétrie SU3; il fallait maintenant organiser les particules sur des groupes SU4, ce qui conduisait à prévoir l'existence de nouvelles particules.

Gell Mann préférait compléter son modèle en lui adjoignant une nouvelle propriété, la couleur, qui différenciait les trois quarks sans en ajouter un quatrième. Les quarks pourraient exister en trois états différents, états baptisés rouge, bleu et blanc. Ces quarks colorés devraient être associés dans les particules selon des conditions telles que la résultante soit nulle car les trois couleurs, en se combinant, se détruisait mutuellement. D'après cette théorie, un proton, par exemple, se serait composé d'un quark rouge, d'un bleu et d'un blanc donnant au total une absence de couleur pour la particule.

C'était fort ingénieux. Mais le charme autant que la couleur restaient des vues de l'esprit. Il fallait attendre le

La découverte de la particule Psi vue par un physicien de l'accélérateur linéaire de Stanford, Bob Gould.

verdict de l'expérience pour trancher dans un sens, dans un autre... ou dans un troisième...

III - DECOUVERTE DE LA NOUVELLE FAMILLE DE PARTICULES

Les physiciens s'étaient naturellement lancés à la recherche du quark qu'ils espéraient reconnaître grâce à sa charge électrique-fractionnaire. Il

(A gauche), découverte de la particule ψ à l'accélérateur linéaire de Stanford (Californie) en octobre 1974. Etude de la section efficace (probabilité de production de particules ψ) lors d'une annihilation électrons-positrons. (A droite), particule J découverte au proton-synchrotron de Brookhaven (Etat de New York) également en octobre 1974. Etude du nombre d'événements (production de particules J) lors d'une interaction proton-béryllium. Les particules ψ et J sont en fait une seule et même particule dont la découverte a été annoncée conjointement par Stanford et Brookhaven en octobre 1974.

eurent beau multiplier les expériences, ils ne trouvèrent rien. On eut droit à quelques fausses alertes, notamment dans l'étude des rayons





Burton Richter (à droite), directeur de recherches à Stanford, qui découvrit accidentellement la particule Psi.

cosmiques. Il fallait se rendre à l'évidence: le quark, s'il était observable à l'état isolé, devait posséder une masse très élevée et ne pouvait être créé dans les installations existantes. Mais, tandis que la théorie piétinait, que l'expérimentation marquait le pas, une nouvelle génération de machines naissait à Batavia et Stanford aux Etats-Unis, au CERN en Europe. C'est seulement après 1970 que la marche en avant a pu reprendre.

Au CERN, tout d'abord, des expériences sur les neutrinos confirmèrent l'existence de courants neutres à côté des courants chargés que l'on observait ordinairement dans les interactions nucléaires faibles. Ceci conforte l'existence d'une particule neutre jouant pour les interactions nucléaires faibles le même rôle que le photon pour les interactions électromagnétiques. Ainsi se trouvait confirmée la possibilité de la fameuse désintégration d'un kaon neutre en deux muons. L'existence de cette réaction rendait plus nécessaire que jamais celle d'une nouvelle propriété, charme ou couleur.

Deux naissances pour une particule

Le 11 novembre 1974 se réunit, comme chaque mois, un comité consultatif composé de 10 sommités américaines de la physique. La réunion se déroule à Stanford. Le professeur Richter, qui dirige une équipe du SLAC (Stanford Linear Accelerator) se réserve d'y annoncer la découverte d'une nouvelle particule extrêmement surprenante qu'ils ont baptisée Psi. Mais une heure avant le début des entretiens, c'est le professeur Samuel Ting, de Brookhaven, qui vient voir en particulier le professeur Wolfgang Panovsky, directeur du SLAC pour lui apprendre qu'il va révéler la découverte d'une nouvelle particule J.

Il apparaît rapidement que la particule J dont parle Ting n'est autre que la particule Psi ψ dont parle Richter. Il ne leur reste plus qu'à annoncer conjointement cette naissance... et à se partager le prix Nobel deux ans plus tard.

