

**LES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES DE LA MATIÈRE
ET LES NOUVELLES THÉORIES
DU NOYAU DE L'ATOME**

UNIVERSITÉ DE PARIS



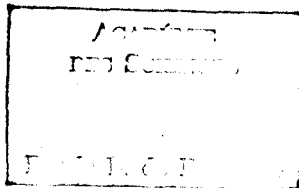
Les particules élémentaires de la matière et les nouvelles théories du noyau de l'atome

par

M. Louis de BROGLIE

Secrétaire Perpétuel de l'Académie des Sciences

Inscr. n° 2903



Conférence faite au Palais de la Découverte

le 5 Février 1944

LES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES DE LA MATIÈRE ET LES NOUVELLES THÉORIES DU NOYAU DE L'ATOME

JE voudrais exposer, cet après-midi, l'état actuel de nos connaissances sur les particules élémentaires de la matière, ainsi que quelques vues sur les théories contemporaines du Noyau de l'atome. Mais, avant d'aborder le vif de mon sujet, il est nécessaire que je présente un tableau, nécessairement très résumé, des découvertes successives qui ont permis à la Physique d'en arriver sur ce point là où elle en est aujourd'hui.

L'HYPOTHÈSE ATOMIQUE — Vous savez que l'hypothèse atomique, déjà adoptée sous une forme un peu vague par les Philosophes de l'Antiquité, a été reprise d'une manière plus précise par les Chimistes et les Physiciens du XIX^e siècle et qu'elle a trouvé un nombre de plus en plus grand de vérifications.

Ce sont les Chimistes qui ont introduit, les premiers, d'une façon systématique dans la Science moderne, la notion d'atome. L'étude des corps chimiquement bien définis a, en effet, conduit à les partager en deux grandes classes bien distinctes ; les « corps composés » qui peuvent être dissociés en corps plus simples à l'aide d'opérations chimiques appropriées ; et les « corps simples » ou « éléments chimiques » qui résistent à toute tentative de décomposition par la voie chimique classique. L'étude des lois quantitatives, telles que les lois des proportions définies ou des proportions multiples (qu'on étudie dans les cours de Chimie générale) suivant lesquelles les corps simples s'unissent pour former des corps composés, a amené peu à peu les Chimistes à adopter l'hypothèse suivante qui est l'hypothèse atomique : « Un corps simple serait formé de petites particules, toutes identiques entre elles, qui sont, par définition, les atomes de ce corps simple. Les corps composés sont formés de molécules constituées par l'union en proportion invariable d'atomes des corps simples constituants ».

Cette hypothèse est complétée par celle qui fut suggérée presque simultanément vers 1815 par Ampère et par Avogadro et dont voici l'énoncé : « Une molécule-gramme d'un corps pur quelconque qui occupe à l'état gazeux, d'après une loi de Gay-Lussac., 22 l. 30 dans les conditions usuelles de température et de pression contient toujours le même nombre de molécules, quel que soit le corps envisagé. »

Ce nombre, d'une importance capitale pour la Physique atomique, est dit « nombre d'Avogadro », ou « nombre de Loschmidt ». On sait qu'après des luttes souvent très vives et très longues, l'hypothèse atomique a fini par triompher et par être admise par tous les Chimistes. Elle sert aujourd'hui de base à toutes nos interprétations des réactions chimiques et à l'emploi des formules traduisant la constitution des molécules et de leurs transformations au cours des réactions.

L'hypothèse atomique n'a pas tardé à pénétrer ensuite en Physique où elle a permis d'expliquer un nombre toujours croissant de propriétés de la Matière. La théorie cinétique des gaz, en admettant qu'un gaz est formé par un nombre énorme d'atomes ou de molécules animés de mouvements rapides et incoordonnés, est parvenue à interpréter les notions de pression, de température, de chaleur spécifique, etc... et à retrouver les lois fondamentales qui lient ces grandeurs. Généralisant les procédés de la théorie cinétique des gaz, la Mécanique statistique a pu donner une interprétation générale de la notion d'Entropie et interpréter de nombreuses propriétés des corps matériels. Enfin, ce sont les Physiciens qui sont parvenus à fournir des preuves directes de l'existence réelle des atomes. Ils y sont arrivés en étudiant notamment les phénomènes de fluctuations, de mouvements Browniens et autres où se manifeste clairement le caractère discontinu de la Matière et aussi en mesurant avec précision, par des méthodes très variées, le nombre d'Avogadro, et en constatant que l'on obtient toujours le même nombre. La concordance des valeurs ainsi obtenues pour ce nombre fondamental, notamment dans les célèbres expériences de M. Jean Perrin, a apporté une démonstration décisive de l'existence des atomes.

Je rappellerai seulement ici que l'atome le plus léger est l'atome d'hydrogène. Comme le nombre d'Avogadro est égal à environ 6.10^{23} , c'est-à-dire à un nombre énorme, on en déduit que l'atome d'hydrogène a une masse d'environ $1.66.10^{-24}$ gramme. L'on sait aujourd'hui qu'il existe 92 corps simples, qu'on peut ranger en une suite, la suite de Mendéléeff, où la succession des éléments coïncide à peu près avec l'ordre des poids atomiques croissants. Si l'on parcourt cette suite de Mendéléeff les propriétés chimiques et physiques des éléments présentent des variations périodiques qui ont été

interprétées par les théories quantiques de l'atome dont nous aurons à parler tout à l'heure. Le rayon des atomes est de l'ordre de 10^{-8} cm, c'est-à-dire que l'on peut, en toute première et grossière approximation, considérer les atomes comme des sphères ayant un rayon d'environ 10^{-8} cm.

L'ÉLECTRON. En même temps que s'accumulaient ainsi les preuves de la structure discontinue de la Matière, on parvenait également à établir la structure discontinue de l'électricité. La façon dont a été découverte, il y a un demi-siècle, l'existence des électrons est trop connue pour que j'en reprenne ici un historique détaillé. Les lois de l'électrolyse établies par Faraday pouvaient déjà faire soupçonner l'existence d'éléments discontinus dans la structure de l'électricité. Peu à peu, cette idée s'est précisée sous la forme suivante. L'électricité négative serait formée par de petits corpuscules, les électrons, tous identiques entre eux, possédant une masse et une charge électrique extraordinairement petites. On a pu étudier les électrons qui s'échappent de la Matière dans diverses circonstances et qui voyagent ensuite isolément dans l'espace. (ce sont par exemple les rayons cathodiques et les rayons β des corps radioactifs). En les recueillant dans des électromètres, on a pu vérifier d'abord que leur charge était négative, puis, en les soumettent à des champs électriques et magnétiques variés, on a pu constater que ces électrons se meuvent toujours, du moins dans les conditions où on pouvait alors les étudier, comme de petites particules chargées obéissant aux lois classiques de la Mécanique. Et cette circonstance a permis de mesurer avec précision leur charge électrique et leur masse. La charge électrique de l'électron vaut : $-4,8 \cdot 10^{-10}$ u. e. s., puisque c'est une charge négative, et la masse de l'électron vaut $0,9 \cdot 10^{-27}$ gramme c'est-à-dire que l'électron est encore beaucoup plus léger que l'atome d'hydrogène, environ deux fois plus léger que l'atome d'hydrogène.

La théorie des phénomènes électriques a été alors refondue en tenant compte de l'existence des électrons. L'électricité négative constituée par des électrons de masse très petite est apparue comme la partie mobile de l'électricité ; tandis que l'électricité positive est, au contraire, généralement transportée par des ions atomiques de masse beaucoup plus grande que celle de l'électron et elle est par suite beaucoup moins mobile que l'électricité négative. Ainsi s'est manifestée entre les deux électricités, qui à tant d'égards jouent un rôle symétrique, une dissymétrie caractéristique, l'électricité positive apparaissant comme beaucoup plus liée à la masse inerte que la négative. Cette dissymétrie est fondamentale et nous la retrouverons sans cesse au cours de cet exposé.

