I.

Quelques considérations sur l'évolution des théories concernant la structure nucléaire

II.

Sur les forces agissant à l'intérieur des noyaux atomiques

par A. GLODEN

I.

Quelques considérations sur l'évolution des théories concernant la structure nucléaire.

Le passage des rayons alpha à travers la matière a révélé les caractères fondamentaux de la structure des atomes. On sait que les particules alpha peuvent traverser, sans subir une forte déviation, des pellicules métalliques de plusieurs centièmes de mm d'épaisseur ou des couches de gaz de plusieurs cm. Il est exclu qu'elles passent dans les interstices entre les atomes; elles traversent les atomes eux-mêmes.

Ce phénomène met en évidence la structure lacunaire de l'atome qui doit être formé de particules très petites par rapport à ses dimensions et qui doivent être séparées par des espaces relativement grands.

Les particules alpha ne traversent cependant pas toutes la matière sans subir aucune diffusion. Certaines d'entre elles subissent des déviations plus ou moins marquées. La preuve en a été fournie par la photographie des longues trajectoires des particules alpha dans la chambre à détente. Cette déviation s'explique par l'existence des forces électriques dont l'atome est le siège.

J. J. THOMSON avait réussi à fournir une première explication de ces déviations en supposant que l'atome consiste en une masse d'électricité positive uniformément répartie dans une sphère dont les dimensions correspondent à celles de l'atome et qui contient des électrons négatifs distribués suivant certaines lois.

Or, l'hypothèse de Thomson conduit à des conséquences en désaccord avec les résultats d'observation. Ainsi le nombre des particules déviées d'un certain angle diminue, à mesure que cet angle augmente, beaucoup plus lentement que la théorie ne l'exige. En outre, la théorie de Thomson suppose que les particules alpha ne subissent jamais qu'un faible changement de direction. Mais on sait aujourd'hui par l'observation photographique qu'il y a des déviations très fortes, dépassant même 90°. Elles révèlent l'existence d'un champ de force d'une grande

intensité telle qu'elle ne peut exister dans le modèle de Thomson.

Pour faire disparaître ces difficultés, RUTHERFORD a admis que la charge positive n'est pas répartie dans tout le volume de l'atome, mais dans un espace très petit alors que les électrons sont répartis autour du noyau positif dans une région relativement grande qui correspond au volume de l'atome.

Cette conception n'a pas été abandonnée depuis. Les grandes déviations s'expliquent aisément à l'aide du modèle d'atome de Rutherford: le noyau repousse toute particule qui tendrait à l'approcher de trop près.

Particules groupées à l'intérieur du noyau.

CHADWICK a d'abord déduit du phénomène de la diffusion des particules alpha une indication précieuse: *La charge positive* du noyau est représentée par le *nombre atomique* de l'élément.

Les premiers renseignements sur les éléments constitutifs du noyau furent donnés par la radioactivité et la désintégration artificielle des éléments; celle-ci avait été réalisée pour la première fois par Rutherford. Dans la radioactivité les produits matériels expulsés étaient des particules alpha, c.-à-d., des noyaux d'hélium, et des particules bêta, électrons qui viennent du noyau. Donc ces particules doivent préexister dans le noyau ou pouvoir être formées à partir de ses éléments constitutifs. Rutherford a montré que, sous l'action d'un bombardement par des particules alpha, certains corps émettent des protons identiques aux noyaux d'hydrogène. Les expériences de radioactivité naturelle et de désintégration artificielle conduisirent les physiciens à un premier schéma de structure nucléaire.

Soit A la masse atomique d'un élément, N son nombre atomique; son noyau renfermerait A protons et (A-N) électrons nucléaires. A l'intérieur du noyau les protons et les électrons intranucléaires auraient une tendance à se grouper de manière à former le nombre maximum de particules alpha.

Schéma A

Donc, nous aurons un noyau renfermant des *particules alpha ou hélions, des protons* et des *électrons*. Rappelons que la particule alpha comprend 4 protons et 2 électrons, et que la masse de l'électron est 1: 1847 de celle du proton.

L'avantage de ce modèle atomique est d'expliquer l'émission des particules alpha et bêta, donc la radioactivité natu-

relle, et aussi l'émission de protons sous l'influence d'un bombardement par des noyaux d'hélium, donc la désintégration artificielle.

D'autre part, cette hypothèse ne manquait pas de susciter de sérieuses difficultés. Déjà quand on considérait l'électron comme une charge électrique sphérique de dimension définie, on avait des difficultés à le loger à l'intérieur des noyaux, surtout pour les atomes lourds, ceci en raison des dimensions réduites des noyaux. L'application de la mécanique ondulatoire a encore accru ces difficultés. BOHR a conclu qu'il fallait renoncer à la considération d'électrons intranucléaires.