Il est intéressant de remarquer que les deux équipes travaillaient indépendamment l'une de l'autre avec des appareils entièrement différents et des techniques également dissemblables.

Le nouveau « cousin » d'Amérique

Découvrir une nouvelle particule, et même deux car une particule ψ' fut trouvée à 3,684 GeV, ne veut pas dire comprendre sa raison d'être, à moins que la nouvelle venue ne corresponde point par point aux prédictions de la théorie. Ce que les expérimentateurs connaissaient de la particule ψ se limitait à sa masse, 3,105 GeV, et à son temps de vie : 10^{-20} seconde. Ce dernier point surtout surprenait. Si cette particule de très forte masse n'était qu'un état résonnant d'une particule de faible masse, elle devait disparaître très rapidement par interactions fortes. Sa durée de vie ne devait donc pas dépasser 10^{-23} seconde. Avec 10^{-20} seconde, le ψ vivait donc mille fois trop longtemps pour n'être qu'un nouvel état excité de particules connues, ce devait être vraisemblablement une nouvelle particule. Les chasseurs de Stanford et Brookhaven se tournèrent donc vers leurs confrères théoriciens pour identifier la « bête curieuse », selon leur propre expression, qu'ils venaient de capturer.

Les théoriciens essayèrent de faire

rentrer le ψ dans les grands modèles qu'ils conservaient en réserve: la couleur et le charme. Indiscutablement la théorie du « quark charmé » semblait mieux correspondre à la nouvelle découverte. Dans cette hypothèse, en effet, la particule ψ pouvait correspondre à l'association d'un quark charmé c et d'un anti-quark charmé \bar{c} , c'est-à-dire à la paire de quarks que Bjorken et Glashow avaient ajouté au modèle de Gell Mann. Mais une telle combinaison, baptisée charmonium, ne permet pas d'observer directement le charme: cette dernière propriété est en quelque sorte occultée par la présence simultanée du quark charmé et de l'antiquark charmé dans la particule.

La famille s'agrandit avec le méson D

Seule la combinaison d'un quark charmé et d'un ou de deux autres quarks non charmés permettrait de mettre définitivement le charme en évidence. Les chasseurs étaient sur la piste, les découvertes ne tardèrent pas. Les premières indications furent enregistrées en CERN par une équipe européenne.

La technique utilisée au CERN ne permet pas d'observer directement des particules à très courte durée de vie. Or tel était le cas de ce fameux méson D, formé d'un quark non charmé et d'un quark charmé, que cherchaient les physiciens. La théorie donnait à penser que cette particule devait se désintégrer par interaction faible en 10^{-13} seconde. Cette durée est fort longue par rapport au 10^{-23} seconde des interactions nucléaires fortes, mais fort brève quand on veut

Compositions possibles des quarks

| | Hadrons communs | Hadrons étranges | Hadrons charmés |
|--|--|--|--|
| 1. Baryons composés de 3 quarks | uud proton uud neutron uuu delta ⁺⁺ ddd delta ⁻ | uus sigma ⁺ uds sigma ⁰ dds sigma ⁻ sss omega ⁻ | uuc udc baryons dsc charmés ccc |
| 2. Antibaryons composés de 3 antiquarks | $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$ antiproton $\bar{u}\bar{d}\bar{d}$ antineutron | $\bar{u}\bar{u}\bar{s}$ antisigma ⁺ $\bar{u}\bar{d}\bar{s}$ antisigma ⁰ | $\bar{u}\bar{u}\bar{c}$ antibaryons $\bar{u}\bar{d}\bar{c}$ charmés |
| 3. Mesons composés de quarks / antiquarks | $u\bar{d}$ pi ⁺ $d\bar{u}$ pi ⁻ $u\bar{u}$ rho ⁰ $d\bar{d}$ ω | $u\bar{s}$ K ⁺ $s\bar{u}$ K ⁻ $s\bar{s}$ phi ⁰ $d\bar{s}$ K ⁰ $s\bar{d}$ \bar{K}^0 | $u\bar{c}$ D ⁰ $c\bar{u}$ D ⁰ $c\bar{s}$ F ⁺ $s\bar{c}$ F ⁻ $c\bar{c}$ $d\bar{c}$ D ⁺ $c\bar{d}$ D ⁻ |



