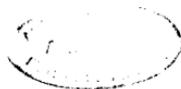


UNIVERSITÉ DE PARIS

---



# LES PARTICULES DE LA MICROPHYSIQUE

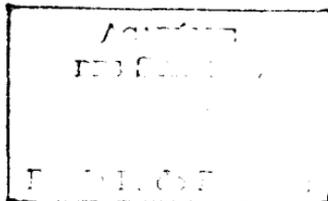
par

M. Louis de BROGLIE

Prix Nobel

Secrétaire perpétuel  
de l'Académie des Sciences

*In. n. 2915*



Conférence faite au Palais de la Découverte

le 20 Décembre 1952

## LES PARTICULES DE LA MICROPHYSIQUE

---

### *Nomenclature des particules actuellement connues*

**L**ORSQUE la théorie atomique de la matière, renaissant de ses cendres après un grand nombre de siècles, s'est, il y a environ 150 ans, à la suite notamment des travaux de Dalton, imposée à nouveau à l'attention des physiciens et des chimistes, elle nous a apporté l'idée que tous les corps composés sont formés de molécules, elles-mêmes constituées par des combinaisons diverses d'atomes des corps simples ou éléments. Aussi a-t-on pu alors pendant quelque temps penser que les atomes des corps simples étaient les constituants élémentaires qui, en se combinant de diverses façons, donnaient naissance à tous les édifices que nous rencontrons dans les structures matérielles et à l'immense variété qu'elles présentent. Un grand pas semblait ainsi accompli vers le but toujours recherché par notre intelligence : l'établissement d'une unité de tous les phénomènes matériels.

Néanmoins cette simplification, si satisfaisante pour notre esprit toujours en quête de synthèse, n'apparaissait pas comme aussi complète qu'on l'aurait souhaitée. Il existe en effet, Lavoisier et ses successeurs immédiats le savaient bien déjà, un grand nombre de corps simples : presque chaque année les chimistes en découvraient de nouveaux. Les progrès de la Physique moderne, en accord avec la vieille classification chimique de Mendéléeff, allaient bientôt montrer qu'il existe dans la nature 92 corps simples stables, et aujourd'hui la connaissance des isotopes, des radioéléments naturels et artificiels et des éléments transuraniens nous oblige à reconnaître l'existence de plusieurs centaines de corps simples et par suite d'atomes de nature différente. Si l'atome était resté aux yeux des physiciens contemporains la particule élémentaire, la belle simplicité souhaitée par notre esprit aurait été loin d'être atteinte. Mais il y a déjà longtemps que les physiciens considèrent l'atome des corps simples, contrairement à l'étymologie du mot « atome », comme étant un édifice complexe et qu'ils attribuent le rôle de particules

élémentaires à des entités beaucoup plus subtiles dont ils ont pu déceler l'existence au sein même des atomes.

Depuis les célèbres travaux de Rutherford et de Bohr (1910-13), nous savons que tous les atomes sont formés d'un noyau central portant une charge électrique positive et d'électrons négatifs en mouvement autour de ce noyau. Si l'on désigne par  $-e$  la charge négative de l'électron, un atome, édifice qui dans son état normal doit être électriquement neutre, est donc constitué par un noyau portant une charge électrique positive  $+Ze$ ,  $Z$  étant un nombre entier, autour duquel se meuvent  $Z$  électrons. Le nombre entier  $Z$  est appelé le « nombre atomique » et caractérise l'atome considéré (du moins abstraction faite de l'isotopie). Il croît depuis  $Z = 1$  pour l'hydrogène, le plus léger des éléments, jusqu'à  $Z = 92$  pour l'uranium : il s'élève même au-dessus de 92 pour les éléments instables dits « transuraniens » dont les procédés de la physique nucléaire nous permettent maintenant de faire la synthèse. Le noyau d'un atome n'est d'ailleurs pas caractérisé entièrement par sa charge électrique  $Ze$ , il a aussi une masse ; or, pour une valeur donnée de la charge du noyau, c'est-à-dire du nombre atomique  $Z$ , il peut exister plusieurs valeurs distinctes de la masse et, par suite, à un même élément au sens des chimistes, caractérisé par une même valeur de  $Z$ , peuvent correspondre plusieurs sortes d'atomes « isotopes » différant par leurs masses.

Le noyau de l'atome d'Hydrogène  $Z = 1$  nommé le « proton » est alors apparu aux physiciens comme ayant le caractère d'une particule élémentaire indécomposable, tandis que les noyaux des éléments plus lourds leur semblaient de prime abord comme devant être des édifices plus complexes formés par la réunion de protons et d'électrons (avec prédominance de protons puisque la charge totale du noyau est toujours positive) en nombre d'autant plus grand qu'on s'élève davantage dans la série de Mendéléeff. Et de nouveau semblait apparaître une simplicité tout à fait satisfaisante pour notre esprit puisque tous les édifices matériels, quelle que fût leur complexité, paraissaient entièrement formés par des assemblages de deux constituants élémentaires : le proton et l'électron. Évidemment, on savait qu'il n'y avait pas une symétrie parfaite entre ces deux constituants car, s'ils ont des charges électriques égales et de signe contraire, le proton est beaucoup plus lourd (environ 1.840 fois) que l'électron ; et ce fait fondamental établissait une sorte de dissymétrie dans le rôle des deux sortes d'électricité dans la nature, l'électricité positive apparaissant, pour une raison inconnue, comme beaucoup plus liée à la masse que l'électricité négative. Il fallait aussi tenir compte de l'existence du « photon », cette particule à l'aspect un peu fuyant qui manifeste son existence dans la lumière et dans toutes les autres

radiations et dont la découverte avait causé tant de soucis aux théoriciens. Mais même ainsi cela ne faisait au total qu'un très petit nombre de particules élémentaires dont l'existence paraissait suffisante pour interpréter l'ensemble des phénomènes physiques, et cette simplicité pouvait légitimement provoquer dans notre esprit une vive satisfaction.

