

**COLLÈGE DE FRANCE**

---

**CHAIRE DE PHYSIQUE CORPUSCULAIRE**

---

**LEÇON INAUGURALE**

---

*faite le Jeudi 10 Janvier 1974*

PAR

**M. MARCEL FROISSART**

Professeur

---

Monsieur l'Administrateur,  
Mes chers Collègues,

Lorsque vous m'avez laissé entendre que vous envisagiez de me confier la chaire de Physique Corpusculaire que vous aviez l'intention de créer, je fus extrêmement flatté et intéressé. Flatté d'entrer dans cette maison prestigieuse, et intéressé à animer l'ensemble important de laboratoires qui avaient été créés par Francis Perrin et par Louis Leprince-Ringuet sous des dénominations qui ne correspondaient plus guère à l'objet des recherches qui s'y déroulaient. En effet, tant au Laboratoire de Physique atomique et moléculaire qu'au Laboratoire de Physique nucléaire, on faisait de la physique corpusculaire, à un niveau de renommée internationale. C'eût été pitié que de voir disperser des groupes aussi efficaces, et c'est avec un sens très aigu des responsabilités que j'assume envers mes collaborateurs que j'ai accepté de diriger ces laboratoires. Et je dois ajouter que, si j'arrive à m'acquitter de ces responsabilités avec succès, le cadeau de ces laboratoires aura doublé la dette de reconnaissance que je vous dois : à vous, Louis Leprince-Ringuet, qui avez été mon professeur à l'Ecole Polytechnique, qui m'avez attiré dans votre laboratoire à cette époque, et avez éveillé mon goût pour ce type de physique, qui était encore bien artisanal, et où l'on attendait les rayons cosmiques pour prendre des clichés à la chambre de Wilson. C'est là que, pour la première fois, je me suis initié à la lecture des traces photographiées et à leur interprétation. A vous aussi, Francis Perrin, qui, à l'époque où je suis entré au Commissariat à l'Energie Atomique, couvriez de votre ombre tutélaire ce petit noyau de jeunes chercheurs qui, dans le département du professeur Yvon, s'occupaient de tout sauf d'Etudes de Piles, et qui, grâce à vous, réussit à atteindre la masse critique et prit une existence autonome sous le nom de Service de Physique théorique.

A ces remerciements, je voudrais joindre ceux que je destine à Jacques Prentki, toi qui as guidé mes premiers pas sur les sentiers glissants de la théorie, à l'époque héroïque du CERN naissant, ainsi que ceux que j'adresse à Anatole Abragam, vous qui m'avez si judicieusement réorienté il y a quelques années de la recherche purement théorique à la recherche expérimentale, qui, à l'usage, m'apparaît tellement plus solide et sérieuse que la spéculation théorique vite née et vite oubliée.

Mesdames, Messieurs,

Au cours de cette leçon inaugurale de la Chaire de Physique corpusculaire, je pense qu'il serait bon, non pas de vous présenter en détail l'objet et le programme de mon cours de cette année, mais bien plutôt de vous exposer ce qu'est actuellement cette science, largement bimillénaire, et qui, par définition même, reste constamment à la limite ultime de nos connaissances, dans la direction de l'infiniment petit. En effet, son objet, d'après la définition que donne Littré des corpuscules, est l'étude des composants de la matière d'une ténuité extrême... c'est-à-dire toujours des plus ténus que l'on connaisse.

Après de longs siècles de conjectures d'ordre métaphysique, dues largement à l'incapacité des Anciens de concevoir le continu, cette science est enfin arrivée à l'âge expérimental au cours du XIX<sup>e</sup> siècle, époque où l'on a enfin pu déterminer un ordre de grandeur pour la taille des molécules et des atomes, les corpuscules de l'époque. Un grand pas en avant fut fait au début du XX<sup>e</sup> siècle par l'expérience de Rutherford. Celui-ci, projetant des rayons  $\alpha$  énergiques

sur des feuilles métalliques minces, pouvait observer une certaine diffusion de ces rayons à la traversée de la feuille mince, mais, pour une énergie suffisamment élevée des rayons  $\alpha$ , l'angle moyen de déviation devenait très faible. C'est ce que l'on pouvait attendre de la diffusion par un milieu relativement homogène. Cependant, il observa une anomalie surprenante. Une faible fraction des rayons  $\alpha$  étaient déviés à des angles considérables. Il fallait donc admettre qu'au centre de l'atome métallique, il y avait une petite zone – correspondant au faible nombre de rayons fortement déviés, où les forces devenaient très importantes pour être capables de dévier ainsi des rayons  $\alpha$  énergiques. L'étude de ce phénomène allait aboutir à la conception d'une sous-structure de l'atome composé d'un noyau, très petit et portant l'essentiel de la masse de l'atome, et d'un nuage relativement étendu et homogène, constitué par des électrons légers, retenus autour du noyau par des forces électriques.

Les corpuscules de cette nouvelle science étaient devenus les noyaux et les électrons. Mais bientôt, grâce aux phénomènes de radioactivité, il fallut se rendre à l'évidence : le noyau n'était pas non plus le composant ultime, le corpuscule élémentaire. Dans les réactions de désintégration radioactive, et notamment dans la radioactivité  $\alpha$ , on pouvait observer des noyaux se brisant spontanément en fragments plus petits. On arrivait à la physique nucléaire dont les corpuscules élémentaires sont le proton et le neutron, qui ont des interactions très fortes à courte distance, et qui se collent ainsi les uns aux autres en nombres variés pour former les centaines de noyaux que l'on connaît.

Avant d'entrer dans le vif de mon sujet, je dois vous parler également de l'évolution du mode de description des phénomènes microscopiques, qui s'est imposée au fur et à mesure de la découverte des faits expérimentaux que je viens de vous décrire aussi qualitativement que succinctement. En effet, si l'on veut aborder une description précise des phénomènes, des propriétés observées, le langage classique se révèle rapidement impuissant. Nous sommes obligés de sortir du cadre étroit de ce langage dans deux directions.