L'ATOME DE BOHR. Après avoir reconnu le caractère corpusculaire de l'Électricité, les physiciens ont voulu s'en servir pour expliquer la structure de l'atome. C'est qu'en effet, si les premiers savants qui, à l'époque moderne, avaient développé l'hypothèse atomique, avaient, peut-être à l'instar des atomistes de l'antiquité, imaginé les atomes comme des unités simples et indivisibles, cette conception n'aurait pu être maintenue. Bien des faits indiquaient au contraire que des atomes doivent être des édifices compliqués, ne serait-ce que l'extrême complexité des spectres lumineux qu'ils sont susceptibles d'émettre. Comme les électrons que l'on voit sortir de la matière en bien des circonstances doivent finalement provenir des atomes, l'idée que les édifices atomiques contiennent des particules électrisées se présentait naturellement à l'esprit. Aussi, à partir de 1900, a-t-on cherché à construire des « modèles » d'atomes, modèles qui représentent des atomes comme des édifices formés de particules électrisées et qui doivent être susceptibles de rendre compte des propriétés physiques et chimiques de ces édifices. Après divers tâtonnements, on a reconnu la nécessité d'adopter un modèle planétaire de l'atome, c'est-à-dire, que l'atome qui occupe le rang N dans la suite de Mendéléeff (ou, comme on dit maintenant, l'atome de nombre atomique N) serait formé d'un noyau central portant une charge $+$ Ne siège de la quasi totalité de la masse atomique. Ce noyau central serait donc relativement lourd et chargé positivement. Il serait entouré de N électrons de charge $-e$, tournant autour de ce noyau central, de sorte que le système total est électriquement neutre. L'atome le plus simple, celui qui correspond à $N = 1$ c'est-à-dire au premier atome de la suite de Mendéléeff qui est l'hydrogène, aurait un noyau central dont la charge serait égale et de signe contraire à celle de l'électron : $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$ u. e. s., noyau qui, étant le plus simple de tous les noyaux atomiques, a été nommé le *proton*.

Ce sont des expériences célèbres de Rutherford, sur les déviations subies par les Rayons α des corps radioactifs lors de leur passage à travers la Matière, qui ont conduit à admettre que la masse presque totale de l'atome est localisée dans un noyau central où elle est unie à l'électricité positive. Et c'est là un nouvel aspect de la tendance qu'a l'électricité positive de s'associer à la masse.

Ce modèle planétaire de l'atome qui a l'avantage de parler à l'imagination et de nous représenter l'atome comme une sorte de réduction du système de l'astronomie serait resté sans doute un schéma assez vague si M. Bohr n'était parvenu, en 1913, à en tirer une théorie remarquable et générale de l'atome, théorie susceptible de nombreuses vérifications quantitatives et qui a vraiment ouvert

une ère nouvelle dans l'histoire de la physique contemporaine. Pour utiliser de la sorte le modèle planétaire, M. Bohr a dû le compléter en y introduisant les idées générales de la théorie des quanta. Je ne puis naturellement pas ici retracer la genèse de cette surprenante théorie des quanta qui a bouleversé les bases les mieux établies de la Physique. Je me contenterai de rappeler que M. Max Planck, dans une intuition de génie, a, vers 1900, au cours de ses études sur le rayonnement noir, introduit l'idée qu'il existe dans la nature une constante universelle qui porte aujourd'hui le nom de constante de Planck, et que l'on représente toujours par la lettre h : elle joue le rôle d'une unité élémentaire pour l'action au sens mécanique du terme. L'existence de ce quantum d'action, de cette unité d'action, devait avoir, toujours d'après M. Planck, pour conséquence que seuls certains des mouvements qui sont prévus par la mécanique classique, mouvements qui sont dits quantifiés, peuvent exister dans la nature. Cette restriction ne joue d'ailleurs qu'à très petite échelle, car l'unité d'action h est très petite de sorte que pour les mouvements à grande échelle, intervient un nombre énorme d'unités d'action et tout se passe comme si l'action était continue ; pour les mouvements d'échelle atomique, la valeur finie de la constante h intervient d'une façon essentielle. Le quantum h a une valeur extrêmement petite, en unités c. g. s. ; elle vaut environ $6, 54 \cdot 10^{-27}$. La restriction des mouvements due à l'existence de ce quantum d'action ne joue aucun rôle sensible dans les phénomènes à grande échelle, mais à l'échelle des atomes, elle intervient d'une façon tout à fait essentielle. M. Bohr a donc dû en tenir compte dans une théorie de l'atome et le modèle planétaire qu'il a pu ainsi développer a connu, vous le savez, un immense succès ; elle a pu rendre compte du premier coup de la forme très particulière et jusqu'alors très mystérieuse des lois spectrales, des lois qui régissent les spectres optiques et également les spectres des rayons X et des rayons γ : elle a pu rendre compte aussi de la périodicité des propriétés physiques et chimiques présentées par les éléments dans la suite de Mendéléeff, et d'un grand nombre de propriétés atomiques.

Après l'épanouissement de cette théorie de Bohr, ce qui restait le plus mystérieux dans la structure de l'atome, (si nous laissons de côté le mystère de la signification des quanta) c'était le noyau central, ce noyau qui joue le rôle de soleil central dans la conception planétaire de Rutherford. Dans ce noyau réside la presque totalité de la masse de l'atome qui se trouve rassemblée dans un domaine dont les dimensions sont encore 100.000 fois plus petites que celles de l'atome lui-même, et sont de l'ordre de 10^{-13} cm : l'atome étant figuré grossièrement comme une

boule de rayon 10^{-8} cm, c'est à l'intérieur d'une autre boule dont le rayon est 10^{-13} cm, donc 100.000 fois plus petit, que se trouve réunie la presque totalité de la masse de l'atome. Les électrons qui entourent ce noyau représentent une très faible proportion de la masse de l'atome.

Or, ce noyau si petit, on savait déjà à cette époque qu'il était certainement complexe. Les phénomènes de la radioactivité naturelle qui ont été découverts bien avant la théorie de Bohr, à la suite des travaux d'Henri Becquerel et de Pierre et Marie Curie, prouvaient en effet que les noyaux de certains atomes lourds sont susceptibles de se décomposer spontanément en donnant naissance à des noyaux plus légers. Et cette désintégration radioactive peut être accompagnée par l'émission d'électrons qu'on appelle alors des rayons β , de noyaux d'Helium chargés positivement, ou de rayons α et encore de radiations très pénétrantes qu'on appelle des rayons γ .

Mais ces phénomènes de transmutation, tout en apportant la preuve de la complexité interne des noyaux, ne donnaient guère de renseignements sur leur structure, d'autant plus que ces phénomènes sont malheureusement tout à fait insensibles à tous nos moyens d'action ; ils se déroulent avec un rythme et dans des conditions que nous ne pouvons aucunement modifier. Pour cette raison on n'a pas pu se servir beaucoup de ces phénomènes pour tâcher de savoir comment le noyau était constitué.

La situation s'est trouvée considérablement améliorée lorsqu'en 1919 Rutherford est parvenu, en bombardant des atomes légers d'azote à l'aide de particules rapides, à provoquer une transmutation, transmutation artificielle en somme, mettant en liberté des noyaux d'hydrogène, ou protons, avec transformation des atomes d'azote en atomes d'oxygène. Ainsi pour la première fois était établie par ces expériences la possibilité de produire des transmutations, c'est-à-dire de transformer un corps simple en un autre. La possibilité des transmutations rêvées par les Alchimistes du Moyen-Age était ainsi réalisée et était créée une méthode qui devait permettre d'explorer la structure des noyaux atomiques en provoquant leur décomposition.

Néanmoins, cette méthode a été assez longue à porter tous les fruits qu'on en pouvait attendre.

La découverte des isotopes est venue ensuite. Les isotopes sont des atomes qui ont sensiblement les mêmes propriétés physiques et chimiques, mais avec des masses atomiques différentes. Cette découverte est venue attirer l'attention des Physiciens sur ce fait que les deux caractéristiques alors connues des noyaux, leur charge électrique positive et leur masse, n'étaient pas liées l'une à

l'autre d'une façon tout à fait univoque. Il peut exister des noyaux ayant même charge et des masses différentes, ou ayant même masse et des charges différentes. La théorie de l'atome de Bohr avait montré que si l'on fait abstraction de certains phénomènes délicats à observer, l'ensemble des propriétés physiques et chimiques de l'atome était déterminé par la charge positive de son noyau, c'est-à-dire par son nombre atomique N , et indépendant de la masse du dit noyau. Les propriétés physiques et chimiques dépendent de la charge du noyau central et sont indépendantes de la masse.

Voilà ce qu'on savait. En principe, il peut donc exister des noyaux ayant même charge, mais des masses différentes, leurs propriétés physiques et chimiques étant presque identiques puisque ces propriétés ne dépendent pas de façon sensible de la masse. Les expériences de Thomson, d'Aston et de leurs continuateurs ont prouvé l'existence et l'abondance des noyaux isotopes, ont montré qu'il existe des noyaux ayant même charge et des masses différentes. On a pu voir que la plupart des éléments simples étaient en réalité des mélanges d'isotopes en proportion invariable. Ceci a conduit à compliquer très notablement la classification des éléments chimiques,

puisque par exemple, on connaît actuellement jusqu'à 10 atomes d'étain de masses différentes, c'est-à-dire 10 atomes qui ont les propriétés physiques et chimiques de l'étain, et même charge électrique, mais des masses différentes, de sorte que nous avons dix espèces d'atomes d'étain différentes, et pour d'autres corps il y a également plusieurs isotopes. Aujourd'hui, il y a donc lieu de distinguer plus compétement les noyaux isotopes, qui sont des noyaux ayant la même charge électrique et des masses différentes, et les noyaux isobares qui, ayant la même masse et des charges différentes, ont des propriétés physiques et chimiques différentes. Et même, parmi les radioéléments artificiels qui ont été plus récemment découverts, on trouve des noyaux isomères, qui ont même charge et même masse et qui diffèrent par certaines de leurs propriétés, par exemple par leurs propriétés radioactives. Ces noyaux isomères sont des noyaux qui ont même charge et même masse, mais qui diffèrent par leur état interne.