Mais, depuis 1930 environ, les choses se sont beaucoup compliquées par suite de la découverte de nouvelles particules dont jusque-là on ignorait encore complètement l'existence. Tour à tour furent mises en lumière l'existence du neutron, particule électriquement neutre ayant une masse très voisine de celle du proton, puis l'existence de l'électron positif ou « positon » (par opposition à l'électron négatif ou « négaton ») particule instable ayant même masse que l'électron négatif ordinaire, mais avec une charge égale et opposée ; puis fut reconnue l'existence dans les rayons cosmiques de particules ayant une masse intermédiaire entre celle de l'électron et celle du proton, les « mésons ». A l'heure actuelle nous connaissons très bien deux sortes de mésons qui toutes deux sont tantôt chargées positivement, tantôt négativement, et peuvent sans doute aussi exister à l'état neutre ; c'est le méson  $\mu$  dont la masse est voisine de 210 fois la masse  $m_0$  de l'électron et le méson  $\pi$  dont la masse évaluée avec la même unité est voisine de 275. Dans les dernières années toute une série d'autres particules, que l'on nomme tous mésons, bien qu'elles aient peut-être des natures très différentes, ont été détectées les unes avec certitude, les autres avec une plus ou moins grande vraisemblance. Tels sont le méson  $\tau$  de masse 960  $m_0$ , le méson  $V_2$  (ou  $v$ ) de masse voisine de 800  $m_0$ , le méson  $\zeta$  de masse 560  $m_0$ , le méson  $\kappa$  de masse voisine de 1.200  $m_0$ , le méson  $V_1$  (ou  $V$ ) dont la masse supérieure à celle du proton dépasserait 2.200  $m_0$ . L'étude de plus en plus approfondie des rayons cosmiques, la mise au point de dispositifs de plus en plus puissants pour la production de particules très rapides susceptibles de produire des effets de transmutation nouveaux font que la liste de ces mésons va d'année en année en s'allongeant, sans que l'on puisse encore aucunement comprendre aujourd'hui pourquoi leurs masses possèdent certaines valeurs bien définies.

Aux particules que nous venons d'énumérer, il faut encore probablement ajouter une particule un peu énigmatique que l'on nomme le « neutrino ». L'étude théorique du rayonnement  $\beta$  continu des corps radio-actifs a amené les physiciens, pour pouvoir admettre la conservation de l'énergie et du moment de quantité de mouvement lors de l'émission de ce rayonnement  $\beta$ , à concevoir l'existence d'une particule électriquement neutre et extrêmement légère (c'est-à-dire ayant une masse sinon rigoureusement nulle, du moins très inférieure

à celle de l'électron) : le neutrino. L'expérience n'a pas pu fournir une preuve décisive de l'existence de ce neutrino, ce qui peut d'ailleurs s'expliquer puisque cette particule, par hypothèse neutre et presque dénuée de masse, ne peut se manifester à nous d'une façon sensible ni par des effets d'ionisation, ni par des effets de choc. Cependant de fortes raisons théoriques et quelques indications expérimentales militent en faveur de l'existence du neutrino.

Si au proton, à l'électron, au neutron, au positon, aux diverses sortes de mésons, au neutrino, nous ajoutons encore le « photon » lié au champ électromagnétique de la lumière, et peut-être le « graviton » qui serait semblablement lié au champ de gravitation, nous voyons que la liste des particules que l'on pourrait considérer comme élémentaires est devenue fort longue et nous nous trouvons ainsi nous être éloignés du but que, plus ou moins inconsciemment, nous cherchons toujours à atteindre dans nos interprétations : la réduction à l'unité.

Pour évaluer plus exactement la gravité de cet échec peut-être momentané, examinons de plus près quelles sont parmi les particules fondamentales que nous venons d'énumérer celles qui paraissent pouvoir prétendre au titre de « corpuscules élémentaires », c'est-à-dire non réductibles à d'autres éléments.

Il y a d'abord l'électron négatif qui, à moins de découvertes tout à fait imprévues, paraît bien être un corpuscule élémentaire. Il y a ensuite le proton qui, jusqu'à plus ample informé, semble aussi devoir conserver le rang de corpuscule élémentaire qui lui a toujours été attribué depuis sa découverte, mais il y a à son sujet une remarque très importante à faire : il semble certain, en effet, que le neutron, qui a des titres équivalents à être considéré comme élémentaire, soit intimement apparenté au proton, de sorte que proton et neutron pourraient être considérés comme deux états différents d'une même particule élémentaire. Cette particule élémentaire à deux visages qu'on nomme aujourd'hui « nucléon » serait donc susceptible de deux états : l'un chargé positivement, le « proton », l'autre électriquement neutre, le « neutron », ces deux états correspondant d'ailleurs à des valeurs très voisines de la masse. Le passage de l'état proton à l'état neutron s'accompagnerait de l'émission d'un positon, le passage inverse de l'émission d'un négaton (1). Ces hypothèses, qui paraissent très bien adaptées à l'interprétation des faits actuellement connus, permettent de considérer tous les noyaux d'atomes comme formés

(1) Le neutron de masse supérieure à celle du proton serait, du moins à l'état libre, instable et se transformerait spontanément en proton après un temps de vie limité.

uniquement de nucléons, les uns dans l'état neutron, les autres dans l'état proton. Il n'y aurait donc pas d'électrons dans le noyau comme on le croyait naguère et les électrons négatifs ou positifs émis par les noyaux des corps radioactifs naturels ou artificiels (rayons  $\beta^-$  et  $\beta^+$ ) seraient créés quand un des nucléons du noyau changerait d'état.