Dans les chambres à bulles, un cliché est nécessaire pour connaître la nature de l'événement qui s'y est produit. Au contraire, avec les chambres à étincelles à fils (voir Sciences et Avenir, n° 311, janvier 1973, un article de François de Closets : Un nouveau piège pour les particules), on enregistre les positions d'une particule chargée ce qui permet de reconstituer la trajectoire et de l'analyser.

suivre une particule à la trace sur un cliché de chambre à bulle.

Heureusement, la théorie permettait de prévoir assez bien cette descendance.

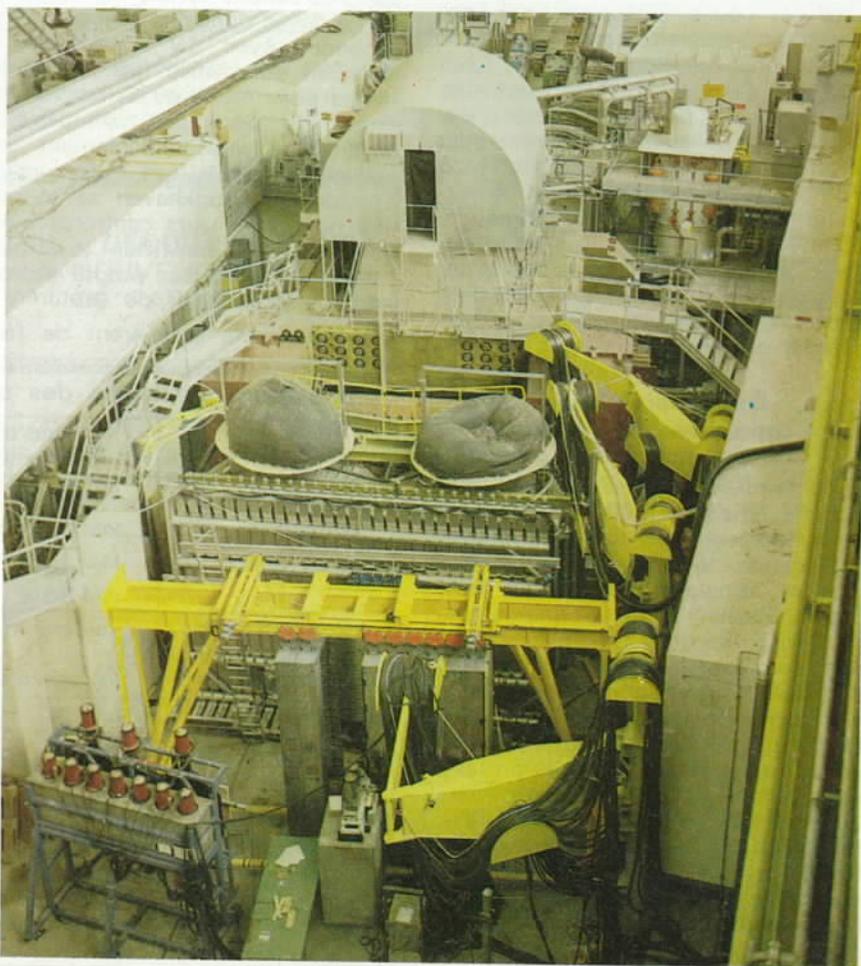
Les physiciens de Stanford possèdent, eux, associé à leurs anneaux de collisions électrons-positrons, un dispositif d'observation plus précis. Il s'agit d'une série de chambres à fils dans lesquelles la présence d'une particule est enregistrée, non par le sillage qu'elle laisse dans l'hydrogène mais par les impulsions électriques qu'elle induit dans un fil. On dispose alors des trames de fils extrêmement serrées pour reconstituer la trajectoire en observant les impulsions électriques émises dans le réseau.