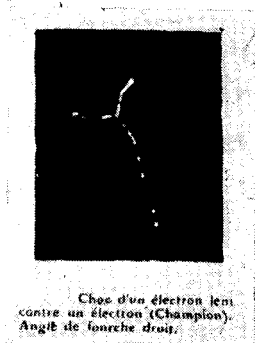


FIG. 1

Vous voyez que tout cela s'est beaucoup compliqué.

Je vais vous présenter quelques photographies qui vont vous permettre de voir un certain nombre de phénomènes provoqués par les électrons et les protons.

La figure 1 représente le *choc d'un électron contre un électron* : on peut remarquer lorsqu'on étudie au point de vue stéréoscopique ce cliché, que les deux électrons qui se trouvent mis en mouvement par le choc du premier électron contre le second, ont une trajectoire qui forme un angle droit, ce qui est nécessaire au point de vue



FIG. 2



FIG. 3

de la mécanique, lorsqu'on a affaire à des corpuscules animés d'assez faible vitesse, comme c'est le cas ici.

Le choc d'un électron de grande vitesse contre un électron (fig.2) est un phénomène du même genre. Il y a quelque chose d'intéressant sur cette photo : quand on a un électron de grande vitesse, on est obligé de lui appliquer la dynamique de relativité. On voit que la fourche ne fait pas nécessairement un angle droit. Pour les faibles vitesses, on doit trouver un angle droit ; pour les grandes vitesses, on ne doit pas nécessairement trouver un angle droit. Cette photographie montre que pour les grandes vitesses, on n'a pas un

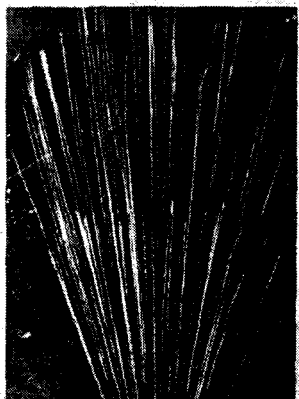
angle droit ; ce qui est une vérification de la mécanique de relativité.

Figure 3. *Trajectoire d'électron et de proton.* Vous pouvez voir la différence des trajectoires d'électrons qui sont des trajectoires fines. Les trajectoires de proton sont de grosses trajectoires à l'aspect un peu baveux.

La figure 4 représente la transmutation d'un noyau d'azote avec capture d'une particule α et émission d'un proton. Vous voyez ici le choc d'un noyau d'azote par une particule donnant lieu à l'émission d'un proton. C'est un des phénomènes de transmutation qui ont été observés par Rutherford et qui ont permis de transformer les noyaux les uns dans les autres et de provoquer la transmutation.

Nous allons maintenant reprendre l'examen des questions concernant le noyau en cherchant à nous figurer quelle conception on pouvait se faire des particules élémentaires et de la constitution des noyaux vers 1925. Nous pourrons ainsi mieux évaluer le chemin très considérable qui a été parcouru depuis lors.

A cette époque, deux sortes de particules pouvaient mériter le nom de particules élémentaires et être considérées comme des particules élémentaires, indécomposables. C'était d'une part, l'électron que son rôle d'élément mobile de l'électricité distinguait depuis longtemps ; d'autre part, le proton ou noyau d'hydrogène, le plus léger des noyaux, dont la charge est égale et de signe contraire à celle de l'électron et qu'il était naturel de considérer comme l'unité d'électricité positive. On admettait tout naturellement vers cette époque que c'étaient là les deux particules élémentaires fondamentales à l'aide desquelles tous les noyaux étaient construits. On pensait que les noyaux plus compliqués que celui de l'hydrogène étaient formés de protons et d'électrons.



Transmutation d'un noyau d'azote avec capture d'une particule α et émission d'un proton (Blackett et Lees). La trajectoire du proton est indiquée par une flèche. Rayons γ de ThC et de ThC' .

FIG. 4

Or, la masse du proton est d'environ 1840 fois plus grande que celle de l'électron, bien que deux particules aient même charge électrique en valeur absolue. Ceci traduisait la tendance que je vous ai déjà signalée, que l'électricité positive tend à s'allier plus facilement à la masse que l'électricité négative.

Il est facile de voir quelles conséquences résultaient de l'hypothèse que tout noyau serait formé de protons et d'électrons. Considérons le noyau d'un atome occupant le rang N dans la suite de Mendéléeff, sa charge électrique est Ne . Il devra contenir un nombre n_p de protons et un nombre n_e d'électrons tels que $N = n_p - n_e$.

Comme les électrons ont une masse presque négligeable devant celle des protons la masse de ce noyau devra être sensiblement égale à n_p fois celle du proton. Les masses atomiques de tous les atomes devraient donc être sensiblement égales à des multiples entiers de celle de l'atome d'hydrogène.

La conclusion à laquelle on arrivait, c'est que les masses des différents noyaux devraient être sensiblement des multiples entiers de la masse de l'atome d'hydrogène. •

Au premier abord, ces proportions semblent contredites par l'expérience, puisque les poids atomiques des éléments rapportés à l'hydrogène sont en général loin d'être des entiers, mais la découverte des isotopes a permis de lever cette difficulté, car on sait maintenant que tout noyau atomique a bien une masse qui est très voisine d'être un multiple entier de celle de l'hydrogène. Si les poids atomiques apparents, usuellement mesurés par les chimistes, des corps simples usuels, sont souvent loin d'être des multiples entiers de celui de l'hydrogène, c'est qu'en réalité ces corps simples usuels sont des mélanges d'isotopes en proportions constantes et leur poids atomique apparent n'est qu'une moyenne des poids atomiques des isotopes qui figurent dans ce mélange. De sorte que le poids atomique apparent a l'air de ne pas être un multiple entier du poids de l'atome d'hydrogène, mais si on tient compte du fait qu'il y a des isotopes, on s'aperçoit que le noyau de chacun des isotopes a bien une masse qui est sensiblement un multiple entier de la masse du proton, du noyau d'hydrogène. Il subsiste de faibles écarts entre la masse des divers noyaux, compte tenu de l'isotopie et les multiples entiers de la masse du proton. Mais ces écarts qui sont très importants au point de vue théorique, qu'on désigne sous le nom de défaut de masse, peuvent s'expliquer si on considère qu'au moment de la formation du noyau à partir de ses constituants, il y a de l'énergie dégagée. Si on tient compte du principe de l'inertie de l'énergie tel qu'il nous a été enseigné par la théorie de la Relativité, nous apprendrons qu'à toute énergie

est associée une masse ; on voit qu'à partir de la formation du noyau il y aura un peu de masse qui sera perdue, à cause du rayonnement de l'énergie qui se produit à ce moment. On comprend que le noyau formé aura une masse qui sera un peu inférieure à un nombre entier de fois la masse du proton. De sorte qu'il ne paraissait plus, à la suite de la découverte de l'isotopie et de ces considérations basées sur l'inertie de l'énergie, y avoir de difficultés sérieuses qui viennent s'opposer à l'hypothèse que le proton et l'électron étaient les deux particules élémentaires à l'aide desquelles tous les noyaux et toute la Matière seraient constitués.

Nous allons voir que cette hypothèse a dû être modifiée : de nouvelles particules élémentaires ont été découvertes et notre conception sur la structure du noyau s'en est trouvée sensiblement transformée.

Avant d'aborder l'exposé de ces questions, il faut que je rappelle comment nos idées sur les particules en général ont été profondément modifiées par l'introduction de la Mécanique ondulatoire et de la découverte du spin et des phénomènes d'échange.