La première insuffisance du langage classique est la distinction fondamentale que l'on fait entre la notion d'onde et la notion de particule. Et pourtant, la querelle qui avait opposé Huyghens et Newton sur la question de savoir si la lumière était ondulatoire ou particulaire aurait dû mettre les physiciens en garde contre une distinction trop tranchée : partant de prémisses considérées comme irréductibles l'une à l'autre, ils arrivaient tous deux à une explication satisfaisante des mêmes phénomènes. Puis survinrent les expériences cruciales de Fresnel et d'Young qui donnèrent raison pour un temps à Huyghens. Mais l'interprétation par Einstein de l'effet photoélectrique donna raison à Newton, ou plutôt montra que l'on ne pouvait pas séparer les deux principes : onde et corpuscule. Louis de Broglie, Heisenberg, Schrödinger ouvrirent la voie à cette synthèse dialectique, qui fut mise en forme par l'école de Copenhague. Malheureusement, la formulation de la Mécanique quantique telle qu'elle se présente actuellement fait constamment appel à des notions mathématiques relativement complexes, ce qui constitue un obstacle très sérieux à sa diffusion dans le grand public : étant donné que l'on ne peut accéder à son étude que dans l'Enseignement supérieur, l'ensemble de la physique aux dimensions moléculaires ou inférieures est un domaine réservé à quelques privilégiés qui font ainsi figure de mages aux yeux du grand public.

Un autre aspect non classique de la physique corpusculaire et qui en rend également l'approche rebutante pour beaucoup est la Relativité. Il est rendu inéluctable par les vitesses élevées mises

en jeu déjà dans les atomes les plus lourds, où les électrons atteignent des vitesses comparables à celle de la lumière, et également dans les noyaux, où les protons et neutrons sont animés de vitesses de l'ordre du dixième de celle de la lumière, déjà dans l'état fondamental, c'est-à-dire l'état le moins énergétique.

La synthèse entre la Mécanique quantique, d'une part, et la Relativité, de l'autre, n'est pas chose facile, et ce n'est qu'après la dernière guerre mondiale que des Schwinger, Dyson ou Feynman ont réussi à formuler une théorie satisfaisante, ou tout au moins bien définie. Encore faut-il préciser que cette théorie, l'électrodynamique quantique, ne recouvre que les phénomènes d'interaction entre les électrons, ou les muons, et le champ électromagnétique. Malgré un accord remarquable avec l'expérience, dans ce domaine, il s'est révélé impossible jusqu'à présent de construire une théorie cohérente qui rende compte des autres types d'interaction que l'on connaît : interaction forte de la matière nucléaire, interaction faible qui provoque la radioactivité, interaction gravitationnelle. L'électrodynamique quantique reste un modèle, mais on ne peut pas dire que l'on dispose à l'heure actuelle d'une théorie cohérente qui rende compte des phénomènes observés à l'échelle inférieure.

Car il existe une échelle inférieure : les constituants élémentaires du noyau, les protons et les neutrons, ont une structure, et même une structure complexe. Les premières manifestations de cette structure ont été observées dans les collisions entre des noyaux de l'atmosphère et ces noyaux qui nous arrivent de l'espace galactique à très grande vitesse et que l'on appelle rayons cosmiques. Ces collisions donnent évidemment lieu à la fragmentation des noyaux qu'elles impliquent, mais, en plus de fragments stables ou presque que sont les protons et les neutrons, on observe de nouveaux types de particules. Ces particules sont instables, c'est-à-dire se désintègrent spontanément en plusieurs fragments, dans des temps de l'ordre du milliardième de seconde (nanoseconde), ce qui explique qu'on ne les ait pas observées plus tôt.

Penchons-nous un instant sur ce problème de fragmentation, soit au cours de collisions soit par désintégration spontanée. Ce langage classique est ici profondément trompeur. En effet, nous pourrions imaginer la fragmentation après une collision comme l'explosion d'un avion percutant une montagne. Dans ce cas, la commission d'enquête réunit le plus grand nombre de fragments possible pour reconstituer l'avion et le déroulement de la collision. Elle peut reconnaître l'avion dans l'ensemble de fragments, déceler s'il en manque, et lesquels, etc.

Dans le problème qui nous concerne, il n'en va pas du tout de même, et voici pourquoi : je voudrais vous rappeler d'abord la relation fondamentale d'Einstein qui relie la masse à l'énergie :  $E = mc^2$ , ou, en d'autres termes, la masse d'une particule au repos est équivalente à une certaine quantité d'énergie. En mécanique non relativiste, à laquelle le langage courant est adapté, cette relation n'a aucun intérêt, car on a deux principes séparés : conservation de la masse totale, et conservation de l'énergie totale, donc aucun transfert ne peut s'effectuer entre le compte « énergie » et le compte « masse ». Ceci explique que, quelle que soit l'intensité du choc, on peut retrouver tous les morceaux de l'avion après la catastrophe que j'évoquais tout à l'heure : le compte des morceaux est en fait le compte « masse » : il suffit de savoir si la masse totale des morceaux recueillis est égale à celle de la carlingue pour être sûr que l'on a retrouvé tous les morceaux.

Que signifie alors la relation d'Einstein que je vous ai citée ? En mécanique relativiste, dans certaines conditions, les deux comptes peuvent se mélanger. Tout ce qui est exigé absolument

par la théorie est que l'énergie totale, c'est-à-dire la somme de l'énergie de masse  $mc^2$ , de l'énergie cinétique, et éventuellement de l'énergie potentielle, soit conservée.

Il peut donc se faire qu'au cours d'une collision, des particules supplémentaires soient produites, supplémentaires en ce sens que la somme des masses des particules observées à l'issue de la collision, les fragments, soit supérieure à celle des deux particules qui se sont rencontrées. Il suffit pour cela que l'on se trouve dans le domaine relativiste, pour que l'échange soit autorisé, et d'autre part que la collision soit suffisamment énergétique pour que l'équivalent en énergie de la masse créée soit disponible.