La découverte du neutron entraînait comme conséquence que cette particule devait aussi avoir une origine nucléaire. CHADWICK avait d'abord supposé que le neutron était une liaison proton + électron plus serrée que dans l'atome d'hydrogène. Mais la découverte de l'électron positif par ANDERSON, BLACKETT et OCCHIALINI a permis de considérer plutôt le proton comme particule complexe, le proton étant formé par la combinaison d'un neutron et d'un électron positif.

Par ces idées on est arrivé à la conception suivante de la structure nucléaire que nous représenterons par le schéma B.

Schéma B

Particules constitutives des noyaux atomiques: particules alpha, protons, neutrons, les protons étant au nombre de 0 ou 1.

D'autres auteurs, parmi lesquels nous citerons WALKE, GUEBEN, SHIMASAKI, ont fait intervenir encore des sous-unités nucléaires présentant une certaine stabilité. Walke p. ex. a considéré la combinaison neutron + proton comme sous-unité nucléaire, et son hypothèse est confirmée par la découverte de l'hydrogène lourd dont le noyau est justement formé par cette association qui est encore désignée sous le nom de deuton ou demi-hélion (parce que le deuton a la moitié de la masse et de la charge du noyau d'hélium).

Shimasaki a proposé en 1933 un modèle nucléaire comprenant des particules alpha, des neutrons, et, suivant les cas, des demi-hélions ou des combinaisons demi-hélion + neutron, cette dernière particule étant de masse 3 et de charge 1. Mais nous ne nous occuperons pas ici de l'examen de ces modèles nucléaires.

Passons à la conception la plus récente due à HEISENBERG que nous appellerons schéma C.

Schéma C

Particules constitutives des noyaux:
Seulement des protons et des neutrons.
Si A et N sont les nombres caractéristiques du noyau (même signification que plus haut), il renferme N protons + (A-N) neutrons.

Le noyau d'hydrogène fait exception en ce sens qu'il se réduit à un seul proton.

Le rapport $\frac{\text{nombre des neutrons}}{\text{nombre des protons}}$ joue un grand rôle dans cette théorie. Pour le noyau d'hydrogène et le noyau d'hélium, par exemple, il est égal à 1. A partir du lithium, le nombre des neutrons peut être supérieur à celui des protons, et il est encore égal à celui des protons pour un certain nombre d'éléments dont le nombre atomique est inférieur à 21. A partir de l'élément dont le numéro atomique est 21, le nombre des neutrons est toujours supérieur à celui des protons. Nous pouvons exprimer le rapport en question par l'expression $\frac{A-N}{N}$; on l'appelle *coefficient de stabilité* de l'atome. On admet que si $\frac{A-N}{N}$ devient supérieur à 1,5 (ou $\frac{A}{N} > 2{,}5$), la stabilité de l'atome n'est plus assurée et qu'il deviendrait radioactif. Ci-après nous donnons la valeur du rapport $\frac{A}{N}$ pour l'uranium, le plomb, le bismuth

$$U^{238}_{92} = 2{,}587, \quad Pb^{207}_{82} = 2{,}524, \quad Bi^{209}_{83} = 2{,}518.$$

On voit que la radioactivité, qui dépend du numéro atomique dépend plus étroitement du quotient $\frac{A}{N}$.

L'isotopie s'explique dans cette théorie par ce que, pour une même valeur du nombre atomique, on peut avoir diverses valeurs pour le nombre des neutrons. Pour le lithium p. ex. on connaît 2 isotopes de masse 6 et 7; le noyau du 1er se compose de 3 protons et d'autant de neutrons, celui du 2^{d} comprend 3 protons et 4 neutrons.

Comment expliquer ici l'émission de particules alpha? Il suffit d'admettre que, quand un proton et un neutron sont en présence, ils ont une tendance à former un deuton avec une émission d'énergie équivalente à la perte de masse. De même quand deux deutons sont en présence, ils tendent à former une particule alpha avec une nouvelle émission d'énergie.

Il s'agit enfin d'expliquer l'émission d'électrons dans la radioactivité naturelle et la radioactivité artificielle. L'émission des électrons négatifs est provoquée par la transformation d'un neutron en un proton, celle des électrons positifs (ou positrons) résulte de la transformation d'un proton en un neutron.

G. GAMOW considère les protons et les neutrons, seuls constituants des édifices nucléaires dans l'hypothèse de Heisenberg, comme des états quantiques différents d'une seule particule lourde fondamentale.