Je rappellerai d'abord comment le développement de nos connaissances sur la lumière a conduit depuis une quarantaine d'années, à un certain retour vers les conceptions corpusculaires anciennes sans qu'il ait été possible néanmoins d'abandonner pour cela complètement la théorie ondulatoire, puisqu'elle seule est capable de fournir l'explication correcte des phénomènes tout à fait classiques et bien connus de l'optique physique que sont par exemple les phénomènes d'interférence et de diffraction. Et cependant, l'existence de certains autres phénomènes tels que l'effet photoélectrique et l'effet Compton, où l'on peut pour ainsi dire saisir sur le vif l'action élémentaire de la lumière sur les particules matérielles, a obligé les physiciens à introduire le concept de photon, ou de corpuscule lumière ; le photon, ou corpuscule de lumière, qui accompagne les ondes lumineuses et qui, dans une onde monochromatique de fréquence ν transporte l'énergie égale à $h\nu$, h étant la constante de Planck. Toute lumière ayant une couleur bien déterminée serait formée de photons dont l'énergie serait égale au produit de la fréquence par la constante de Planck. Et cependant, on s'est trouvé alors devant une grosse difficulté, c'est que cette conception des photons qui devrait introduire l'idée autrefois admise avant les travaux classiques du début du XIX^e siècle, en ce qui concerne la structure de la lumière, cette nouvelle hypothèse qui réintroduit la structure corpusculaire de la lumière, n'est pas compatible, au moins au premier abord, avec l'explication que l'on donne dans l'optique ondulatoire des phénomènes d'interférence et de diffraction.

Alors est apparue la nécessité, tout en utilisant des photons, de développer une théorie synthétique où les concepts d'onde et de corpuscules soient en quelque sorte juxtaposés et liés entre eux. C'est ce qu'on est arrivé à faire en développant une théorie où cette liaison entre les photons et les ondes est réalisée d'une façon assez subtile en faisant intervenir des relations des probabilités que je ne développerai pas ici.

Cette nouvelle représentation dualiste de la lumière par ondes et par corpuscules a ensuite servi de modèle à une conception nouvelle des particules matérielles, conception qui s'est rapidement développée entre 1923 et 1927, qui est aujourd'hui connue sous le nom de mécanique ondulatoire. En Mécanique ondulatoire, on associe la notion de propagation d'ondes à celle de corpuscules matériels de la même manière qu'en théorie de la lumière on avait été obligé d'associer aux ondes lumineuses de Fresnel les photons dont l'existence est prouvée par l'effet photoélectrique et l'effet Compton. De même, dans la théorie de la Matière on a été conduit à imaginer que les corpuscules de matière devaient être associés à des ondes. On est arrivé ainsi à interpréter les états quantifiés des électrons dans l'atome de Bohr et à expliquer pourquoi il existait des états quantifiés dans les atomes.

On a pu l'expliquer en montrant que ces états quantifiés étaient des états stationnaires où l'onde associée à l'électron avait la forme d'une onde stationnaire.

On a pu aussi prévoir, grâce à la Mécanique ondulatoire, la possibilité d'obtenir avec des faisceaux d'électrons, des phénomènes analogues aux interférences de la lumière. Et cette prévision, en opposition si flagrante avec la conception strictement corpusculaire qu'on se faisait auparavant des électrons et des particules matérielles s'est trouvée ensuite entièrement confirmée en 1927 par la découverte du phénomène de la diffraction des électrons par les cristaux. On a pu obtenir, en faisant cette diffraction, des phénomènes analogues à ceux qu'on obtient avec les rayons X. Ceci prouve que pour prévoir le mouvement des électrons il faut adjoindre aux électrons conçus comme des corpuscules des ondes qui sont susceptibles de se diffracter dans les cristaux.

Il est certain aujourd'hui que la dualité des ondes et des corpuscules découverte d'abord pour la lumière s'applique également à la matière. Toutes les particules matérielles ont donc, comme les photons, leurs ondes associées et l'ensemble de leurs propriétés ne peut être décrit exactement que par les procédés et les conceptions de la Mécanique ondulatoire.

Ainsi toute particule, que ce soit une particule de lumière, un photon ou une particule matérielle comme un électron ou un proton, est liée à un champ d'ondes et cette remarque est essentielle pour la suite.

Vous voyez (fig. 5) un phénomène d'interférence tout à fait analogue aux phénomènes des anneaux de Debye et Scherrer dans l'étude de diffraction des rayons X, mais il est produit par des électrons.

En 1925, à l'époque même où s'opérait cette grande transformation de nos idées sur les particules matérielles, les Physiciens étaient en plus amenés à leur attribuer une caractéristique nouvelle en introduisant l'idée de spin. Il avait été impossible, par les théories quantiques qui existaient jusqu'alors, d'expliquer les détails, la structure fine des spectres lumineux et X, ainsi que certains phénomènes magnétiques complexes tels que les effets Zeeman anormaux. Et ceci avait conduit à penser que l'électron devait être quelque chose de plus compliqué qu'on ne l'imaginait jusqu'alors. Il devait être nécessaire de connaître sa charge et sa masse, ce que l'on savait déjà, mais aussi, de lui attribuer une autre caractéristique : cette caractéristique nouvelle a été introduite par M. Uhlenbeck et Goudsmit 1925. On lui a donné le nom de « spin » qui veut dire rotation ; ce serait une sorte de rotation interne de l'électron sur lui-même qui lui donnerait un moment de rotation et un mouvement magnétique propres. Le développement de cette idée avait conduit à attribuer à l'électron un moment cinétique propre, égal à $\frac{h}{4\pi}$ c'est-à-dire au quotient de la constante de Planck par 4π , donc à la moitié de l'unité quantique du moment de rotation $\frac{h}{2\pi}$ qui intervient généralement sur les théories quantiques. De plus, on était amené à attribuer à l'électron un moment magnétique propre égal au magnéton de Bohr, qui est égal au produit $\frac{e h}{4\pi m c}$, m étant la masse de l'électron et de la vitesse de la lumière dans le vide



Fig. 5

Moyennant ces hypothèses, on arrivait à se rendre compte des anomalies spectroscopiques et magnétiques que les théories antérieures ne parvenaient pas à expliquer et dont je viens de vous parler. Depuis ce moment, il a été certain pour toute particule matérielle que le spin était une caractéristique aussi importante que la masse ou la charge électrique et nous avons maintenant des raisons de croire que le moment cinétique de toute particule, élémentaire ou non, est toujours, s'il n'est pas nul, un multiple entier du moment cinétique $\frac{h}{4\pi}$ de l'électron.

Pour l'électron, la théorie du spin a pu être précisée dans le cadre de la Mécanique ondulatoire par Dirac qui a développé une mécanique ondulatoire de l'électron avec spin. Je ne veux pas entrer dans l'étude de cette théorie qui joue un rôle de tout premier plan dans le développement contemporain de nos idées sur les particules matérielles. Je me contenterai simplement d'insister sur le fait que cette théorie a conduit à une prévision tout à fait remarquable dont l'expérience a apporté ensuite la vérification. Cette prévision, c'est la prévision de l'existence d'électrons positifs. En effet, les équations de la Mécanique ondulatoire de l'électron à spin de Dirac, présentent certaines particularités qui avaient d'abord paru constituer une grave difficulté pour cette théorie. Je ne vous explique pas quelles sont ces particularités qui sont d'ordre mathématique ; elles paraissent constituer une grande difficulté pour cette théorie et M. Dirac est parvenu à interpréter d'une façon très ingénieuse cette difficulté en indiquant qu'elle montrait qu'il était possible de trouver, dans la nature, des électrons positifs (que depuis on a appelés positons ou électrons positifs de même qu'on appelle parfois négatons les électrons négatifs ordinaires). Ces électrons positifs, positons, seraient les inverses électriques exacts des électrons, c'est-à-dire qu'ils auraient même masse, mais que leur charge électrique serait égale et de signe contraire, égale à $+4,8 \cdot 10^{-10}$ unités électrostatiques au lieu de $-4,8 \cdot 10^{-10}$ unités électrostatiques. D'après les idées de Dirac, un de ces électrons positifs pourrait, de temps en temps, apparaître en même temps qu'un électron négatif. Il pourrait y avoir formation simultanée dans certaines conditions d'une paire formée d'un électron positif et d'un électron négatif et de temps en temps aussi, un électron positif et un électron négatif seraient susceptibles de venir s'annihiler en compensant leurs charges électriques et disparaissant. Il pourrait donc y avoir des apparitions et disparitions de paires d'électrons positifs et négatifs, l'énergie nécessaire à la création de la paire, quand il y a création, devant

être naturellement empruntée à un agent extérieur tel qu'un photon de grande fréquence qui viendrait apporter son énergie et cette énergie se transformerait en quelque sorte en celle de deux électrons de signe contraire. Les électrons positifs paraissent beaucoup moins nombreux dans la nature que les électrons négatifs. C'est pourquoi on ne les avait pas connus jusqu'à ce moment et ils ont certainement une très grande tendance, quand ils traversent la matière, à s'unir à un électron négatif pour s'annihiler avec lui, de sorte qu'ils sont très instables et ils n'existent qu'en petit nombre et d'une façon temporaire dans la nature. De processus d'annihilation d'une paire électron-positon serait l'inverse du processus de création de cette paire. Dans cette manière de voir, on doit admettre qu'il y a à tout instant dans la nature un grand excès d'électrons négatifs ; par suite de cet excès les électrons positifs, qui sont créés par apparition de paires, doivent tendre à disparaître rapidement par annihilation de paires, l'univers tendant à revenir à une sorte d'état normal où il n'y aurait que des électrons négatifs. Dans ces processus d'apparition ou de disparition de paires électron-positon avec absorption ou émission concomitante d'énergie radiante, on peut dire qu'il y a matérialisation de l'énergie radiante dans le premier cas, et dématérialisation de l'énergie électronique dans le second.