Inversement, dans la désintégration spontanée d'une particule instable, il est nécessaire que la somme des masses des fragments soit inférieure à la masse de la particule initiale, afin que ceux-ci puissent s'éloigner l'un de l'autre, ce qui nécessite une certaine énergie cinétique.

Donc, le physicien est beaucoup moins bien armé que la commission d'enquête pour reconstituer le processus de collision, car il ne peut pas faire indépendamment son bilan en masse et son bilan en énergie : le tout est inextricablement mêlé.

Et c'est bien ce que l'on constate lors des collisions très énergiques que nous étudions : au fur et à mesure que l'énergie augmente, le nombre de fragments augmente, ce qui n'a rien d'étonnant ; mais ce qui paraît paradoxal est que leurs masses ne diminuent pas pour autant. En fait, on observe dans les produits de collision une demi-douzaine de types de particules, bien identifiées, dont la plus légère, le pion (ou méson  $\pi$ ) a pour masse un septième de celle du proton, et la plus lourde, l' $\Omega$ , environ le double de celle du proton. Et on a observé des collisions à haute énergie entre protons, fournissant des dizaines de fragments, où peuvent d'ailleurs aussi bien figurer des protons supplémentaires.

Donc il faut prendre cette notion de fragmentation avec des précautions importantes, en retenant bien que les fragments, aussi nombreux soient-ils, peuvent être identiques à l'une des particules initiales, ou même plus lourds.

Devant cette situation, on serait tenté une fois de plus de procéder par dichotomie en posant par principe soit que ces fragments préexistaient en quelque sorte au sein des particules initiales de la collision, soit qu'ils ont été créés *ex nihilo* à l'instant même de la collision. Nous verrons tout à l'heure que ces pétitions de principe, apparemment opposées, ne sont en fait guère opposables l'une à l'autre.

Prenons la première hypothèse. Comment plusieurs fragments peuvent-ils préexister au sein d'une particule dont la masse est plus faible que la somme de celle de ses fragments ? Pour approcher de la solution, passons par l'intermédiaire de la physique nucléaire en considérant le noyau le plus simple : le deuton, ou noyau d'hydrogène lourd. Il est composé d'un proton et d'un neutron. Ceux-ci, à faible distance, s'attirent violemment sous l'effet des forces nucléaires. Si donc on envoie un neutron sur un proton, et si, au moment où ils sont à proximité l'un de l'autre, ils peuvent rayonner suffisamment d'énergie, sous forme électromagnétique par exemple, il ne leur en restera plus assez pour vaincre les forces d'attraction nucléaires et ils resteront liés ensemble par ces forces. En termes non relativistes, on exprimera ce défaut d'énergie comme une énergie potentielle attractive, donc négative. En termes relativistes, on pourra se borner à constater que la masse du deuton est inférieure à la somme de celles du proton et neu-

tron initiaux. Ce défaut de masse est relié à l'énergie potentielle du langage non relativiste par la relation d'équivalence d'Einstein.

Ici, les deux descriptions sont correctes, car les vitesses impliquées dans la réaction que je viens de décrire restent faibles par rapport à celle de la lumière (de l'ordre de quelques centièmes). Mais il faut en retenir un point essentiel : c'est que le défaut de masse d'un système composite représente l'énergie de liaison entre les constituants.

Revenons maintenant au cas de la création d'une particule supplémentaire au cours d'une collision ; soit par exemple un proton qui se fragmente en un proton et un pion. Visiblement le défaut de masse est ici la masse du pion, si nous supposons qu'en quelque sorte le proton et le pion préexistent au sein du proton initial. Il est donc absolument essentiel, pour que la description que nous tentons de donner soit satisfaisante, qu'il existe entre le proton et le pion des forces suffisamment intenses pour que l'énergie de liaison soit précisément l'équivalent de la masse du pion. A cette réserve près, nous avons ainsi une image très intéressante du proton physique et de sa structure : on y voit coexister des états composés d'un nombre variable de particules liées entre elles d'autant plus étroitement que leur nombre est plus grand. Bien évidemment, ces particules ne sont pas toutes fixées au même point : elles ont une certaine liberté d'évolution autour d'une position centrale. Ceci est d'ailleurs lié au côté quantique du phénomène : l'aspect ondulatoire des constituants leur interdit d'être immobiles en un point fixe, mais au contraire requiert leur étalement sous forme d'un nuage.

C'est la présence d'un tel nuage autour du proton qui explique d'ailleurs les forces nucléaires : Yukawa avait prédit en 1935 l'ordre de grandeur correct pour la masse du pion à partir de la connaissance de la portée des forces nucléaires, c'est-à-dire de la taille du nuage, que l'on peut calculer très simplement à partir des hypothèses que nous venons d'exposer. Quand les nuages de pions de deux protons viennent à se chevaucher, l'aspect ondulatoire des pions interdit aux deux protons de reconnaître d'où proviennent les pions, qui sont ainsi partagés et attirés simultanément par les deux protons. Les forces nucléaires s'expliquent donc par cet échange constant de pions, et d'autres particules aussi, mais ce sont des pions « virtuels », que l'on ne peut faire apparaître à l'état réel que par l'apport d'une quantité d'énergie suffisante.

Passons à l'autre volet de l'alternative que je mentionnais tout à l'heure : peut-on considérer que des particules, au lieu de préexister au sein des particules initiales dans la collision, soient créées *ex nihilo* au moment de la collision ? La réponse est bien claire : c'est possible dans des conditions tout à fait semblables à celles qui doivent prévaloir pour préexister dans une particule. En effet, supposons qu'une paire de pions interagisse suffisamment fortement pour avoir un défaut de masse égale à la somme de leurs masses. A ce moment il est concevable qu'elle puisse perdre toute son énergie et disparaître entièrement. Inversement, un apport d'énergie dans le vide, d'une façon quelconque, peut rendre réelle une paire qui préexiste dans le vide. On doit alors imaginer le vide comme ayant également une structure constituée de particules virtuelles en nombre infini, qui ont toutes perdu la totalité de leur énergie.