Les chercheurs de Stanford cherchent donc à observer la réaction suivante :



Ces mésons charmés se décomposent ensuite en mésons K et en mésons π .

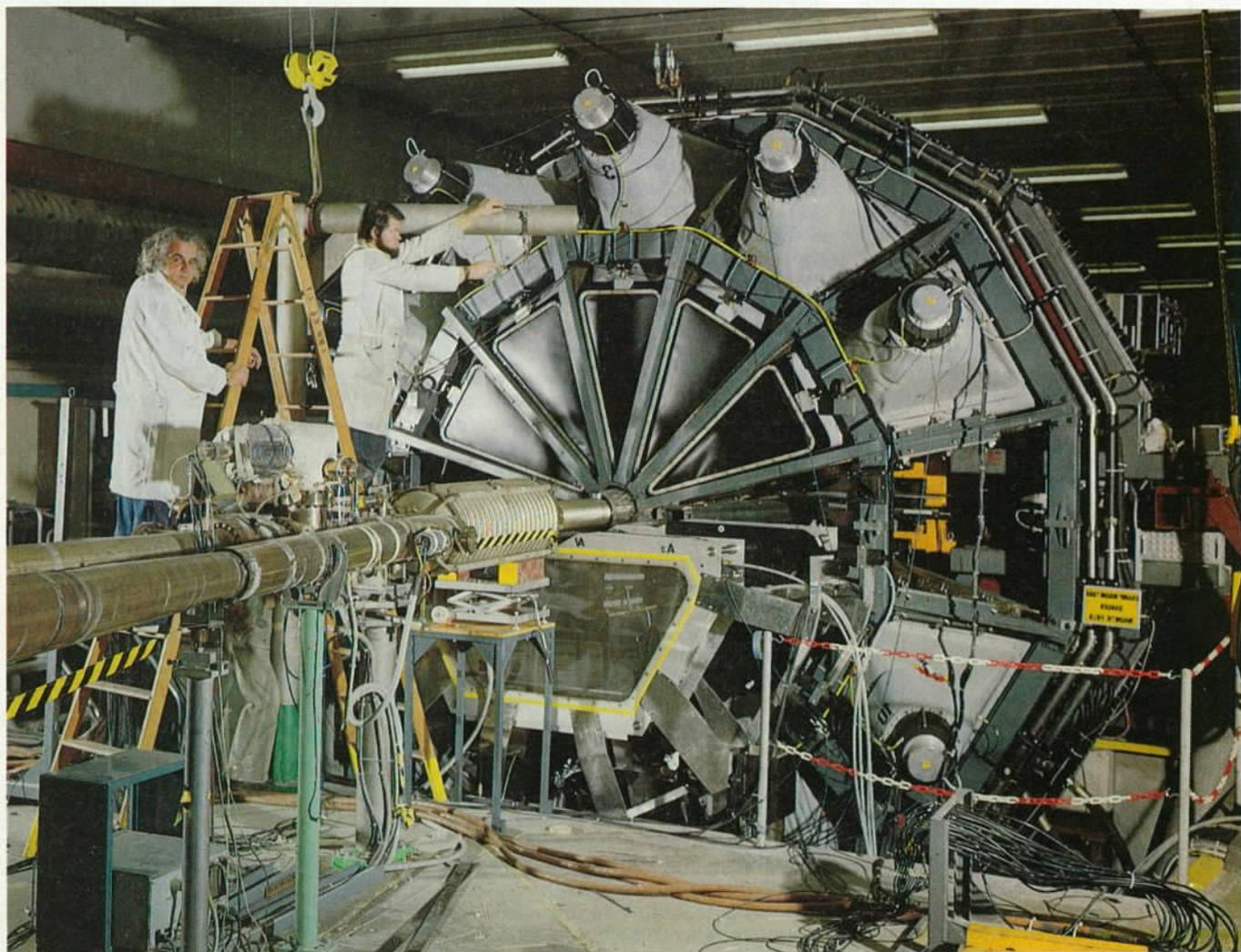
L'un des tout derniers dispositifs de détection électronique des particules dont dispose le CERN : le dispositif Omega placé près du grand accélérateur européen, est entré en service le 7 janvier dernier. Des chambres à étincelles y fonctionnent dans un aimant supraconducteur à champ élevé.