Telles sont les prévisions auxquelles conduisait la théorie de l'électron à spin de Dirac et ces prévisions se sont trouvées depuis remarquablement vérifiées. Nous verrons qu'on a découvert expérimentalement l'existence des positons.

Avant de quitter ces généralités se rattachant à la Mécanique ondulatoire, je veux dire aussi quelques mots sur le concept nouveau d'énergie d'échange. En mécanique ondulatoire, si l'on considère deux particules de même nature qui exercent l'une sur l'autre une interaction (par exemple deux électrons qui agissent l'un sur l'autre par leur champ électrostatique Coulombien) il existe entre ces particules deux espèces d'énergie mutuelle : celle qui résulte, d'après les idées classiques, de l'existence même de l'interaction, puis une autre d'un type nouveau, l'énergie mutuelle d'échange qui dérive elle aussi de l'interaction, mais qui est liée à l'identité de nature des deux particules. Cette énergie d'échange dont nous ne pouvons nous faire aucune représentation avec les idées anciennes, joue certainement un très grand rôle dans la nature ; elle a été introduite par la Mécanique ondulatoire ; son existence est aujourd'hui tout à fait certaine et l'on a pu vérifier les conséquences de cette existence.

Supposons qu'on approche l'un de l'autre deux atomes d'hydrogène, il existera entre ces deux atomes une énergie mutuelle,

d'où résultera pour eux une tendance à s'unir avec formation d'une molécule d'hydrogène stable. Mais une fois la molécule constituée, elle n'aura aucune tendance à s'agréger un troisième atome d'hydrogène pour former une molécule triatomique : la valence de chacun des atomes d'hydrogène a été saturée par son union avec l'autre atome d'hydrogène. C'est ainsi que s'introduit en chimie l'idée de saturation des valences. Dans le cadre des idées classiques sur les forces et les énergies mutuelles, on ne pourrait aucunement interpréter cette saturation des valences, c'est-à-dire cette saturation des interactions qui donne lieu aux combinaisons chimiques. Au contraire, la notion d'énergie d'échange permet à la Mécanique ondulatoire d'expliquer le mécanisme des combinaisons chimiques et le caractère de saturabilité des valences. Nous verrons tout à l'heure que cette même notion, après avoir permis de reconnaître pour la première fois la nature exacte des énergies mutuelles qui assurent la stabilité des édifices moléculaires, a également permis, une fois transposée à une échelle beaucoup plus petite encore, d'entrevoir les raisons qui assurent la stabilité des noyaux d'atomes. Nous allons maintenant en arriver à des découvertes expérimentales extrêmement importantes et qui ont eu une grande influence sur le développement de la Physique du noyau contemporaine.

Depuis 1930, la Physique du noyau est entrée, en effet, dans une période de développement très rapide. De cet essor merveilleux de nos connaissances, je ne puis faire ici qu'un exposé succinct. Je dois laisser de côté tout l'immense développement des désintégrations provoquées ainsi que la découverte des radioéléments artificiels qui a achevé d'illustrer le nom de M. et Mme Joliot-Curie. Je ne veux en retenir, pour rester dans mon sujet, que ce qui a trait à l'existence de particules élémentaires jusqu'alors inconnues. A ce point de vue, un progrès considérable a été réalisé par la découverte successive dans les années 1931 à 1932 du neutron par M. Chadwick et Mme Joliot-Curie et de l'électron positif ou positon par Anderson et par MM. Blackett et Occhialini.

Le neutron est une particule relativement lourde comme le proton. Il paraît avoir à peu de chose près la même masse que le proton. Mais il est dénué de charge électrique. C'est en quelque sorte un proton neutre. Dépourvu de charge, on pourrait aussi dire qu'il constitue en somme le noyau d'ordre $N=0$ dans la série de Mendéléeff. Il aurait une charge $N=0$ et ce serait le premier noyau de la série de Mendéléeff, l'hydrogène étant le second. Dépourvu de charge le neutron n'exerce aucune ionisation et, pour cette raison, il est beaucoup plus difficile à étudier que les particules chargées. C'est seulement par les effets mécaniques qu'il produit lors de ses

chocs avec d'autres particules, qu'il peut donner lieu à des phénomènes visibles et c'est ainsi qu'on a pu réussir à mettre son existence en évidence.

Comme on constate que la désintégration de certains noyaux atomiques s'accompagne de l'expulsion de neutrons (ils ont été observés pour la première fois lors de la désintégration de l'atome de Glucinium soumis à un bombardement par Rayons α), on peut penser que le neutron doit jouer un rôle essentiel dans la constitution des noyaux et nous verrons plus loin quelle influence capitale cette idée a eue sur l'évolution de nos théories du noyau des atomes.

Parlons de l'électron positif ou positon. C'est une particule légère qui a même masse que l'électron avec une charge électrique égale ou de signe contraire. Les propriétés de ce nouveau corpuscule élémentaire ont été reconnues conformes dans leurs grandes lignes à ce qu'avait fait prévoir la théorie de Dirac, notamment en ce qui concerne la possibilité de création et d'annihilation de paires d'électrons. La création d'une paire électron-positon exigera l'action d'un quantum de radiation apportant au moins l'énergie nécessaire pour créer les deux particules, c'est-à-dire au moins la somme des énergies internes des deux particules quand elles sont au repos, somme égale à $2m c^2$ d'après le principe de l'inertie de l'énergie, c'est-à-dire d'une énergie qui correspond à 1.000.000 d'électrons-volts. Et ceci peut avoir lieu soit par l'émission d'un seul photon d'au moins 1.000.000 d'électrons-volts, soit de deux photons d'au moins 500.000 électrons-volts chacun, suivant que le processus fait ou non intervenir la présence d'un noyau. Toutes ces prévisions ont bien été vérifiées par les expériences de M. Jean Thibaud et Frédéric Joliot sur la disparition des électrons positifs dans la matière. A l'aide d'une remarquable méthode expérimentale, la méthode de la trochoïde, qui a rendu les plus grands services dans ce genre de recherches, M. Jean Thibaud a pu montrer que la charge spécifique du positon est, aux erreurs d'expériences près, égale à celle de l'électron changée de signe, ce qui établit bien la symétrie des deux particules légères d'électricité. L'électron positif, tout d'abord découvert dans les rayons cosmiques, peut aujourd'hui s'obtenir soit par des processus de matérialisation de paires à partir de rayons β , soit comme produit de la désintégration de certains radioéléments artificiels. Les radioéléments naturels n'émettent jamais de positons, mais seulement des rayons β formés d'électrons négatifs ; il n'en est pas de même pour les radioéléments artificiels parmi lesquels certains émettent des rayons β négatifs formés d'électrons et d'autres des rayons β positifs formés de positons.

La figure 6 est prise dans une chambre de détente à basse pression. C'est le choc d'un neutron contre un noyau d'azote. Et c'est ce genre de choc qui permet de déceler la présence du neutron et de trouver approximativement sa masse.

Nous allons en arriver aux nouvelles théories sur le noyau.

La découverte du neutron et du positon, en doublant le nombre des particules matérielles élémentaires que nous connaissions, a naturellement beaucoup élargi le champ des possibilités en ce qui concerne la structure des noyaux atomiques. Avant la découverte



Fig. 6

du neutron, nous l'avons vu, nos connaissances nous avaient conduit, en utilisant les deux sortes de particules élémentaires dont nous disposions, à considérer le noyau comme un assemblage généralement très stable de protons et d'électrons ; cette opinion paraissait confirmée par divers faits et notamment par l'aptitude qu'ont certains corps radioactifs naturels (les seuls connus à cette époque) à se désintégrer en émettant les électrons sous forme de rayons β .

Néanmoins l'hypothèse que les noyaux d'atomes sont formés de protons et d'électrons donnait lieu à un certain nombre de difficultés. En voici une des plus importantes. La Mécanique ondulatoire avait permis de mettre en relation les alternances d'intensité que l'on constate

dans les raies des spectres de bande émis par les molécules biatomiques d'un corps simple avec le nombre de constituants que renferme le noyau de l'atome de ce corps simple. En appliquant ces conclusions à la molécule d'Azote, on en déduisait que le noyau d'azote doit contenir un nombre pair de constituants. Or, l'atome d'azote a un nombre atomique égal à 7 et un poids atomique égal à 14. Il est aisé d'en conclure que, si le noyau d'azote est formé d'électrons et de protons, il doit contenir 14 protons et 7 électrons, ce qui fait un total de 21 constituants, nombre impair en contradiction avec la prévision précédente.