Mais il n'est pas encore clair que l'on puisse mettre en évidence cette structure du vide, en raison de sa parfaite homogénéité. Tout ce que l'on peut espérer voir, sans doute, est la déviation de cette structure qu'impose la proximité d'une particule : échange entre le nuage du vide et celui de la particule. Ceci revient en fait à se ramener au cas précédent, car on ne peut pas faire vraiment de différence entre une particule virtuelle et une distorsion locale de la structure

virtuelle du vide.

Après ces quelques notions de base, nous voici bien équipés pour aborder notre propos : comment se présente à l'heure actuelle la structure extrême, ultime, de la matière ? Je voudrais décrire les quelques dernières étapes sur le plan surtout conceptuel et qualitatif.

Tout d'abord, introduisons le concept de démocratie nucléaire. Jusqu'ici j'ai parlé des particules que nous observons ; bien qu'instables, leur vie moyenne était de l'ordre du milliardième de seconde. En un milliardième de seconde, une particule animée d'un dixième de la vitesse de la lumière a le temps de parcourir 3 centimètres, ce qui laisse la possibilité de l'observer dans des conditions relativement aisées. Cependant, on a constaté, par des méthodes indirectes, qu'il existe des particules d'un temps de vie extrêmement bref, qui, à des vitesses comparables à celle de la lumière, se désintègrent sur un chemin moyen de l'ordre de grandeur des dimensions nucléaires. Ceci est dû au fait que la désintégration est provoquée par les forces nucléaires elles-mêmes, et non par les interactions beaucoup plus faibles qui sont associées par exemple à la radioactivité  $\beta$ . Ces particules extrêmement instables s'appellent des résonances.

Alors que l'on ne compte qu'une demi-douzaine de particules faiblement instables, on a observé de l'ordre d'une centaine de ces résonances. Si l'on cherche à classer ces résonances de façon systématique, en tenant compte de leurs diverses caractéristiques, faisant en cela un analogue de la taxonomie zoologique, on est rapidement conduit à considérer que le temps de désintégration, qui peut varier pour ces résonances par un facteur allant jusqu'à 100, n'est en fait pas un bon critère de classification. Et même plus, cette classification, qui permet de prédire l'existence de particules non encore observées, qui manquent à des familles encore incomplètes, a permis à Gell-Mann de prédire l'existence d'une particule, l' $\Omega$ , pour compléter une famille de résonances connues. Et il s'est trouvé que cet  $\Omega$  était, lui, quasi-stable. Le concept de démocratie nucléaire exprime ceci en disant que, parmi toutes les particules observées, on ne peut pas faire de distinction essentielle entre particules et résonances. Aucune ne se révèle comme plus fondamentale qu'une autre parce qu'en fait chacune se révèle comme une superposition d'états de fragments, virtuels ou réels, où toutes les particules peuvent exister.

Prenons, par exemple, le cas de la résonance  $\Delta$ , la première connue. Celle-ci a une masse approximativement égale à la somme de celle d'un proton et de celle de deux pions. Elle se désintègre très rapidement en un proton et un pion : l'excès de masse (une masse de pion) se transforme en énergie cinétique dans la séparation de deux fragments. La désintégration est possible en raison du bilan énergétique favorable, contrairement à la désintégration d'un proton en un proton et un pion, où le bilan énergétique rend la transition impossible : il y a défaut de masse dans ce cas au lieu d'excès de masse dans le cas du  $\Delta$ .

Mais, ces considérations énergétiques mises à part, on peut dire également que le proton passe une partie de son temps en un état lié  $\Delta$ -pion (défaut de masse de trois masses de pions). On a même pu récemment mesurer pour le deuton sa probabilité de se trouver en un état lié  $\Delta$ - $\Delta$  plutôt que neutron-proton, et cette probabilité n'est pas du tout négligeable.

Donc, dans cette démocratie nucléaire, nous voici à la tête d'une centaine de particules, qui jouent, sur le plan des forces nucléaires, des rôles tout à fait analogues, la seule différence, que l'on ne sait à l'heure actuelle pas du tout interpréter ni expliquer, étant leurs différences de masse. Elles conduisent évidemment à des comportements tout à fait différents du point de vue

expérimental, puisqu'elles conditionnent de façon radicale les possibilités d'observation plus ou moins directe de ces particules. Une seule chose apparaît claire pour l'instant, c'est que l'on peut ranger ces particules en familles régulières correspondant à une structure interne similaire, mais à des états de rotation de plus en plus rapide. Comme on doit s'y attendre, ces familles sont régulièrement espacées en masse, la différence de masse d'un membre au membre suivant correspondant à la différence d'énergie cinétique de rotation correspondante.

On pourrait résumer cette conception de la démocratie nucléaire par le truisme : « *Tout est dans tout et réciproquement.* » Mais, si l'on veut bien réfléchir un instant à ce que cela veut dire dans le cas présent, cela signifie que, dans le domaine des particules, la partie peut fort bien être égale au tout. Ceci est une définition mathématique de l'infini : dans un ensemble fini, les parties *stricto sensu* ne sont jamais identiques à l'ensemble complet, ni même comparables : elles ont forcément moins d'éléments que la totalité. Ceci n'est pas vrai pour les ensembles infinis. Les nombres pairs, en effet, forment une partie stricte de l'ensemble des nombres entiers. On pourrait même être tenté de dire qu'il y a juste la moitié des nombres entiers qui sont pairs, les autres étant impairs. Cependant, il est tout aussi naturel de dire qu'il y en a exactement autant, puisqu'on peut remplacer chaque nombre pair par sa moitié, obtenant exactement ainsi tous les nombres entiers.

Donc, nous avons ici, par la démocratie nucléaire, une possibilité logique nouvelle, et fascinante : nous sommes réellement arrivés à un infini – par la définition mathématique rigoureuse. C'est un infini de complexité et, simultanément, de ténuité, puisque chaque particule est composée d'une infinité de fragments distincts : d'où la complexité ; mais ces fragments distincts sont eux-mêmes les fragments ultimes de la matière : d'où la ténuité, tout en étant toujours les mêmes particules.