Quant à l'électron positif, il est certainement apparenté à l'électron négatif dont il est en quelque sorte l'antipode électrique. M. Dirac, dans sa théorie de l'électron, était déjà parvenu, par une interprétation subtile de certaines solutions inattendues de ses équations, à expliquer la parenté des deux sortes d'électrons et même à prévoir ainsi l'existence du positon à partir de celle du négaton. Récemment, un jeune physicien américain M. R. P. Feynman a proposé de considérer l'électron positif comme un négaton qui « remonte le cours du temps » et il a fondé sur cette idée hardie une théorie d'un grand intérêt. Quoi qu'il en soit de ses vues théoriques, il semble certain que les deux sortes d'électrons sont si étroitement liés qu'on peut les considérer comme formant un seul genre de corpuscule élémentaire. Nous sommes donc finalement amenés à attribuer, au moins provisoirement, le caractère de corpuscule élémentaire, d'une part à l'électron susceptible des deux aspects négatonique et positonique, d'autre part au *nucléon* susceptible des deux états protonique et neutronique (1).

Mais il nous reste à classer le photon, les nombreuses sortes de mésons, probablement le neutrino et éventuellement le graviton. Allons-nous être obligés d'admettre que toutes ces particules, ainsi que celles qui restent à découvrir, sont toutes élémentaires ? Animé du désir de simplifier et d'unifier, notre esprit se cabre devant une telle pléthore d'entités élémentaires. Pour comprendre comment on pourrait essayer d'en réduire le nombre, je vais d'abord exposer des idées sur la complexité possible des particules que j'ai développées progressivement depuis une vingtaine d'années. Mais pour le faire, je dois dire d'abord quelques mots de la notion de spin.

### *Introduction du spin des particules*

On sait qu'à l'heure actuelle la description des particules doit se faire non pas à l'aide de la simple et traditionnelle conception du point matériel, mais en amalgamant les notions d'ondes et de corpus-

(1) Le positon et le neutron sont instables, le négaton et le proton sont stables.

cules à la manière qui nous a été enseignée par la Mécanique ondulatoire. Je ne développerai pas ici les idées de base de la Mécanique ondulatoire, ce qui m'entraînerait trop loin, mais j'insiste sur le fait suivant : toutes les considérations qui vont suivre ne peuvent être développées avec précision que dans le cadre de la Mécanique ondulatoire.

Une des grandes découvertes de la Microphysique moderne a été de se rendre compte que les particules de l'échelle atomique ne sont pas entièrement caractérisées par leur charge et leur masse, qu'elles possèdent une troisième propriété fondamentale : leur spin. Cette propriété peut être décrite, au moins en gros, comme une sorte de rotation interne de la particule et est susceptible d'être représentée par un vecteur ayant la nature d'un moment de quantité de mouvement. Cette rotation est « quantifiée », c'est-à-dire que le moment de la quantité de mouvement correspondant ne peut prendre que des valeurs  $\frac{nh}{4\pi}$  où  $n$  est un nombre entier et  $h$  la constante des quanta de Planck. Si l'on prend comme unité de spin la quantité  $\frac{h}{2\pi}$ , on pourra alors distinguer deux catégories de particules : celles dont le spin est « demi-entier », c'est-à-dire égal à  $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots, \frac{2n-1}{2}, \dots$  fois l'unité choisie, et celles dont le spin est entier, c'est-à-dire égal à  $0, 1, 2, \dots, n, \dots$  fois l'unité choisie. Or l'expérience a prouvé que ces deux catégories de particules possèdent des propriétés physiques très différentes, notamment en ce qui concerne leur manière de se comporter en assemblée nombreuse : les particules de spin demi-entier suivent alors la statistique de Fermi-Dirac étroitement liée à ce qu'on nomme le « principe d'exclusion de Pauli », tandis que dans les mêmes conditions les particules de spin entier suivent les règles d'une statistique entièrement différente, celle de Bose-Einstein.

L'étude des noyaux d'atomes a permis de découvrir une relation simple et importante entre la valeur de leur spin et le nombre de leurs constituants. Les noyaux sont, nous l'avons dit, formés uniquement de nucléons (protons et neutrons), et quand on connaît le nombre atomique et la masse d'un noyau, on peut en déduire le nombre des nucléons qui le constituent. D'autre part, on peut aussi déterminer la valeur du spin des noyaux et par suite la nature de la statistique à laquelle ils obéissent. On peut alors constater la corrélation suivante : les noyaux formés par un nombre impair de nucléons ont un spin demi-entier et suivent la statistique de Fermi-Dirac, les noyaux formés par un nombre pair de nucléons ont un spin entier et suivent la statistique de Bose-Einstein.

Or, c'est un fait remarquable que les particules auxquelles on ne

peut guère, pour l'instant, contester le titre de particules élémentaires, c'est-à-dire les électrons et les nucléons, ont un spin égal à  $\frac{1}{2}$  (en unité  $\frac{h}{2\pi}$ ). Quand plusieurs de ces particules s'unissent pour former une particule complexe, leurs spins s'orientent parallèlement dans le même sens ou en sens opposé et le spin total de la particule complexe est la somme algébrique des spins ainsi disposés. On voit alors aisément qu'une particule complexe formée d'un nombre impair de constituants de spin  $\frac{1}{2}$  aura un spin « demi-entier », tandis qu'une particule formée d'un nombre pair de constituants de spin  $\frac{1}{2}$  aura un spin entier. Nous pouvons le montrer sur deux exemples simples. Dans une particule contenant 2 constituants de spin  $\frac{1}{2}$ , les spins des constituants pourront avoir l'une des deux dispositions suivantes (1) :

$$a) \quad \uparrow\uparrow \quad \uparrow\downarrow$$

qui correspondent respectivement aux valeurs 2 et 0 du spin total. Pour une particule contenant 3 constituants de spin  $\frac{1}{2}$ , la disposition relative des spins des constituants peut correspondre à l'un des schémas suivants (1) :

$$b) \quad \uparrow\uparrow\uparrow \quad \uparrow\uparrow\downarrow$$

et le spin résultant peut avoir les valeurs demi-entières  $\frac{3}{2}$  et  $\frac{1}{2}$ . Plus généralement, s'il y a un nombre pair  $2n$  de constituants de spin  $\frac{1}{2}$ , le spin résultant pourra avoir les valeurs  $n, n-1, \dots, 1, 0$  et, si le nombre des constituants de spin  $\frac{1}{2}$  est un nombre  $n$  impair, le spin résultant pourra avoir les valeurs « demi-entières »  $\frac{n}{2}, \frac{n}{2}-1, \dots, \frac{3}{2}, \frac{1}{2}$ . La relation constatée entre le nombre (pair ou impair) des constituants d'un noyau et la valeur (entière ou demi-entière) de son spin total devient alors évidente et, en transposant ces considérations des noyaux d'atomes aux particules en général, nous allons parvenir à une très intéressante conception permettant une classification rationnelle des particules.