A la suite de la découverte du neutron, M. Heisenberg a proposé une conception nouvelle de la constitution des noyaux, conception qui est aujourd'hui généralement adoptée. Elle consiste à admettre

que le noyau d'atome est formé de protons et de neutrons, c'est-à-dire par des assemblages des deux types de particules lourdes. S'il en est ainsi, le noyau de nombre atomique N et de poids atomique P (entier) doit contenir N protons et $P-N$ neutrons, comme on le voit facilement. Avec ces hypothèses, on parvient à éviter les objections auxquelles se heurtait l'ancienne image des noyaux formés de protons et d'électrons. Par exemple, le noyau d'Azote de nombre atomique 7 et de poids atomique 14 doit maintenant être considéré comme formé de 7 protons et de 7 neutrons, ce qui fait un nombre total de 14 constituants, nombre pair en accord avec les prévisions de la Mécanique ondulatoire.

Mais avec l'hypothèse d'Heisenberg, comment peut-on expliquer que les radioéléments naturels et certains radioéléments artificiels émettent des électrons négatifs lors de leur désintégration, tandis que, par ailleurs, d'autres radioéléments artificiels émettent des positons ? A cette question, on donne aujourd'hui la réponse suivante : les neutrons peuvent se transformer en protons avec émission d'un électron positif. Ce sont de telles transformations qui s'opèrent dans les noyaux des radioéléments quand ils émettent des rayons β négatifs ou des rayons β positifs. Le proton et le neutron nous apparaissent donc maintenant comme deux états différents d'une même particule lourde qu'on pourrait appeler le « proton- neutron », ou mieux le « nucléon » puisqu'il est l'élément constitutif des noyaux, l'un des états étant chargé positivement et l'autre neutre. On voit ici reparaitre encore la dissymétrie caractéristique qui lie l'électricité positive à la masse. On pourrait bien imaginer l'existence d'un proton négatif ayant même masse que le proton ordinaire, avec une charge égale et de signe contraire ; il serait la particule inverse du proton ordinaire, comme l'électron positif est la particule inverse de l'électron ordinaire. Mais ce proton négatif, il paraît ne pas exister ou du moins, s'il existe, son apparition doit être bien exceptionnelle puisqu'on ne l'a encore jamais mis en évidence. Et, dans les interactions qui se jouent habituellement à l'intérieur des noyaux atomiques, c'est au neutron, et non à cet hypothétique proton négatif, que le proton positif est intimement relié. Ainsi, pour les particules lourdes, c'est l'électricité positive qui seule joue un rôle. On ne voit jamais une particule lourde de noyau ayant des masses de l'ordre de celle du proton posséder une charge négative, tandis qu'on connaît le proton qui possède une charge positive. Au contraire, pour les particules légères, l'électricité négative a un rôle prédominant, puisque l'électron négatif est stable, tandis que l'électron positif est instable et n'a qu'une existence transitoire. Nous retrouvons

la dissymétrie des deux électricités et l'affinité particulière de l'électricité positive pour la masse.

Ces conceptions nouvelles sur les relations du proton et du neutron conduisent à une conséquence qu'il est important de souligner. Dans la théorie quantique de l'émission et de l'absorption du rayonnement, on savait déjà depuis la théorie de Bohr qu'une particule électrisée légère, telle que l'électron, est susceptible d'émettre ou d'absorber un quantum de rayonnement, un photon, en changeant brusquement d'état. Et voici maintenant qu'on en arrivait à se dire : « de même qu'une particule légère peut en changeant d'état émettre ou absorber cette particule ultra-légère qu'est le photon, de même la particule lourde qu'est le nucléon doit pouvoir en changeant d'état émettre ou absorber ces particules légères que sont les électrons et les positons ». Cette idée si intéressante par sa forme même allait bientôt, nous le verrons, jouer un rôle très important dans nos théories du noyau.

Tandis que s'élaboraient ces conceptions nouvelles on sentait la nécessité de développer une théorie des interactions entre protons et neutrons susceptible de rendre compte de la structure et de la stabilité des édifices nucléaires. En 1932, M. Heisenberg a proposé d'admettre qu'il existe entre proton et neutron une énergie mutuelle appartenant au type général des énergies d'échange et correspondant au fait que, par un échange de charge, le proton peut se transformer en neutron et, simultanément, le neutron en proton. Il a montré qu'on peut ainsi rendre compte de la stabilité des édifices nucléaires et interpréter ce fait fondamental que le poids atomique, après avoir été le double du nombre atomique pour les éléments légers à partir de l'Hélium, tend à s'élever de plus en plus au-dessus du double du nombre atomique pour les éléments lourds quand on s'élève dans la suite de Mendéléeff (exemple : pour l'azote $N=7$, $A=14$, le poids atomique est le double du nombre atomique) mais pour les éléments lourds, le poids atomique devient sensiblement plus grand que le double du nombre atomique, ainsi, pour l'élément le plus lourd, l'Uranium, le poids atomique est de 238, alors que le nombre atomique est de 92, Pour les éléments légers, il est le double ; pour les éléments lourds, il est plus du double.

La théorie d'Heisenberg, en modifiant complètement nos idées sur la nature des constituants du noyau et sur le genre d'énergie mutuelle qui les lie les uns aux autres, a marqué un considérable progrès pour la physique nucléaire.

Mais, qui dit énergie mutuelle d'échange entre deux particules dit par là même existence d'une interaction entre ces deux particules. Si donc une énergie mutuelle d'échange existe entre un proton

et un neutron, elle doit avoir pour origine une interaction entre ces particules. Or, cette interaction ne peut pas être de nature électrique, puisque le neutron est électriquement neutre et, si l'on rejette l'hypothèse des actions à distance, elle doit correspondre à l'existence d'un « champ » différent du champ électromagnétique et appartenant à un type nouveau, conclusion dont nous allons voir tout l'intérêt.

Pour bien comprendre le rôle que joue le champ dans la transmission des interactions entre particules, il est intéressant de se reporter à la théorie des interactions entre particules chargées par l'intermédiaire du champ électromagnétique. Considérons deux particules électrisées en présence, elles exercent l'une sur l'autre l'action électrostatique de Coulomb et, de plus, si elles sont en mouvement et par suite équivalentes à des courants de convection, elles exercent aussi l'une sur l'autre des interactions du type électromagnétique de Laplace. Si l'on rejette l'idée d'actions à distance s'exerçant instantanément entre particules, on est amené à penser que ces interactions Coulombiennes et Laplaciennes ont lieu par l'intermédiaire du champ électromagnétique entourant les particules. Or, les récentes théories quantiques du champ électromagnétique qui tiennent compte de l'existence des photons, ont permis de préciser le mécanisme de cette transmission des interactions. Chacune des deux particules supposées en présence est en interaction directe avec le champ électromagnétique ambiant et est, par suite, susceptible d'émettre un photon lié à ce champ électromagnétique, photon que l'autre particule pourra absorber. En analysant ces échanges possibles d'énergie et de quantité de mouvement entre deux particules par l'intermédiaire de photons liés au champ électromagnétique ambiant, les théories actuelles du rayonnement montrent qu'elles sont équivalentes à l'existence entre les deux particules de forces des types classiques de Coulomb et de Laplace (auxquelles s'ajoutent encore des interactions entre les moments magnétiques des deux particules si elles ont un spin). Ainsi, les interactions classiques entre deux particules électrisées se trouvent ramenées aux émissions et absorptions possibles de photons par les deux particules.

Comment alors pouvons-nous essayer de représenter l'interaction entre un proton et un neutron que réclame la théorie des noyaux d'Heisenberg ? Par analogie, nous supposerons qu'elles ont lieu par l'intermédiaire d'un champ. Mais ce ne sera pas le champ électromagnétique ; ce devra être un champ d'un type nouveau. De même que le champ électromagnétique est lié au photon nous supposerons que notre nouveau champ est lié à des particules légères ; c'est en

échangeant ces particules légères que le neutron et le proton entreraient en interaction. En d'autres termes, cet échange de particules légères devra être équivalent à l'énergie d'échange prévue par M. Heisenberg comme devant exister entre proton et neutron. Un proton, nous l'avons vu, doit pouvoir se transformer en neutron avec émission d'un électron positif (ou absorption d'un électron négatif) et inversement un neutron doit pouvoir se transformer en proton avec émission d'un électron négatif (ou absorption d'un électron positif).