Mais il manque encore une clef à ce mystère : d'où proviennent ces énergies considérables mises en jeu et qui conditionnent tout ceci : il est absolument essentiel pour que ceci soit possible que des particules puissent être liées entre elles avec des énergies de liaison équivalentes à leur masse au repos. Un schéma conceptuel a été élaboré pour répondre à cette question, c'est le « *bootstrap* », ainsi désigné d'après l'expression anglaise « *To pull oneself up by his own bootstraps* », ce qui veut dire s'élever en l'air en tirant sur ses tirants de bottines. Ce schéma a été élaboré dans un cas particulièrement simple et sous diverses formes plus ou moins équivalentes. Il s'agit d'étudier le système de deux pions. On sait que deux pions peuvent former une résonance, le  $\rho$ . Pour ceci il faut évidemment qu'une force attire ensemble les deux pions pendant le temps où ils forment la résonance  $\rho$ . D'où provient cette force ? Elle provient précisément de l'échange de  $\rho$  entre les deux pions. Et une analogie tirée de l'électrodynamique quantique permet de calculer, à partir des données que l'on possède sur le  $\rho$ , à savoir essentiellement sa probabilité de passage à l'état de deux pions, la probabilité qu'un pion passe à l'état d'un pion et un  $\rho$ , c'est-à-dire en fait l'intensité du nuage de  $\rho$  qui entoure un pion. De là, on peut déduire la force qui s'exerce entre deux pions par échange de  $\rho$  quand les deux nuages se superposent.

Partant de données arbitraires sur le  $\rho$ , on peut alors essayer de calculer la force qui s'exerce entre deux pions, déterminer si cette force est suffisante pour provoquer une résonance et on doit alors ajuster les données arbitraires initiales pour retrouver exactement à la fin du calcul les caractéristiques du  $\rho$  supposées au début du calcul. Cette méthode, dans ce cas particulier,

fournit des ordres de grandeur convenables pour les caractéristiques du  $\rho$ , compatibles avec les données que l'on possède sur le  $\rho$  physique. Il faut dire que le calcul que je viens de décrire est une simplification outrancière de la réalité, puisqu'en fait il faudrait considérer non pas seulement les possibilités  $\rho \rightarrow 2\pi$  et  $\pi \rightarrow \rho + \pi$ , mais encore beaucoup d'autres, impliquant plusieurs de ces particules, ou d'autres particules encore, de masse plus élevée. Ceci se traduit d'ailleurs dans le calcul par des hypothèses que l'on doit faire sur les phénomènes de collision pion-pion jusqu'à des énergies infinies, où le nombre de particules créées peut effectivement aller jusqu'à l'infini. L'incertitude sur les résultats prédits dépend dans une large mesure de ces hypothèses que l'on peut faire sur les énergies élevées. On pourrait penser compliquer le jeu et faire intervenir des ensembles plus nombreux de particules explicitement dans le calcul, mais la complexité du calcul devient alors telle qu'il devient inabordable. On a d'ailleurs à peine commencé à obtenir des résultats intéressants, dans les approximations les plus grossières, pour des problèmes impliquant les interactions simultanées de trois particules. De là à obtenir la résolution d'un problème de *bootstrap*, il y a encore un fossé actuellement infranchissable.

Cela étant, le principe conceptuel de la méthode de *bootstrap* est le complément rêvé du principe évoqué tout à l'heure de la démocratie nucléaire : si l'on pouvait l'appliquer à des situations plus réalistes, il fournirait simultanément toutes les données que nous avons besoin d'interpréter : l'existence et la structure des particules, due aux forces de liaison entre ces particules, et l'existence des forces de liaison, due aux particules elles-mêmes et à leur structure.

Si nous mettons à part les difficultés pratiques que soulève l'exécution d'un tel programme, il reste une difficulté d'ordre conceptuel : en tout état de cause, on ne pourra jamais traiter exactement la contribution des états à nombre illimité de particules, ou encore il faudra toujours recourir à des hypothèses sur le comportement des phénomènes de collision à très haute énergie. On peut espérer alors que, si certaines régularités se manifestent, par exemple si l'on peut négliger l'équivalent énergétique de la masse par rapport à l'énergie totale de la collision, ou si l'on peut mettre au point une théorie des collisions à très haute énergie d'ordre plus ou moins statistique, alors les collisions à très haute énergie dépendront d'un petit nombre de paramètres que l'on pourra relier aux paramètres de basse énergie, et le schéma conceptuel du *bootstrap* sera complètement refermé sur lui-même. Nous aurons alors une théorie complètement cohérente avec elle-même, qui rendra compte de ce double infini rencontré en physique corpusculaire : infinie complexité associée à une infinie ténuité.

Pour que ceci soit vrai, il manque une condition, que l'on doit vérifier expérimentalement : il faut être sûr qu'à très haute énergie n'apparaissent pas de nouveaux phénomènes, échappant au contrôle des phénomènes de basse énergie. Pour reformuler ceci, prenons l'aspect ondulatoire des particules : à de très hautes énergies correspond une longueur d'onde très petite. Si la structure corpusculaire est suffisamment homogène, une onde de longueur d'onde très petite ne « verra » rien de plus qu'une onde de grande longueur. Si, par contre, il apparaît des phénomènes nouveaux quand la longueur d'onde diminue, ceci veut dire qu'il existe dans la structure corpusculaire des inhomogénéités de très petite taille, qui sont vues par une onde de très petite longueur d'onde, mais qui ne sont pas vues par de grandes longueurs d'onde. C'est l'exemple familier qui donne, par exemple, au ciel sa couleur bleue, et au soleil couchant sa couleur rouge : l'air de l'atmosphère n'est pas rigoureusement homogène, en vertu de sa structure moléculaire. Mais l'échelle de grandeur des inhomogénéités est très petite. La lumière rouge du soleil, de grande longueur d'onde, est beaucoup moins sensible à ces inhomogénéités

que la lumière bleue. Par suite, elle traverse l'atmosphère en ligne droite, même sous des épaisseurs considérables comme au coucher du soleil : le soleil apparaît alors tout rouge. La lumière bleue, elle, est diffusée par ces inhomogénéités de façon beaucoup plus importante, dans toutes les directions, ce qui fait que le ciel nous apparaît bleu dans toutes les directions.