(1) Dans ces schémas, l'ordre des flèches et leur sens absolu n'importent pas.

*Corpuscules élémentaires et particules complexes*

Nous allons introduire systématiquement l'hypothèse que, comme c'est le cas pour l'électron et le nucléon, les corpuscules élémentaires ont un spin égal à  $\frac{1}{2}$ . Autrement dit, la propriété d'avoir une rotation interne égale à  $\frac{h}{4\pi}$  appartiendrait à tous les corpuscules élémentaires. Les particules dont le spin est différent de  $\frac{1}{2}$  seraient donc toujours des particules complexes, c'est-à-dire formées par l'union de plusieurs constituants de spin  $\frac{1}{2}$  : le spin résultant d'une particule complexe dépendrait du nombre de ces constituants et de l'orientation relative de leurs spins individuels. Remarquons que les particules complexes formées d'un nombre impair de constituants peuvent avoir un spin total égal à  $\frac{1}{2}$  (comme la 2<sup>e</sup> schéma *b* en donne un exemple), de sorte que la valeur  $\frac{1}{2}$  du spin n'est pas caractéristique des particules élémentaires.

Si l'on admet ces hypothèses très simples, la règle trouvée pour les noyaux doit être étendue à toutes les particules : toute particule complexe formée d'un nombre pair de corpuscules élémentaires doit avoir un spin entier et obéir à la statistique de Bose-Einstein, tandis que toute particule complexe formée par un nombre impair de corpuscules élémentaires doit avoir un spin demi-entier, obéir au principe d'exclusion de Pauli et suivre la statistique de Fermi-Dirac. Un théorème remarquable de la Mécanique ondulatoire des systèmes de corpuscules, le théorème d'Ehrenfest et Oppenheimer, permet d'ailleurs de donner à ces affirmations une base mathématique solide.

Cette conception nous met à même de réduire le nombre des particules que nous pouvons qualifier de « corpuscules élémentaires ». En effet, les photons ont certainement un spin égal à 1, comme le montre notamment la nature de la polarisation de la lumière : il en est probablement de même de certains mésons et il y a quelques raisons de croire que les gravitons ont un spin égal à 2. Ces particules ne seraient donc pas élémentaires, mais complexes et formées de constituants de spin  $\frac{1}{2}$  qui pourraient être des électrons et des neutrinos. En ce qui concerne les photons, l'idée qu'ils seraient formés par l'union de deux corpuscules de spin  $\frac{1}{2}$  m'a, dès 1934, servi de guide quand j'ai cherché à développer une nouvelle théorie de la lumière sous la forme d'une Mécanique ondulatoire du

Photon [1], ce qui m'avait conduit dès cette époque à écrire les équations d'ondes générales pour les particules de spin 1. La même idée générale sur la complexité des particules de spin différent de  $\frac{1}{2}$  a été retrouvée indépendamment, il y a quelques années, par le physicien russe Frenkel [2] et le célèbre savant italien Enrico Fermi (actuellement aux États-Unis) a cherché récemment à l'appliquer au méson [3].

Si l'on veut donner une forme précise à cette hypothèse de la complexité des particules de spin différent de  $\frac{1}{2}$ , en se servant des moyens de description que la Mécanique ondulatoire met présentement à notre disposition, on se heurte à des problèmes mathématiques difficiles. Il faut, en effet, commencer par décrire la particule complexe comme un ensemble de deux ou de plusieurs constituants élémentaires de spin  $\frac{1}{2}$ , chacun d'eux étant décrit par les équations de la théorie de Dirac ; puis il faut passer des équations ainsi obtenues aux équations actuellement connues par ailleurs, qui représentent correctement les propriétés des particules complexes considérées comme des unités douées d'un spin résultant. Ce passage doit avoir pour effet de transporter sur le centre de gravité de la particule complexe les propriétés de spin des constituants élémentaires, compte tenu de l'orientation relative de leurs spins individuels : il devrait aussi avoir pour résultat d'obtenir une sorte de représentation de l'organisation interne de la particule complexe autour de son centre de gravité. En 1935, j'avais déjà tenté d'aborder ce problème dans une note aux Comptes rendus de l'Académie des Sciences, mais ma tentative, bien qu'indiquant la voie à suivre, était insuffisante [4]. Plus récemment, encouragé par les travaux cités plus haut de Frenkel et de Fermi, j'ai repris l'étude de la question avec l'aide de Madame Tonnelat : dans deux notes aux *Comptes Rendus* et dans des articles du *Journal de Physique*, nous avons pu traiter le problème d'une façon qui me paraît constituer un progrès notable [5].

Quelles que soient les difficultés auxquelles se heurte la réalisation complète de ce programme, il me paraît certain que l'idée de considérer les particules de spin différent de  $\frac{1}{2}$  comme des particules complexes formées par l'union étroite de corpuscules élémentaires de spin  $1/2$  doit être exacte et qu'elle doit contribuer à nous permettre d'établir une classification rationnelle des diverses sortes de particules et de diminuer le nombre de celles que l'on doit considérer comme des entités élémentaires.