Effectivement, en juin 1976, la réaction était observée. Elle permettait d'établir que ce méson possédait une masse au repos de 1,865 GeV, que sa durée de vie était de l'ordre de 10^{-13} seconde, et qu'il se désintégraît, selon les cas, en un méson K et un méson π ou bien en un méson K et trois mésons π .

Il restait à trouver les mésons D^+ et D^- également prévus dans la nouvelle théorie des quarks. En effet, si le méson, D^0 est composé de la paire $c\bar{u}$, on peut prévoir les combinaisons de quarks c et d donnant la première un méson D^+ , la seconde un méson D^0 et un comportement assez voisin. Les expériences de Stanford les a également trouvées. Il ne reste plus alors qu'à trouver les deux derniers prévus par la théorie : la paire de quarks $c\bar{s}$ baptisée méson F^+ , et la paire $s\bar{c}$, baptisée méson F^- .

Quand ce sera fait, les physiciens posséderont les 16 mésons prévus par la théorie du quark-charmé. En effet, la théorie primitive, se fondant sur des groupes de symétrie SU3, ne prévoyait que 9 paires de quarks. La



Montage d'un dispositif détecteur des particules secondaires produites lors de collisions frontales de protons dans les anneaux de stockage du CERN. On voit sur ce cliché trois types de détecteurs : au centre en bas, le trapèze entouré de jaune est une chambre à fils ; les gros cônes à la périphérie du dispositif, des compteurs Tcherenkov dans lesquels le passage d'une particule chargée à une vitesse supérieure à celle qu'aurait la lumière dans le matériau du compteur provoque l'émission d'une onde lumineuse de choc sous un angle fonction de la vitesse de la particule, ce qui permet de n'enregistrer que les particules d'une vitesse déterminée. Quant aux panneaux noirs triangulaires disposés au centre, ce sont des scintillateurs faits de matériau scintillateur qui enregistre le passage d'une particule chargée sous forme d'un minuscule éclair lumineux. Les faisceaux de protons amenés en collision, au centre, sont transportés par les deux tubes convergents que l'on voit à droite.

nouvelle théorie, en combinaison SU4, en annonce 16.

Mais la chasse ne cessera pas pour

autant. Si, en effet, la théorie du charme permet de former de nouveaux mésons, elle permet aussi de former de nouveaux baryons avec des triplets de quarks. Les groupes de symétrie SU4 désormais utilisés permettent ainsi de prévoir deux groupes de 20 baryons – avec SU3 on ne formait au plus qu'un décuplet. C'est dire que la chasse aux grosses particules est ouverte et que le gibier s'annonce abondant.

La théorie du charme et les développements qui en ont résulté pour la

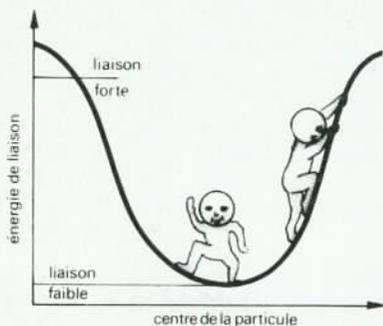
IV – PEUT-ON LIBERER LE QUARK ?

théorie des quarks sont fort éclairants pour comprendre le monde des particules, pour en faire en quelque sorte la sociologie. Nous pouvons ainsi comprendre pourquoi existent certains types de particules. En revanche, cela n'éclaire pas beaucoup sur la nature même de la particule. On peut dire qu'il ne s'agit pas d'un objet fondamental – pour ce qui concerne les baryons en tout cas, car les leptons semblent bien être des particules élémentaires. On peut dire encore que la particule se compose de deux ou trois constituants. Mais tout ceci resterait bien sommaire. Heureusement, les théoriciens ont poussé plus loin leurs réflexions. Ils ont dû prendre acte, tout d'abord, de la vaine chasse au quark conduite depuis plus de dix ans.