Nous pouvons aussi reprendre l'exemple de l'expérience de Rutherford : si les atomes étaient homogènes, ils diffuseraient les rayons  $\alpha$  de façon régulière vers l'avant, indépendamment de leur longueur d'onde. Mais, quand la longueur d'onde devient assez petite, on aperçoit un nouveau phénomène, qui est la diffusion à grand angle due au noyau de l'atome.

Il est donc d'un intérêt primordial, du point de vue de notre conception de la structure des particules, de savoir si cette structure correspond à la philosophie du *bootstrap*, c'est-à-dire est homogène, les phénomènes à haute énergie ne constituant qu'une extrapolation de ce que l'on observe à basse énergie. En d'autres termes n'y a-t-il plus rien d'essentiellement nouveau à découvrir à haute énergie, ou bien, au contraire, les phénomènes de haute énergie nous réservent-ils des surprises, une nouvelle physique corpusculaire, dont des corpuscules seraient cette fois-ci encore d'un ordre de grandeur plus petits que les particules que nous connaissons ?

Quelle est la situation expérimentale à cet égard ? Des progrès importants ont été effectués récemment, d'abord auprès de l'accélérateur linéaire à électrons de Stanford aux USA, puis auprès des anneaux de collisions à protons (ISR, *intersecting storage rings*) du CERN à Genève. Les expériences de Stanford ont montré que, contrairement à ce qui était attendu, les collisions électron-proton ne variaient pas considérablement en fonction de la longueur d'onde du rayonnement électromagnétique transmis de l'électron au proton. Si le proton était homogène, ces collisions devraient diminuer d'importance au fur et à mesure que la longueur d'onde diminue. Le fait qu'elles ne décroissent pas conduit naturellement à supposer au sein du proton l'existence de sous-corpuscules sans dimension, ou tout au moins de dimension négligeable par rapport à toutes les longueurs d'onde mises en jeu. Retraduit en termes de particules, ces composants nommés provisoirement partons devraient avoir une masse beaucoup plus grande que l'équivalent de toutes les énergies mises en jeu dans la collision, soit au moins un ordre de grandeur plus grande que la masse du proton.

Aux ISR du CERN, on accomplit des expériences de collision proton-proton en dirigeant l'un contre l'autre deux faisceaux de protons accélérés par l'accélérateur à protons du CERN. Ce faisant, on fait beaucoup plus que doubler l'énergie disponible dans la collision, car on n'a pas besoin de dépenser d'énergie cinétique pour le recul des produits de la collision. Pour donner un ordre de grandeur, l'énergie disponible dans une collision de protons accélérés au CERN sur des protons au repos est équivalente à 7-8 masses de proton, tandis qu'aux ISR, elle peut aller jusqu'à 60 masses de proton.

Une des premières expériences aux ISR a consisté à observer les particules émises à angle droit par rapport aux deux faisceaux qui se rencontrent, ce qui est évidemment l'angle maximum par rapport à l'un et à l'autre des faisceaux. C'est la situation la plus favorable à l'observation de phénomènes nouveaux, qui ne seraient pas liés à la simple fragmentation d'un des protons, avec une énergie relative des fragments faible, car dans ce cas les produits de fragmentation ont tendance à continuer tout droit.

On a donc observé dans ces conditions un grand nombre de particules de faible énergie, qui

correspondent en quelque sorte à une évaporation des nuages de particules virtuelles accompagnant les protons, et auxquelles est transférée une faible quantité d'énergie, juste suffisante à les rendre réelles. A mesure que l'énergie observée augmente, le nombre de particules diminue très fortement, et soudain on constate que le rythme de cette décroissance diminue très fortement. Visiblement, il s'agit là d'un autre mécanisme de production de particules, masqué à faible énergie par la production abondante de particules d'évaporation, mais qui devient dominant à haute énergie en raison de la décroissance rapide du processus d'évaporation.

Il est bien inutile de préciser que ces nouveaux résultats expérimentaux des ISR ont précipité une activité fébrile des théoriciens, qui essaient par divers modèles de relier ces données à celles obtenues précédemment à Stanford, c'est-à-dire d'interpréter le tout à l'aide de ces composants quasi-ponctuels que sont les partons. Mais nous manquons jusqu'à présent d'une description suffisamment claire de phénomènes associés à ce type de collisions pour pouvoir départager ces différents modèles théoriques. Il faut dire que la description de ces collisions à haute énergie n'est pas chose simple. En effet, dans une collision aux ISR, le nombre moyen de particules créées est d'une quinzaine, et pour les collisions comportant une particule émise avec une grande énergie, à angle droit, il est fort possible que le nombre moyen de particules émises soit encore supérieur. La seule description d'une collision nécessite donc la mesure de trois grandeurs par particule : son énergie, et les angles horizontal et vertical sous lequel elle a été émise, plus son identification. Si l'on ajoute à cela la difficulté d'observer et d'identifier les particules neutres, on aperçoit le grand nombre de difficultés expérimentales que l'on doit surmonter. De plus, le traitement statistique des données accumulées ainsi exige une infrastructure informatique considérable. Il reste donc un travail expérimental énorme à faire. On ne pourra pas tout faire sur les ISR, car d'une part on ne peut, par définition, qu'y observer des collisions proton-proton, et il serait de la plus haute importance d'observer des collisions avec divers types de particules, et, d'autre part, les contraintes sur l'appareillage expérimental aux ISR sont assez lourdes, puisqu'il faut éviter de modifier les faisceaux, qui circulent de façon continue : la moindre perturbation risque, si elle n'est pas soigneusement compensée, de rendre les faisceaux instables, empêchant ainsi le fonctionnement de la machine. Heureusement, des accélérateurs plus puissants que celui du CERN, qui date de 1960, viennent d'entrer en service, ou sont en construction. Celui de Serpukhov en URSS est entré en fonctionnement il y a trois ans, il est trois fois plus puissant que celui du CERN. Celui du National Accelerator Laboratory, aux USA, est entré en service il y a un an, et est vingt fois plus puissant que celui du CERN. Enfin, au CERN même, un nouvel accélérateur, le SPS, est en construction, avec des caractéristiques voisines de celles de celui du National Accelerator Laboratory, et doit entrer en service en 1976.