### *La théorie générale des particules*

Si les idées que nous venons d'exposer nous paraissent susceptibles d'aider à classer les diverses sortes de particules, elles sont loin de pouvoir fournir une théorie générale et complète des particules. Une telle théorie devrait d'abord nous dire ce que c'est qu'une particule, si on peut la représenter par une sorte de singularité ou de région singulière dans un champ étendu ou de toute autre façon. Des tentatives de ce genre avaient été faites jadis dans le cadre de la Physique classique antérieure à la découverte des Quanta. Telle avait été la théorie de l'électron de Lorentz qui se représentait l'électron comme une petite sphère d'électricité négative possédant un rayon qui en définit les dimensions, à l'intérieur de laquelle il y aurait une certaine distribution d'électricité imaginée d'ailleurs différemment par les différents auteurs. Cette théorie se heurtait du reste à une forte objection : les diverses parties d'une distribution d'électricité négative se repoussant mutuellement, l'électron devrait pour ainsi dire faire explosion, il n'aurait pas de stabilité. Henri Poincaré avait montré en 1905 que, pour assurer la stabilité de l'électron, il fallait supposer qu'une contre-pression d'origine inconnue équilibrerait la pression électrostatique tendant à faire exploser l'électron : mais cette contre-pression, la pression de Poincaré, n'étant pas d'origine électromagnétique, n'avait aucune interprétation dans la théorie de Lorentz et celle-ci se trouvait donc incapable de nous offrir une image cohérente de l'électron. Si, au contraire, on supposait que l'électron, au lieu d'être une distribution étendue d'électricité, était un corpuscule ponctuel, on tombait dans une autre difficulté : son énergie électromagnétique et par suite sa masse propre (reliée à l'énergie électromagnétique par le principe de l'inertie de l'énergie) auraient une valeur infinie. Cette difficulté aurait peut-être pu être levée dans le cadre des idées classiques par une ingénieuse théorie due à M. Born qui l'avait obtenue en approfondissant certaines idées de Mie et en admettant que pour les champs élevés les équations de Maxwell ne sont plus valables et doivent être remplacées par des équations non linéaires, mais à l'époque où fut effectuée la tentative de M. Born (1934), on savait déjà qu'une telle description classique de l'électron était insuffisante et qu'il fallait la reprendre dans le cadre des idées de la Physique quantique.

Or, dans le cadre de la Mécanique ondulatoire, du moins telle qu'elle est aujourd'hui interprétée, la théorie générale des particules soulève des difficultés encore plus grandes qu'auparavant. En effet, avec l'interprétation purement probabiliste de la Mécanique ondulatoire,

telle qu'elle est actuellement admise, la description des particules doit se faire uniquement à l'aide d'une onde  $\Psi$ , fonction continue simple représentation de probabilités : une telle description se trouve exclure entièrement toute localisation et toute structure visualisable des particules leur attribuant une étendue et un « rayon ». L'expression analytique des interactions dans le formalisme actuel revient à admettre que, du moins au point de vue des interactions, la particule se comporte comme si elle était ponctuelle, de sorte que l'on retombe sur la difficulté des énergies propres et des masses propres infinies. Diverses hypothèses physiques telle que l'introduction d'une longueur minima (Heisenberg) ou celle de champs non localisés (Yukawa), ainsi que certains formalismes (formalisme de la régularisation de Pauli) ont été envisagées pour écarter cette difficulté. Nous parlerons plus loin de la théorie du champ soustractif qui leur est apparentée.

On peut se demander si l'interprétation purement probabiliste actuelle de la Mécanique ondulatoire n'est pas responsable des difficultés que l'on rencontre ici et si un retour vers des conceptions plus classiques, dans le sens d'idées que j'avais indiquées en 1927 et qui ont été reprises récemment par MM. Bohm et Vigier, ne permettrait pas, en revenant à l'image des particules conçues comme des singularités ou des régions singulières du champ, d'aborder le problème avec plus de chances de succès. Cependant de grosses difficultés s'opposent toujours à l'abandon de l'interprétation purement probabiliste actuelle de la Mécanique ondulatoire, et tant que ces difficultés n'auront pas été levées il serait prématuré d'affirmer que c'est dans cette voie qu'il convient de s'engager pour traiter le problème de l'existence et de la structure des particules. Quelle que soit d'ailleurs la façon dont la théorie générale des particules parviendra à se développer, elle aura à résoudre des problèmes fort difficiles, car il lui faudra établir une classification des particules, expliquer pourquoi leur masses possèdent des valeurs discrètes bien définies et pourquoi il en est de même de leurs charges électriques (qui semblent même ne pouvoir posséder que les trois valeurs 0 et  $\pm e$ ). Il lui faudra interpréter la valeur de leur spin sans doute en s'aidant pour une part des considérations développées plus haut, car le spin est certainement un des éléments les plus essentiels, peut-être même le plus essentiel, de l'existence des particules. Il lui faudra aussi expliquer la valeur du moment magnétique propre lié à leur spin, valeur qui, dans des cas aussi importants que ceux du proton et du neutron, présente déjà des anomalies.

Puisque la théorie générale des particules, dont le développement sera certainement très difficile et exigera peut-être un nouveau bouleversement de nos conceptions actuelles, reste encore entièrement à

faire, je me contenterai de résumer dans la fin de cet exposé quelques travaux personnels se rattachant à ce qu'on peut appeler la « théorie du champ soustractif ». Cette théorie a pour principal intérêt de montrer comment on pourrait obtenir certaines relations entre les constantes qui caractérisent les diverses sortes de particules en réalisant une unification des champs dont les théories actuelles font état. Il est possible que les conceptions ainsi introduites, convenablement étendues ou modifiées, trouvent un jour leur place au sein de la théorie générale des particules.

### *La théorie du champ soustractif*

Nous avons indiqué tout à l'heure comment on pouvait classer les particules d'après la valeur (entière ou demi-entière) de leur spin. A l'heure actuelle, on ne connaît avec certitude comme particules de spin différent de  $\frac{1}{2}$ , en dehors des noyaux d'atomes, que les particules de spin 1, mais elles sont extrêmement importantes. Un premier exemple en est fourni par les photons qui constituent la lumière visible ainsi que tout l'ensemble des radiations électromagnétiques, depuis celles de la T. S. F. jusqu'aux Rayons X et  $\gamma$ . Un autre exemple, plus récemment découvert, est celui des mésons, ou plutôt de certaines sortes de mésons : bien que la valeur du spin des mésons ne soit dans tous les cas connue avec certitude, on peut penser que certains d'entre eux possèdent un spin égal à 1.