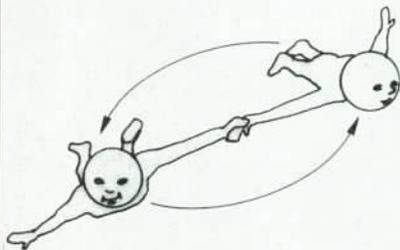
La preuve absolue de la théorie du quark, ce devrait être la découverte du quark isolé. L'identification ne

LA PRISON DES PARTICULES

1^{ère} hypothèse



2^e hypothèse la corde



3^e hypothèse le sac



devrait pas être bien difficile car cet objet porte un signe distinctif bien caractéristique : sa charge fractionnaire. Les principaux détecteurs doivent remarquer sans équivoque une telle anomalie. Qui plus est, cette même charge électrique fractionnaire interdit à un quark isolé de se transformer en une particule connue, puisque celles-ci ont soit des charges entières, soit des charges nulles. Certains quarks, à tout le moins, devraient donc avoir une bonne stabilité à l'état isolé.

Les expériences pour piéger le quark n'ont pas manqué. La recherche a été poussée avec des énergies de plus en plus élevées. Sans succès. Même dans le rayonnement cosmique, où l'on dispose des plus grandes énergies, rien n'a été trouvé. Il faut donc, à tout le moins, admettre que le quark au repos possède une énergie énorme, très supérieure à celle des particules les plus légères, comme les mésons ou les protons qu'il compose. Certes, il est naturel que, dans la particule, une partie de la masse soit transformée en énergie de liaison, mais il est quand même bien difficile d'admettre que la masse de la partie soit plusieurs fois supérieure à la masse du tout. Pourtant la gamme des énergies jusqu'à 3 GeV est maintenant bien explorée et les expériences les plus variées n'ont permis d'identifier aucun quark. C'est assurément une des grandes faiblesses du modèle. Les théoriciens doivent maintenant intégrer dans la théorie la possibilité que le quark ne puisse exister, ou du moins être observé, à l'état isolé. Mais le modèle pose encore bien des problèmes au niveau de la constitution de la particule à partir des quarks.

Les règles de construction de la particule à partir des quarks semblent fort simples. Chaque quark est affecté d'un certain nombre quantique et l'on additionne les nombres des quarks pour retrouver ceux de la particule. On en vient ainsi à donner au quark une valeur spin égale à $1/2$. Il se trouve qu'une telle valeur entraîne des conséquences très précises en physique quantique. Les physiciens connaissent des particules dont la valeur de spin se mesure en nombres entiers et d'autres dont les valeurs se mesurent en nombres fractionnaires. Les premières forment la famille des bosons dont font partie les photons ou les mésons π , les secondes forment la famille des fermions qui comporte notamment les électrons et les protons. On fait cette distinction car le comportement de

ces deux familles est fort différent. Les fermions sont soumis au principe d'exclusion de Pauli, c'est-à-dire qu'il ne peut exister deux particules de même type, dans le même état en un même lieu. Au contraire les bosons ne sont pas soumis à cette loi.