Pour utiliser ces accélérateurs, observer les collisions, détecter, identifier et mesurer les particules produites, il faut des appareillages expérimentaux complexes, et ceci d'autant plus que le nombre de particules secondaires est important. Pour donner une idée de l'effort que peut susciter ce type d'équipement, et du genre de contraintes qui pèsent sur l'expérimentateur, je voudrais seulement indiquer que la conception et la réalisation d'un détecteur de particules suffisamment performant peut durer de l'ordre de cinq ans, les expériences se succèdent ensuite relativement rapidement, à des intervalles, de l'ordre de quelques mois, puis chacune des expériences doit disposer de l'ordre de un à deux ans pour analyser les données brutes et en extraire des résultats significatifs sur le plan de la physique.

C'est ainsi que le laboratoire de Physique corpusculaire est en train de préparer un avant-

projet, en collaboration avec des groupes du CERN, de Munich, de l'Ecole Polytechnique, d'Orsay et de Saclay, pour un détecteur qui pourrait entrer en fonction en 1978-1979 dans la future aire Nord du SPS, ce qui voudrait dire que les premières publications scientifiques sur les résultats expérimentaux obtenus avec cet appareil ne pourraient guère être écrites avant 1980. Comme il est extrêmement difficile de prévoir exactement le type de physique que l'on aura envie de faire à l'époque, selon les découvertes qui seront faites d'ici là, il faut concevoir un détecteur aussi souple que possible, dont on puisse modifier aisément la configuration et les caractéristiques. Cependant, il apparaît raisonnable de penser, d'après les quelques indications que je vous ai données précédemment, que la physique associée aux grandes énergies transverses restera un domaine tout à fait privilégié pour accéder à la connaissance de la structure intime de la matière.

En attendant jusqu'à cette époque éloignée, que pouvons-nous penser de cette nouvelle branche de la physique que va devenir la physique corpusculaire, c'est-à-dire la physique des partons, puisque seuls les partons représenteraient maintenant les parties ultimes de la matière ? Inutile de préciser que les considérations auxquelles je vais me livrer maintenant présentent un caractère futuriste et ne sont en fait étayées sur aucune base expérimentale sérieuse. Cependant, il est raisonnable d'essayer de faire une certaine prospective de développement, quitte à se tromper aussi lourdement que les futurologues officiels qui n'ont pas envisagé la crise de l'énergie que nous vivons actuellement, et qui risque peut-être d'arrêter nos accélérateurs.

Une première question que l'on peut se poser au sujet de ces partons est : est-ce que les partons existent vraiment ? Il faut ici préciser quel sens on peut donner à cette question. Peut-on les observer à l'état réel, libre ? Pour que ceci soit possible, il faudrait un mécanisme qui empêche leur désintégration, car, étant donnée leur masse élevée, s'il existe la moindre probabilité de se trouver dans un état composé de particules habituelles, celles-ci disposent d'une énergie considérable et peuvent par conséquent s'échapper très vite. Ce mécanisme est bien connu pour les particules que nous connaissons, et explique par exemple la stabilité du proton. Il existe en effet un invariant dans toutes les transitions, ce que l'on appelle un nombre quantique, qui, pour le cas du proton, est le nombre baryonique, qui vaut 1. Or toutes les particules plus légères que le proton ont un nombre baryonique 0. Il est donc impossible à un proton d'exister dans un état virtuel ne comprenant que des particules plus légères que lui, car ceci violerait la conservation du nombre baryonique. Il ne peut donc pas se désintégrer, tous les états virtuels qu'il peut prendre étant des états liés.

Les partons peuvent donc exister à l'état stable s'il existe un nouveau nombre quantique, que l'on pourrait appeler nombre partonique qui soit conservé, afin de garantir la stabilité d'un parton. Les particules habituelles auraient toutes un nombre partonique zéro, et les partons n'existeraient à l'état virtuel au sein des particules que nous connaissons que sous la forme de paire parton-antiparton, de nombre partonique total nul.

Certains modèles ont déjà été proposés dans cette voie, par exemple on a proposé comme candidats partons les quarks supposés par Gell-Mann, et qui ne peuvent se désintégrer en particules habituelles en raison de leur charge électrique, qui serait fractionnaire, au lieu d'être entière pour les particules que nous connaissons. Le nombre partonique serait ici la partie fractionnaire de la charge électrique.

Un autre aspect de la question de l'existence des partons est de savoir s'il est concevable que

les partons soient réellement ponctuels, c'est-à-dire si leur masse est rigoureusement infinie, ou si, au contraire, ils ont une dimension, petite, mais finie, ce qui correspond à une masse grande, mais bien définie.

Dans le second cas, la masse des partons définirait un ordre de grandeur des énergies mises en jeu par la nouvelle physique : à partir de ces énergies, on verrait tout un panorama nouveau de phénomènes, on pourrait isoler les interactions entre partons, étudier les collisions parton-parton, et se poser la question de savoir si les partons ont une sous-structure. Certains physiciens penchent ainsi pour une hiérarchie infinie de structures et de sous-structures, allant vers des dimensions de plus en plus petites, avec, à chaque niveau, une physique spécifique.