Il est donc naturel de penser, bien que nous verrons que cette idée se soit montrée fautive par la suite, que les électrons positifs et négatifs doivent jouer un rôle essentiel dans le nouveau champ que nous allons chercher à imaginer. Mais ici je dois d'abord ouvrir une parenthèse pour vous exposer les difficultés qui s'étaient présentées dans l'interprétation de ce que l'on appelle les spectres continus β des corps radioactifs, ce qui me permettra de vous présenter encore un nouveau corpuscule élémentaire de la physique dont l'existence n'est pas tout à fait certaine, qui s'appelle le neutrino.

Dans les transformations radioactives où il y a émission d'électrons négatifs provenant de la désintégration du noyau, ces électrons sont émis avec des énergies variables, de sorte que le corps radioactif qui se désintègre émet dans son ensemble un spectre continu de rayons β , c'est-à-dire, des rayons β ayant toutes les énergies jusqu'à une limite supérieure. Comme l'état de l'atome radioactif avant sa désintégration et celui de l'atome produit par la désintégration sont bien définis, le fait que les électrons émis au moment de la désintégration peuvent avoir une énergie quelconque a paru d'abord être en contradiction avec le principe de la conservation de l'énergie. De plus, on sait de façon certaine que le proton et le neutron ont, tout comme l'électron, un moment de rotation propre, un spin, qui est égal à $\frac{h}{2\pi}$. Comme dans tout changement d'état qui fait

passer le proton à l'état de neutron ou inversement, la variation de spin ne peut être que de 0 ou de 1 en valeur absolue. Or, l'électron ayant, lui aussi, un spin égal à $\frac{1}{2}$ il en résulte que l'émission d'un électron, lors du changement d'état d'un nucléon, ne pourrait pas avoir lieu avec conservation du moment cinétique. Nous arrivons donc à cette difficulté que les deux principes de la conservation de l'énergie et de la conservation du moment cinétique paraissent être en défaut dans ce phénomène de l'émission des rayons β continus. Pour éviter cette conclusion qui serait désastreuse, les Physiciens, dont l'ingéniosité n'est jamais prise de court, ont imaginé que l'émission des rayons β dans les désintégrations radioactives doit s'accompagner de l'émission d'une particule très légère et non

chargée qui, en raison de son caractère électriquement neutre et de sa légèreté, ne laisserait aucune trace de son passage à travers la matière et échapperait ainsi à l'observation : l'énergie disponible lors de la désintégration se partagerait d'une façon variable entre l'électron et le neutrino (c'est le nom que l'on donne à cette particule hypothétique) et l'énergie emportée par le neutrino échappant à l'observation, on aurait l'impression d'un défaut de conservation pour l'énergie. Cette hypothèse hardie se trouve fortement étayée par le fait que l'énergie maxima des rayons β , c'est-à-dire la limite supérieure d'énergie de leur spectre continu, paraît bien être égale à la différence d'énergie entre le noyau radioactif avant la transmutation et le noyau résultat de celle-ci. On comprend aisément, en effet, que dans le cas limite où le neutrino ne prend aucune énergie, l'électron β doit emporter la totalité de l'énergie rendue disponible par la transmutation du noyau et ce doit être là son énergie maximum. D'autre part, en attribuant au neutrino le même spin $\frac{1}{2}$ qu'à l'électron, on voit aisément que la conservation du moment cinétique peut être satisfaite. Les Physiciens ont été très heureux de pouvoir ainsi sauver les deux grands principes de conservation menacés et, bien que le neutrino se soit obstinément refusé à manifester son existence aux expérimentateurs, ils n'ont pas moins très généralement admis cette existence.

L'interprétation des émissions des spectres β avec intervention des neutrinos avait donc conduit à admettre que la transformation d'un proton en neutron et la transformation inverse s'accompagnent de l'émission d'une paire de particules, savoir un électron positif ou négatif et un neutrino. Il paraît alors naturel de penser que le champ par l'intermédiaire duquel s'opère entre proton et neutron l'interaction d'échange imaginée par Heisenberg est lié à ces paires de particules électron-neutrino, tout comme les interactions électromagnétiques usuelles entre particules chargées ont lieu par l'intermédiaire du champ électromagnétique lié aux photons. C'est cette idée très intéressante que M. Fermi a essayé de mettre en œuvre pour rendre compte des interactions d'Heisenberg en faisant correspondre au couple électron-neutrino le champ nucléaire de Fermi qui serait analogue au champ électromagnétique mais qui transporterait des charges électriques positives ou négatives, puisqu'il transporterait des paires électron-neutrino, un des composants de la paire ayant une charge. Si l'on applique alors à l'ensemble formé par un proton, un neutron et le champ nucléaire en question le même genre de raisonnements qui a permis de ramener les actions Coulombiennes et Laplaciennes entre deux charges électriques à des échanges d'énergie et de quantité de mouvement s'opérant par l'intermédiaire

des photons du champ électromagnétique ambiant, on pourra interpréter les actions s'exerçant entre proton et neutron à l'intérieur du noyau comme dues à des échanges d'énergie et de quantité de mouvement par l'intermédiaire du champ nucléaire de Fermi : par suite on pourra calculer les énergies d'échange qui, d'après Heisenberg, assurent la stabilité des noyaux. Telle est la conception très originale et d'un haut intérêt développée par M. Fermi, il y a quelques années.

Malheureusement, le développement de cette théorie du champ nucléaire de Fermi n'a pas conduit aux succès qu'on eût pu espérer. D'abord, la théorie de l'émission des spectres β à laquelle on est ainsi naturellement mené, n'est pas en bon accord avec l'expérience et, si certaines hypothèses nouvelles, (dues notamment à MM. Uhlenbeck et Konopinski) permettent d'éliminer en partie ce désaccord, ces hypothèses ont un caractère un peu artificiel et sont peu satisfaisantes. Ensuite, et ceci est plus grave encore, le calcul des forces d'interaction entre proton et neutron par la méthode de Fermi conduit à des énergies de liaison beaucoup plus faibles que celles qui sont effectivement nécessaires pour assurer la stabilité des noyaux. La raison en est que la valeur de certaines constantes a priori arbitraires, qui figurent d'après Fermi dans les formules d'interaction entre les particules lourdes et le champ nucléaire doit être choisie de façon à rendre compte de l'intensité des émissions β des corps radioactifs : comme ces émissions ont une probabilité relativement très petite, les valeurs en question doivent être choisies très faibles et, alors les interactions entre le proton et le neutron intervenant deux fois, l'interaction entre une particule lourde et le champ nucléaire se trouve être beaucoup plus petite que ne l'exige la stabilité des noyaux. En d'autres termes, la manière même dont la théorie de Fermi cherche à relier les interactions proton-neutron aux émissions β par le champ nucléaire électron-neutrino conduit à un ordre de grandeur inexact. La brillante tentative de M. Fermi paraissait ainsi aboutir à un échec, mais nous allons voir que l'idée fondamentale du champ nucléaire a pu être reprise par M. Yukawa sous une forme nouvelle, ce qui l'a conduit à sa remarquable prévision de l'électron lourd ou méson.

Je vais vous parler maintenant du champ de Yukawa et du méson.

En présence de l'échec de la théorie de Fermi, un physicien japonais, M. Yukawa a proposé, en 1935, d'admettre que l'interaction entre particules lourdes s'opérerait non pas par l'intermédiaire d'un champ nucléaire du type de Fermi, lié à des couples de particules de spin $\frac{1}{2}$ (couples électron-neutrino) mais bien par l'intermédiaire d'un

autre champ, le champ nucléaire de Yukawa, qui serait lié à des particules ayant même charge que les électrons mais possédant un spin égal à $\frac{1}{2}$ (en unité $\frac{h}{2\pi}$). Ces particules nouvelles seraient susceptibles d'être émises unité par unité, et non par paires, comme les particules du champ de Fermi. Développant les calculs, le savant japonais a annoncé, dès son premier mémoire de 1935, qu'en attribuant à ces particules alors inconnues une masse égale à environ 200 fois celle de l'électron, on trouverait pour les énergies d'échange proton-neutron des valeurs satisfaisantes correspondant à la stabilité réelle des noyaux.

Lors de sa publication, l'hypothèse de M. Yukawa avait pu paraître trop hardie et dépourvue de toute base sérieuse. Mais deux ans plus tard, l'étude approfondie des particules qui manifestent leur présence dans les rayons cosmiques est parvenue à déceler l'existence de particules inconnues jusque-là dont la charge électrique positive ou négative paraît sensiblement égale à celle des électrons de même signe, mais dont la masse est sûrement beaucoup plus grande que la masse électronique. Ces particules sont appelées « électrons lourds » ou « mésotons » ou mieux « mésons ». Leur masse n'est pas encore connue avec certitude, mais les expérimentateurs les plus qualifiés semblent d'accord pour admettre qu'elle a une valeur comprise entre 130 et 300 fois celle de l'électron ; la plus récente mesure de cette masse faite par M. Leprince-Ringuet et ses collaborateurs a donné une valeur égale à 240 ± 20 fois la masse de l'électron. On voit combien remarquablement se sont trouvées confirmées par l'expérience les vues prophétiques de M. Yukawa.