Toute l'architecture de l'atome est commandée par cette loi. Les nucléons, protons et neutrons à l'intérieur du noyau, et les électrons dans le cortège orbital s'organisent en respectant l'exclusion. C'est-à-dire que ces particules tournent sur des niveaux d'énergie quantifiés en n'étant jamais plus de deux sur un même niveau. Les deux particules ont bien la même énergie, mais comme leurs spins sont orientés l'un dans un sens et l'autre dans le sens inverse, le principe d'exclusion est respecté. En revanche, si une troisième particule venait se placer sur la même orbite, son spin serait forcément dans le sens de l'une ou l'autre particule : le principe d'exclusion serait alors violé et c'est pourquoi il n'y a jamais plus de deux électrons par orbite.

Or les quarks se voient attribuer des spins de $1/2$; ce sont donc des fermions. Comme tels, ils doivent être astreints au principe d'exclusion. Pour les mésons, cela ne pose pas grand problème, puisqu'un quark est associé à un antiquark : si même il s'agit du même quark, le principe de Pauli se trouve respecté. En revanche, il devient bien difficile de comprendre comment peuvent se former des baryons composés de trois quarks semblables par exemple uuu , ddd ou sss . L'étude des niveaux d'énergie des particules semble bien indiquer que les quarks sont placés sur des orbites quantifiées. On ne voit pas comment éviter que cohabitent deux quarks de même spin. C'est pour résoudre notamment cette difficulté que certains théoriciens tiennent au modèle de la couleur. La couleur est donc un « nombre quantique », c'est-à-dire une propriété tout aussi abstraite que le charme ou l'étrangeté, mais elle permettrait de distinguer trois types différents de chaque quark. Dans ce cas, les triplets uuu ou ddd peuvent coexister car chaque quark possède une couleur différente. Cela ne se manifeste pas à l'extérieur : dans tous les cas, les couleurs des quarks contenus dans la particule doivent s'annuler pour donner une particule incolore. Il reste aussi à définir le champ de liaison qui unit les quarks au sein de la particule. Remarquons tout d'abord que ce champ possède une

particularité fort curieuse : il semble interdire au quark tout à la fois de vivre seul, de se marier avec un autre quark, de se regrouper par paquets supérieurs à trois. Pourquoi ce champ n'autorise-t-il que l'accouplement d'un quark et d'un antiquark ou bien l'assemblage de trois quarks ou de trois antiquarks, à l'exclusion de tout autre état ou combinaison ? Pourquoi tout assemblage de quarks doit-il au total donner une charge électrique nulle ou entière, mais jamais fractionnaire ? Ce sont là des faits de constatations que toute théorie du champ de liaison doit prendre en compte et expliquer. Il y a là de quoi stimuler l'imagination des théoriciens !

Il est généralement admis que cette force de liaison interquarks doit s'exercer, comme les autres couplages connus, par l'intermédiaire d'une particule de liaison. A tout hasard, et sans que ce baptême préjuge du baptisé, on a nommé « gluon » cet agent de liaison, cette glu- qui ciment la particule. Des essais ont été faits pour caractériser le champ de force. Ils débouchent sur des modèles compliqués qui s'éloignent des lois simples régissant le champ gravitationnel par exemple. Dans le modèle de la couleur, les théoriciens doivent imaginer la superposition de huit champs faisant intervenir huit gluons différents pour souder l'ensemble... Mais les confirmations expérimentales manquent encore.

Comment diable les quarks peuvent-ils être retenus dans les particules, empêchés de s'en échapper ? Les hypothèses vont bon train à ce sujet. Certains auteurs pensent que le champ de liaison à la différence du champ électromagnétique par exemple (qui décroît avec la distance), pourrait être plus fort loin que près... Si donc on tente d'explorer le proton avec une particule de faible énergie, celle-ci ne peut s'approcher très avant du centre de masse. Restant à distance, elle voit des quarks très liés. Le proton semble un objet monolithique. Au contraire, avec des particules très énergiques qui pénètrent dans la particule tout près de son cœur, on voit des quarks beaucoup moins liés. Effectivement, le proton révèle une structure composite quand on l'examine avec des électrons de très haute énergie. Mais on ne saurait ainsi arracher les quarks puisque leur énergie de liaison augmentera à mesure qu'ils voudront s'éloigner.