Or la théorie des particules à spin montre que, pour les particules de spin 1, la structure de l'onde associée est tout à fait différente de celle associée aux particules de spin  $\frac{1}{2}$  comme l'électron. Pour les particules de spin 1, en effet, contrairement à ce qui se passe pour les particules de spin  $\frac{1}{2}$ , l'onde associée est représentée par des grandeurs vectorielles et est tout à fait analogue à l'onde électromagnétique qui nous est familière depuis les travaux de Maxwell. Nous comprenons alors immédiatement pourquoi le photon, particule associée aux ondes électromagnétiques, est une particule de spin 1, puisque l'onde associée au photon n'est pas autre chose que l'onde électromagnétique de Maxwell. Mais nous avons aujourd'hui de bonnes raisons de croire que l'onde associée à certains mésons (peut-être certains mésons  $\pi$  et sans doute d'autres mésons encore mal identifiés à l'heure actuelle) est une onde analogue à une onde électromagnétique, ce qui concorde avec l'attribution à ces mésons d'un spin égal à 1.

De même que le champ électromagnétique est associé aux photons, un champ analogue par sa forme, mais non identique par sa nature, un « champ mésonique » serait associé à chaque sorte de mésons de spin 1. Or il est certain que la cohésion des noyaux, c'est-à-dire la stabilité des assemblages de nucléons qui les constituent, ne peut être due au champ électromagnétique qui est sans action sur les neutrons. Les théoriciens admettent donc actuellement que la cohésion des noyaux est assurée par des champs mésoniques qui agissent aussi bien sur les neutrons que sur les protons. Si cette vue est exacte, on voit que l'interaction entre particules peut avoir lieu soit par l'intermédiaire du champ photonique (ou électromagnétique), soit par l'intermédiaire de champs mésoniques. L'étude des interactions d'un corpuscule élémentaire avec ces deux types de champs est donc essentielle.

L'analyse de l'interaction entre un corpuscule et le champ électromagnétique, champ que nous connaissons bien depuis longtemps, est classique. On sait que l'intensité de cette interaction dépend d'un coefficient numérique caractéristique du corpuscule qu'on nomme sa « charge électrique ». La charge électrique peut être positive ou négative : elle peut même être nulle et, dans ce cas qui est celui des neutrons, il n'y a pas d'interaction entre le corpuscule et le champ électromagnétique. Si la charge est supposée ponctuelle, on trouve, nous l'avons déjà dit, que l'interaction du corpuscule avec le champ électromagnétique a pour effet que l'énergie du corpuscule au repos, donc sa masse propre d'après le principe de l'inertie de l'énergie, a une valeur infinie, résultat inadmissible. Avec les conceptions classiques, cette difficulté était facile à éviter : il suffisait d'admettre, comme le faisait Lorentz dans sa théorie des électrons, que les corpuscules électrisés, les électrons par exemple, ne sont pas ponctuels, mais occupent une région étendue de l'espace. On obtenait ainsi une valeur finie de l'énergie, mais en compensation il devenait nécessaire, nous l'avons dit, d'introduire une pression d'origine inconnue, la pression de Poincaré, pour assurer la stabilité du corpuscule.

Dans les théories quantiques, la question se présente tout autrement. En effet, l'interprétation admise de la Mécanique ondulatoire interdisant toute image structurale des particules, la théorie quantique actuelle du champ électromagnétique est obligée de postuler implicitement le caractère ponctuel des charges électriques et elle est ainsi conduite à leur attribuer à nouveau une énergie au repos, et par suite une masse propre, de valeur infinie. Depuis plus de vingt ans, la théorie quantique des champs électromagnétiques se heurte à cette difficulté sans parvenir à la surmonter. Les plus grands théori-

ciens de l'époque actuelle, tels que MM. Dirac et Heisenberg, ont étudié diverses manières d'échapper à cette difficulté fondamentale sans en trouver, semble-t-il, de vraiment satisfaisantes.

Le même problème se retrouve d'ailleurs dans la théorie des champs mésoniques. L'interaction entre un corpuscule et un champ mésonique dépend d'un coefficient caractérisant le corpuscule et jouant le même rôle que la charge électrique dans l'interaction d'un corpuscule avec le champ électromagnétique photonique : ce coefficient, qui peut être positif, négatif ou même nul, est la « charge mésonique » du corpuscule par rapport au champ mésonique considéré. La présence de la charge mésonique crée autour du corpuscule un potentiel dont la forme est un peu différente du potentiel électrostatique classique de Coulomb : on le nomme, du nom du physicien japonais qui a le premier introduit l'idée du champ mésonique, le « potentiel de Yukawa ».

Mais ici encore on trouve que l'énergie propre du corpuscule en interaction avec le champ mésonique est infinie si le corpuscule est ponctuel ; et malheureusement la théorie quantique des champs mésoniques conduit, elle aussi, à considérer les corpuscules comme ponctuels, de sorte qu'on retombe sur la difficulté des énergies infinies.

Pour éviter ces valeurs infinies de l'énergie qui ne peuvent pas être physiquement exactes, divers auteurs, notamment MM. Stückelberg, Bopp, Pais et Feynman [6] ont introduit une hypothèse que je nommerai « hypothèse du champ soustractif ». Sous sa forme la plus simple, elle consiste à admettre que tout corpuscule électrisé est toujours en interaction à la fois avec un champ photonique et avec un champ mésonique, la charge mésonique du corpuscule qui mesure l'intensité de son interaction avec le champ mésonique étant égale et de signe contraire à sa charge électrique qui mesure l'intensité de son interaction avec le champ photonique. En somme, le champ qui entoure un corpuscule électrisé, au lieu de se réduire à un simple champ électromagnétique, c'est-à-dire photonique, serait en réalité une combinaison d'un champ de nature photonique et d'un champ de nature mésonique s'opposant l'un à l'autre.