Maintenant, si nous admettons que la nouvelle particule ainsi découverte dans les rayons cosmiques est bien celle qui doit intervenir dans le champ nucléaire, nous sommes immédiatement conduits aux conclusions qui suivent. Dans le cas de la transformation d'un neutron en proton, le méson émis devra, pour que la conservation de l'électricité soit assurée, avoir la charge $-e$ de l'électron ; au point de vue de la charge, c'est donc un électron négatif lourd. Dans le cas de la transformation inverse d'un proton en neutron, le méson émis doit au contraire posséder la charge $+e$ de l'électron positif et être par suite analogue à un électron positif lourd. Mais si, du point de vue de leurs charges électriques, ces mésons chargés méritent bien le nom d'électrons lourds, par contre au point de vue de leur spin ce sont plutôt des photons lourds, puisqu'ils ont comme les photons un spin égal à $\frac{1}{2}$; les équations d'ondes qui représentent leurs propriétés dans le cadre de la Mécanique ondulatoire ont d'ailleurs une forme très analogue à celle des équations de Maxwell.

Aujourd'hui, la théorie des interactions entre proton et neutron par l'intermédiaire du champ nucléaire lié aux mésons paraît établie sur des bases assez solides et fournir des résultats assez satisfaisants en ce qui concerne la prévision des phénomènes nucléaires. On voit donc qu'à ce point de vue aussi, la découverte du méson a présenté une grande importance.

Il y a plus, Le développement des recherches expérimentales sur les forces qui s'exercent entre particules lourdes ont montré que les interactions proton-proton et neutron-neutron doivent être du même ordre de grandeur que les interactions proton-neutron. Pour expliquer ce fait dans la théorie du champ nucléaire, il est devenu nécessaire d'admettre qu'à côté des mésons chargés, positifs ou négatifs, il existe des mésons neutres, aussi appelés neutrettos, qui auraient même spin et probablement même masse et qui seraient dénués de charge électrique. Ces nouvelles particules neutres seraient ainsi des sortes de « photons lourds ». L'interaction entre deux protons ou entre deux neutrons s'opérerait par l'intermédiaire du champ lié à ces neutrettos sans s'accompagner d'aucun échange de charges. Jusqu'à présent, il n'existe aucune preuve expérimentale directe de l'existence du méson neutre ; mais une symétrie très satisfaisante pour l'esprit est établie par son introduction dans la théorie des champs nucléaires et nous porte à penser que ces mésons neutres existent réellement, la difficulté de les détecter pouvant précisément s'expliquer par leur neutralité électrique qui doit rendre très faibles les effets observables produits par leur passage au travers de la matière.

Comme on a pu s'en rendre compte, la théorie du champ nucléaire de Yukawa est sur de nombreux points très supérieure à celle du champ de Fermi. Néanmoins, tandis que la théorie de Fermi établissait un lien direct entre le champ nucléaire et l'émission des Rayons β (ou plus exactement, dans cette interprétation, des paires électron-neutrino) par les corps radioactifs, un tel lien direct n'existe plus dans la théorie de Yukawa. Mais il y a des raisons d'ordre expérimental qui suggèrent l'idée d'une instabilité des mésons chargés qui paraissent susceptibles de disparaître après avoir accompli un certain trajet dans la matière. On interprète ceci en admettant que les mésons sont susceptibles de se décomposer en une paire électron-neutrino. L'émission d'un méson par un noyau radioactif suivie de la décomposition de ce méson en une paire électron-neutrino serait alors équivalente à l'émission d'un rayonnement β et c'est ainsi qu'on interprète l'origine des spectres continus β dans la théorie du champ nucléaire de Yukawa d'une façon plus

indirecte que dans la théorie de Fermi, mais pourtant satisfaisante aussi.

En résumé, bien que les propriétés des mésons soient encore assez mal connues, car on ne peut pas, par exemple, affirmer avec certitude qu'il n'y ait pas plusieurs espèces de mésons de masses différentes, cependant leur existence ne paraît plus faire de doute et leur introduction dans la théorie du champ nucléaire, si remar-



FIG. 7

quablement pressentie avant leur découverte expérimentale par M. Yukawa, a fait accomplir à cette théorie un considérable progrès. Ce progrès a consisté essentiellement à remplacer le champ nucléaire de Fermi lié à des couples de particules de spin $\frac{1}{2}$, susceptibles d'apparaître et disparaître par paires, par le champ de Yukawa lié à des particules de spin 1, susceptibles d'apparaître ou de disparaître par unité.

Voici, figure 7, un faisceau de Rayons β du Rayon E déviés par un champ magnétique. C'est un exemple du spectre β continu.

Figure 8, il s'agit d'un cliché stéréoscopique de la trajectoire du méson.

C'est un cliché obtenu par M. Leprince-Ringuet dans lequel on observe un choc d'un méson contre un électron qui permet par l'application de relations mécaniques d'évaluer la masse du méson et de trouver qu'elle est 240 fois environ la masse de l'électron.

Pour terminer, nous allons récapituler les connaissances que nous possédons aujourd'hui sur les particules élémentaires de la matière (en laissant de côté le photon de charge et de masse nulles ou évanescentes et de spin 1, qui appartient à la lumière), en dressant le tableau suivant (fig. 9).

Les deux premières particules sur le tableau sont connues depuis longtemps, l'existence des deux suivantes est aujourd'hui certaine, celle des deux mésons chargés paraît bien établie. Il y a de fortes raisons théoriques qui plaident, nous l'avons vu, en faveur de l'existence du neutrino et du neutretto, mais l'expérience n'a pas jusqu'ici confirmé cette existence, ce qui pourrait s'expliquer par la neutralité électrique de ces corpuscules. Quant au proton négatif, que seules des raisons de symétrie ont conduit à imaginer, son existence est encore plus problématique.

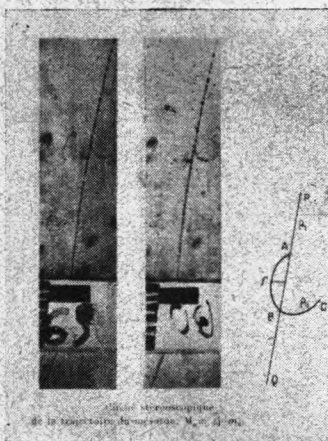


Fig. 8

Ajoutons encore que le moment magnétique propre de l'électron et du positon vaut un magnéton de Bohr à la valeur anormale 2,78 magnétons de Bohr. Enfin, celui du neutron serait de signe contraire et vaudrait environ 2 magnétons. Je n'insisterai pas ici sur l'origine possible de ces valeurs un peu imprévues. Pour les autres particules du tableau, le moment magnétique propre est inconnu.

En résumé, l'on peut voir par l'exposé que je viens de faire combien nos connaissances sur les particules élémentaires de la matière se sont étendues et combien leurs progrès ont transformé nos idées théoriques sur la constitution des noyaux et sur les champs qui en assurent la stabilité. Beaucoup de ces idées théoriques nouvelles devront à coup sûr être revisées et peut-être abandonnées, mais il est néanmoins certain que, grâce à l'admirable développement

de la Physique nucléaire depuis dix ans, un vaste champ de recherches tant expérimentales que théoriques s'ouvre aujourd'hui devant

	charge électrique	Masse au Repos	Spin en unité $\frac{h}{2\pi}$
Proton	$+e = +4.8 \cdot 10^{-10}$ u. e. s.	$M_p = 1.66 \cdot 10^{-24}$ gr.	$\frac{1}{2}$
Electron négatif	$-e = -4.8 \cdot 10^{-10}$ u. e. s.	$m_e = 0.9 \cdot 10^{-27}$ gr.	$\frac{1}{2}$
Electron positif	$+e$	$= \frac{1}{1836} M_p$	$\frac{1}{2}$
Neutron	0	$1.6627 \cdot 10^{-24}$ gr. $\approx M_p$	$\frac{1}{2}$
Mésoton positif	$+e$	250 m_e environ	1
Mésoton négatif	$-e$	"	1
Mésoton neutre	0	"	1
Neutrino ?	0	?	$\frac{1}{2}$
Proton négatif	$-e$	M_p	$\frac{1}{2}$

FIG.9

nous dans un domaine dont l'intérêt est à tous les points de vue primordial, puisque nous atteignons maintenant les plus intimes secrets de la Matière.