D'autres auteurs, notamment Gabriel Veneziano de l'Institut Weizman, ont imaginé un modèle, dit de la corde,

dans lequel les quarks seraient placés aux deux extrémités d'un axe en rotation très rapide. Dans cette hypothèse, les quarks présents à l'intérieur de la particule sont de simples structures sans masses porteuses des nombres quantiques, alors que la masse et le moment sont dans la « corde » qui les relie. Il est, là encore, impossible de les arracher pour les observer isolément. Mais si l'on peut aisément construire sur ce modèle des mésons constitués par une paire de quarks, il est difficile de faire des baryons composés d'un triplet.

D'autres encore, comme Kenneth A. Johnson du MIT, préfèrent imaginer les quarks emprisonnés dans une sorte de sac qu'ils ne peuvent traverser. Si l'énergie des quarks augmente, le sac se gonfle et l'énergie du sac s'accroît dans les mêmes proportions.

Dans tous ces modèles, et dans d'autres qui naissent ici où là, le quark se trouve donc prisonnier dans la particule. Pour que l'observation d'un quark isolé devienne impossible il n'est pas nécessaire, notons-le bien, que l'énergie nécessaire pour l'arracher soit infinie. Il suffit que cette énergie corresponde à celle qu'il faut pour créer une paire quark-antiquark ; on voit que tout effort réussi pour obtenir une extraction se traduit purement et simplement par l'apparition d'un méson. Un quark nouvellement extrait remplace dans la particule le quark extrait et ce dernier s'associe à l'antiquark pour former le méson. L'observateur, lui, n'a rien vu.

Nous voilà donc avec quatre quarks d'un côté, quatre leptons en face. La symétrie est troublante. D'un côté comme de l'autre, ces particules paraissent ponctuelles et non composites comme les baryons ou les

mésons. Mais les quarks sont sensibles à ce champ de liaison qui leur permet de s'associer en particules alors que les leptons restent insensibles à ces forces associatives. Jusqu'où peut-on donc pousser l'analogie ? Bien des théoriciens s'interrogent à ce sujet. En comprenant ces mystérieux champs de force qui régissent le monde des quarks, qui imposent certaines structures et interdisent les autres, ne finira-t-on pas par comprendre l'origine des dissimilitudes entre les grandes forces naturelles ? N'est-ce pas à ce niveau qu'un jour pourra s'effectuer la réunification des champs qu'Einstein chercha vainement toute sa vie ?

Autant de questions désormais ouvertes. Mais il ne faudrait surtout pas considérer comme définitif l'état présent de notre zoo particulaire, même en comptant les particules charmées que l'on attend. Au départ, avant 1940, on ignorait les particules étranges. C'est la montée en énergie qui les a fait découvrir. Un échelon de plus, et l'on découvrirait les particules charmées. Ainsi sommes-nous arrivés au quartet de quarks. Rien ne prouve qu'une nouvelle escalade dans l'énergie ne révélerait pas l'existence de particules encore plus lourdes correspondant à l'existence d'un cinquième quark... et ainsi de suite. Rien n'indique non plus que la famille des leptons est close. Bien des théoriciens, au contraire, faute d'y trouver des symétries satisfaisantes, ont plutôt tendance à penser qu'il en existe d'autres membres cachés dans les hautes énergies. A ces questions non plus il n'est pas possible de répondre, mais la théorie doit se garder prête pour toute surprise et des surprises en physique des particules, on est assuré qu'il y en aura ! ●

Un événement « historique » : l'interaction d'un neutrino (A) sur un noyau atomique du liquide remplissant la chambre à bulles « Gargamelle » du CERN, à Genève, produit une combinaison peu usuelle de particules secondaires : deux leptons (un muon négatif μ^- et un positron positif e^+) et une particule étrange neutre (S). Cette dernière se désintègre à son tour en un V caractéristique. La combinaison décrite s'expliquerait par la présence d'une caractéristique de particules, dite « charme ».