L'autre hypothèse, celle d'une masse rigoureusement infinie des partons, n'est peut-être pas si absurde qu'elle paraît a priori. En effet, nous avons évoqué précédemment le cas de l'état virtuel du proton se composant d'un proton et d'un pion. Dans ce cas, l'énergie de liaison, équivalente au défaut de masse, est précisément l'équivalent de la masse du pion. Il en va de même pour tous les états virtuels du proton : le défaut qui y correspond est précisément la somme des masses qui le composent, moins la masse du proton. Si le proton est un état lié de trois quarks extrêmement lourds, l'énergie de liaison entre ces quarks correspond exactement à la différence : masse de trois quarks – masse du proton. Il est fort possible que, dans ces conditions, on puisse admettre de faire tendre la masse des quarks vers l'infini, ainsi que l'énergie de liaison entre les quarks, de telle manière que la différence, la masse du proton, reste finie. Pour étudier ce problème, il faudrait avoir une théorie satisfaisante qui rende compte d'énergies de liaison extrêmement fortes, et pouvoir même passer à la limite d'énergies de liaison infinies.

Indépendamment de ces considérations théoriques, il existerait néanmoins une différence expérimentale importante entre les deux types de théories de partons. Si la masse du parton est finie, on doit voir apparaître tout un ensemble de phénomènes nouveaux à énergie suffisamment haute : création de partons libres, ou tout au moins aspect différent des phénomènes observés. Dans le cas d'une masse infinie, par contre, les récents phénomènes observés tant à Stanford qu'aux ISR seraient déjà asymptotiques, c'est-à-dire qu'on pourrait en déduire les phénomènes à énergies arbitrairement élevées par une simple opération d'extrapolation. On aurait ainsi atteint vraiment l'infiniment petit.

Il existe cependant une ombre à ce tableau. J'ai évoqué à plusieurs reprises au cours de cet exposé, centré essentiellement sur les interactions fortes de type nucléaire, d'autres types d'interaction ; l'interaction électromagnétique, que nous comprenons bien grâce à l'électrodynamique quantique, et l'interaction faible qui provoque la radioactivité  $\beta$ , ainsi que de nombreuses désintégrations spontanées de particules quasi stables. On ne sait pas si l'électrodynamique quantique est valable à très haute énergie, mais ce que l'on sait est que l'on aura des difficultés de plus en plus considérables à effectuer les calculs d'électrodynamique à très haute énergie, en raison de corrections dont l'importance croît lentement mais sûrement avec l'énergie, et qu'il faut donc calculer en nombre toujours plus grand.

Si l'on essaie d'appliquer le même type de corrections à l'interaction faible, on s'aperçoit d'abord que les méthodes mises au point dans le cas de l'électrodynamique quantique sont vouées à l'échec, dans ce sens que seule une partie des corrections peut être calculée, un certain nombre de constantes, croissant avec le nombre de corrections, devant être mesurées. D'autre part, l'importance des corrections croît beaucoup plus vite avec l'énergie que dans le cas de

l'électrodynamique quantique, ce qui fait qu'on passe rapidement d'une région où les corrections sont inutiles à une région où les corrections deviennent plus importantes que le terme à corriger, et où par suite on ne peut plus dire grand-chose. Cette zone de transition se situe à une énergie totale de l'ordre de 300 masses de proton, et on doit s'attendre à observer des effets importants dus à l'interaction faible avant cette énergie.

Récemment, un certain nombre de modèles théoriques ont été mis au point pour donner à l'interaction faible des propriétés aussi satisfaisantes que celles de l'électrodynamique quantique. En fait, ces modèles constituent une théorie unifiée de l'électrodynamique et de l'interaction faible, théorie ne dépendant que d'un petit nombre de constantes fondamentales. Ces modèles, assez divers, présentent tous une même caractéristique : celle de l'existence d'une ou plusieurs particules nouvelles, non encore observées. Les masses de ces particules seraient en effet de quelques dizaines de masses de proton.

L'étude de ces phénomènes est évidemment de la plus haute importance si l'on veut connaître à fond la structure de la matière. Il est donc important de découvrir ces particules nouvelles, si elles existent, de découvrir dans le cas contraire comment se comportent les interactions faibles à très haute énergie, où elles commencent à devenir fortes. Il est vraisemblable que, si les moyens en accélérateurs et en équipement expérimental peuvent être réalisés pour effectuer une telle recherche, on pourra alors disposer d'énergies suffisantes pour avoir des idées plus précises sur l'existence et la masse des partons, à moins que, ce serait là l'idéal, on arrive à formuler une théorie unique couvrant les trois types d'interaction que nous avons évoqués ici : interaction forte de type nucléaire, interaction électromagnétique, et interaction faible. Il ne resterait plus alors qu'à comprendre la quatrième interaction fondamentale, l'interaction gravitationnelle qui, si importante qu'elle soit en Astrophysique, est absolument négligeable à l'échelle microscopique et ne pourrait être observée, au niveau des particules, qu'avec des énergies absolument inimaginables.

Pour résumer ce panorama de la Physique corpusculaire tel que je viens de vous le présenter, je voudrais attirer votre attention sur le fait que nous nous trouvons à l'heure actuelle à un virage de cette discipline, dont l'objet même est en train de changer, sous nos yeux. Des particules homogènes et relativement molles que l'on a observées auprès des accélérateurs pendant la dernière décennie, et qui faisaient l'objet des calculs de *bootstrap* ne faisant intervenir que leurs propriétés à basse énergie, nous passons progressivement à l'étude de ces petits grains durs, les partons, qui paraissent englués dedans. Que sont ces partons ? Existents-ils de façon directement observable ? Ont-ils eux-mêmes une structure, et une masse finie, ou sont-ils, au contraire, des points de masse infinie ? Comment peut-on séparer avec certitude leurs interactions de celles du nuage qui les entoure ? Voici autant de questions passionnantes, complètement ouvertes, et à la résolution desquelles le laboratoire de Physique corpusculaire de cette illustre maison contribuera, je l'espère, en faisant le meilleur usage possible des moyens qui lui sont accordés.