J'ai repris et développé cette conception depuis quelques années dans toute une série de travaux [7]. Le point essentiel de la conception nouvelle est sans doute qu'elle renonce à l'autonomie du champ électromagnétique et des divers champs mésoniques, tout au moins en ce qui concerne l'interaction de ces champs avec les corpuscules et qu'elle considère un champ global formé par la superposition du champ électromagnétique et de divers champs mésoniques de spin 1. Suivant une voie ouverte par M. Podolsky, on peut développer un schéma lagrangien qui donne sous une forme compacte les équations

de ce champ total pour un nombre quelconque de champs mésoniques de spin 1 [8]. Nous allons énumérer quelques-unes des conséquences que l'on peut tirer de cette théorie.

Reprenons d'abord le cas simple où un corpuscule électrisé, que nous supposons être un électron, est en interaction avec le champ électromagnétique et un seul champ mésonique : ceci signifie que s'il existe plusieurs champs mésoniques correspondant à des mésons de spin 1 de masse différente, toutes les charges mésoniques de l'électron sont nulles sauf une. La charge électrique de l'électron étant  $-e$ , sa charge mésonique doit être  $+e$ . Alors le potentiel *total* créé autour de lui par l'électron est :

$$V = -\frac{e}{r} + e \frac{e^{-kr}}{r}$$

où  $k$  est la constante du champ mésonique reliée à la masse propre  $\mu$  des mésons associés par la relation  $k = \frac{2\pi}{h} \mu c$ . On peut obtenir l'énergie propre de l'électron en partant de l'expression du tenseur énergie-quantité de mouvement donné par le schéma lagrangien général. Il est plus simple de la calculer en remarquant qu'elle doit avoir pour expression :

$$W_0 = \frac{1}{2} \lim_{r \rightarrow 0} (-e V) = \frac{k e^2}{2}$$

Comme d'après le principe de l'inertie de l'énergie, on doit avoir  $W_0 = mc^2$ ,  $m$  étant la masse propre de l'électron, on trouve

$$\mu = 2 \frac{h c}{2 \pi e^2} m$$

Or  $\frac{2\pi e^2}{h c}$  est la fameuse constante de structure fine, nombre pur dont l'inverse est sensiblement égal à 137 ; d'où

$$\mu = 274 m$$

valeur très voisine de la masse du méson  $\pi$ . C'est là une coïncidence curieuse, mais qui est peut-être fortuite.

Un autre résultat curieux, déjà signalé par M. Bopp, est le suivant : si l'on reprend le calcul fait autrefois par Henri Poincaré qui avait montré la tendance de l'électron à faire explosion sous l'influence de la pression électrostatique et la nécessité d'introduire, pour contrebalancer cette pression et assurer la stabilité de l'électron, une pression antagoniste d'origine inconnue, on s'aperçoit qu'ici la pression de Poincaré est automatiquement introduite par l'hypothèse du champ soustractif. Autrement dit : la pression centrifuge qu'exer-

cerait le champ électrostatique s'il était seul, et qui ferait exploser l'électron, se trouve annulée par son amalgame avec le champ mésonique. On peut dire que, si la conception classique de l'électron ne parvenait pas à expliquer sa stabilité, c'est parce qu'elle lui attribuait seulement un champ électrostatique et ignorait son champ mésonique. Cette manière de lever automatiquement la difficulté classique, dont la pression de Poincaré était l'expression, est l'un des aspect les plus séduisants de la théorie du champ soustractif.

On peut essayer d'appliquer la même conception à un corpuscule neutre comme le neutron. Pour qu'il ait une masse propre finie, il faut alors, puisque son interaction avec le champ électromagnétique est nulle, qu'il soit en interaction avec deux champs mésoniques différents, c'est-à-dire correspondant à des mésons de masses différentes : de plus, il faut que les deux charges mésoniques du corpuscule neutre soient égales et de signe contraire. Si l'on connaissait la valeur de ces deux charges et celles des masses des deux sortes de mésons avec lesquels il interagit, on pourrait calculer la masse propre du corpuscule neutre et l'on obtiendrait une valeur finie. Ce qu'il y a d'intéressant dans ce cas du corpuscule neutre, c'est que l'existence dans la nature de corpuscules neutres comme le neutron semble suffire à prouver l'existence d'au moins deux sortes de mésons de spin 1 de masses différentes.

Naturellement on peut généraliser la théorie en considérant un corpuscule en interaction avec plusieurs champs mésoniques de spin 1, si l'on suppose, ce qui n'a rien actuellement d'in vraisemblable, qu'il existe dans la nature un grand nombre de mésons de spin 1 et de masses différentes. Rien n'empêche d'ailleurs de considérer les photons comme une catégorie particulière de mésons dont la masse propre serait nulle ou pratiquement nulle. Nous pouvons donc dire qu'en général un corpuscule se trouve en interaction avec un certain nombre  $n$  de champs mésoniques parmi lesquels l'un peut être le champ électromagnétique photonique, la charge mésonique correspondante étant alors la charge électrique au sens usuel. Cette généralisation que j'ai étudiée en particulier dans une note récente [9] montre que les  $n$  masses mésoniques et les  $n$  charges mésoniques qui interviennent dans cette interaction doivent, pour que l'énergie propre corpuscule reste finie, satisfaire à un certain nombre de relations dont le nombre croît avec  $n$ . Ces relations ont la forme générale

$$\sum_{i=1}^n \epsilon_i \mu_i^{2(p-2)} = 0 \quad 2 \leq p \leq n$$

$\mu_i$  étant la masse propre du  $i^e$  genre de mésons. Pour  $n = 2$ , on a la

seule relation  $\sum_1^2 \varepsilon_i = 0$  que nous connaissons déjà. Pour  $n = 3$ , on a les deux relations  $\sum_1^3 \varepsilon_i = 0$ ,  $\sum_1^3 \varepsilon_i \mu_i^2 = 0$ . Pour  $n = 4$ , on a  $\sum_1^4 \varepsilon_i = 0$ ,  $\sum_1^4 \varepsilon_i \mu_i^2 = 0$ ,  $\sum_1^4 \varepsilon_i \mu_i^3 = 0$ , etc. La relation que la somme des charges mésoniques doit être nulle doit donc toujours être satisfaite, mais d'autres relations s'y ajoutent pour  $n > 2$ . Pour  $n$  quelconque, on a  $n - 1$  relations entre les  $n$  charges et les  $n$  masses mésoniques. On peut donc considérer que sur les  $2n$  constantes de charge et de masse, il y en a  $n + 1$  qui peuvent avoir des valeurs quelconques, les autres pouvant s'obtenir à partir de celles-là par les relations précédentes (1).

Si l'on parvient à avoir une liste exacte des masses des mésons neutres de spin 1 et si l'on trouve un moyen d'évaluer les coefficients d'interaction entre un corpuscule tel que l'électron ou le neutron et les champs mésoniques correspondants, on pourra vérifier si les relations trouvées plus haut sont satisfaites. Bien que nos connaissances sur les mésons augmentent rapidement, elles sont encore tout à fait insuffisantes pour permettre de telles vérifications.

J'en ai dit assez sur la théorie du champ soustractif pour montrer l'intérêt que présentent les conceptions de ce genre, notamment parce qu'elles permettent de prévoir certaines relations entre les masses des diverses particules. Néanmoins, si l'idée de la complexité des particules de spin différent de  $\frac{1}{2}$  peut permettre d'opérer un classement rationnel des diverses sortes de particules et de réduire ainsi le nombre de celles qu'on peut qualifier d'élémentaires si, d'autre part, la théorie du champ soustractif, peut-être convenablement corrigée ou étendue, peut permettre d'ouvrir des perspectives nouvelles et d'établir des relations vérifiables entre les constantes attachées aux diverses particules, il n'en reste pas moins vrai qu'une théorie générale et complète des particules reste à peu près entièrement à faire et que son élaboration constitue l'une des tâches les plus urgentes et les plus difficiles de la Physique de demain. Malgré sa très grande difficulté, cette tâche doit être prochainement abordée en raison de son importance, même s'il est nécessaire pour la mener à bien de bouleverser à nouveau les idées actuellement admises : en effet, c'est cette théorie générale et complète des particules qui

(1) Les mésons de spin 1 dont nous nous occupons ici sont en principe des mésons neutres. Les charges mésoniques dont nous parlons sont les coefficients d'interaction d'un corpuscule avec les champs mésoniques et non les charges électriques des mésons.

seule pourra nous permettre de comprendre la véritable raison d'être de la structure atomique de la matière et des rayonnements ainsi que l'origine des valeurs discontinues des paramètres qui caractérisent leurs unités élémentaires.

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] LOUIS DE BROGLIE. — *Une nouvelle théorie de la Lumière. Actualités scientifiques*, n° 181, Hermann, Paris 1934.  
*Nouvelles recherches sur la théorie de la Lumière. Actualités scientifiques*, n° 411, Hermann, Paris 1936.  
*Une nouvelle théorie de la Lumière : la Mécanique ondulatoire du Photon*, Hermann, Paris, 2 volumes, 1940-41.  
*Théorie générale des particules à spin*, Gauthier-Villars, 1943.
- [2] J. FRENKEL. — *Journal de Physique de l'U. R. S. S.*, 1945, 9, p. 1943.
- [3] E. FERMI et C. N. YANG. — *Physical Review*, 1949, 76, p. 1739.
- [4] LOUIS DE BROGLIE. — *Comptes rendus*, 1935, 200, p. 361.
- [5] LOUIS DE BROGLIE et M. A. TONNELAT. — *Comptes rendus*, 1950, 230, p. 1329.  
LOUIS DE BROGLIE. — *Comptes rendus*, 1950, 230, p. 1434.  
*Journal de Physique*, 1951, 12, p. 509.  
M. A. TONNELAT. — *Journal de Physique*, 1951, 12, p. 516.
- [6] E. G. G. STUECKELBERG. — *Nature*, 144, 1939, p. 118.  
*Helvetica Physica Acta*, 14, 1941, p. 51.  
F. BOPP. — *Annalen der Physik*, 36, 1940, p. 345 et 42, 1943, p. 575.  
A. PAÏS. — *Verhandelingen der Nederlandsche Akademie*, 1<sup>o</sup> sectie, Deel 19, n° 1, Amsterdam, 1947.  
R. P. FEYNMANN. — *Physical Review*, 74, 1948, p. 939.
- [7] LOUIS DE BROGLIE. — *Comptes rendus*, 229, 1949, p. 157.  
*Comptes rendus*, 229, 1949, p. 269.  
*Comptes rendus*, 229, 1949, p. 401.  
*Portugaliae Mathematica*, 8, 1949, p. 37.  
*Journal de Physique*, 11, 1950, p. 481.
- [8] LOUIS DE BROGLIE. — *Comptes rendus*, 232, 1951, p. 1269.  
*Comptes rendus*, 234, 1952, p. 20 (1).
- [9] LOUIS DE BROGLIE. — *Comptes rendus*, 234, 1952, p. 1505.
- (1) Voir aussi DAYKIN. — *Canadian journal of Physics*, 29, 1951, p. 459.

ACHEVÉ D'IMPRIMER  
LE DIX-SEPT MARS MIL NEUF CENT CINQUANTE-TROIS  
SUR LES PRESSES DE L'IMPRIMERIE ALENÇONNAISE  
— MAISON POULET-MALASSIS, ALENÇON (ORNE) —



— BERNARD GRISARD, DIRECTEUR GÉNÉRAL —

---

Dépôt légal : 1<sup>er</sup> trimestre 1953 — N° d'ordre : 2.824