Application au noyau du bismuth.

Le lecteur désireux d'entrer dans les détails de la question pourra se rendre compte, d'après l'exemple du bismuth, des divers aspects de la structure nucléaire suivant les schémas A, B ou C. Voici les schémas de structure étudiés:

Schéma A: hélions, protons, électrons;
B: hélions, proton, neutrons;
C: protons, neutrons.

Nous représenterons suivant l'habitude un hélion par la lettre grecque α, un proton par π, un électron (négatif) par ε et un neutron par ω.

Le noyau de bismuth a pour masse atomique 209, pour nombre atomique 83 (on ne lui connaît aucun isotope). On le représente par $^{209}_{83}Bi$.

Schéma A: 52α, 1π, 22ε.

Voici comment on peut obtenir ce résultat, Nous supposons que le noyau renferme autant de particules alpha que possible (voir plus haut). Il ne peut donc renfermer qu'un proton (de masse 1). Il reste pour la masse $209 - 1 = 208$; $208 : 4$ donne 52 hélions. Ceux-ci ont une charge positive de $2 \cdot 52 = 104$, il faut y ajouter celle du proton, la charge positive totale serait ainsi de $104 + 1 = 105$. Comme la charge positive du noyau n'est que de 83, il faut supposer logés dans le noyau $105 - 83 = 22$ électrons (appelés nucléaires). Rappelons que le nombre 83 qui indique la charge positive du noyau est également celui des électrons gravitant autour du noyau; ceux-ci sont appelés électrons périphériques ou planétaires.

Schéma B: 41α, 1π, 44ω.

Voici comment nous établissons cette formule de constitution. La théorie nous enseigne que le nombre des protons est 0 ou 1; dans ce cas il est nécessairement 1. Soit x le nombre des particules alpha, y celui des neutrons. Nous aurons deux équations en x et y fournies par la conservation des masses et des charges:

$$\begin{cases} 4x + 1 + y = 209 \\ 2x + 1 = 83 \end{cases}$$

d'où $x = 41$

$y = 44$.

Schéma C: 83π, 126ω.

C'est de beaucoup le plus simple.
Nous allons réunir les résultats dans le tableau suivant.

Formules de constitution du noyau du bismuth.

	particules alpha	protons	électrons	neutrons
Schéma A. .	52	1	22	
B. .	41	1		44
C. .		83		126

II.

Sur les forces agissant à l'intérieur des noyaux atomiques.

Nous nous proposons de dresser dans cet article la liste des forces intervenant entre les particules constitutives des noyaux atomiques. Cette question est liée à celle de la structure nucléaire elle-même; elle se rattache également à la stabilité des édifices atomiques.

Structure nucléaire.

Relativement à la structure nucléaire, nous nous bornerons à donner la théorie la plus récemment admise, savoir que les noyaux sont formés uniquement de protons et de neutrons ce qui revient à dire qu'à l'intérieur des noyaux il n'existe pas d'électrons. Si nous caractérisons un noyau quelconque par le symbole ${}^{p}_{q}X$, (X ne représentant pas ici nécessairement le xénon) où la lettre p indique la masse atomique et la lettre q le nombre atomique, c'est-à-dire, le nombre de charges positives portées par le noyau, nous avons

$$ {}^{p}_{q}X = y \cdot {}^{1}_{1}H + z \cdot {}^{1}_{0}n, $$

${}^{1}_{1}H$ désignant le noyau d'hydrogène appelé proton (masse = 1, charge = 1) et ${}^{1}_{0}n$ le neutron (masse=1, charge = 0). p et q sont supposés connus, y et z sont à déterminer. Si nous exprimons la conservation des masses et des charges, nous trouvons les équations

$$ \begin{cases} y + z = p; \\ y \quad\; = q; \end{cases} $$

donc

$$ z = p - q. $$

Nous pouvons donc écrire, pour un noyau quelconque

$$ {}^{p}_{q}X = q \cdot {}^{1}_{1}H + (p-q) \cdot {}^{1}_{0}n $$

Il est entendu que, pour écrire la première des équations ci-dessus, nous n'avons pas tenu compte du défaut de masse (mass defect).

Voici quelques exemples:

Noyau d'hélium: ${}^{4}_{2}\mathrm{He} = 2 \cdot {}^{1}_{1}\mathrm{H} + 2 \cdot {}^{1}_{0}\mathrm{n}$

Noyaux de cuivre (isotopes) $\begin{cases} {}^{63}_{29}\mathrm{Cu} = 29 \cdot {}^{1}_{1}\mathrm{H} + 34 \cdot {}^{1}_{0}\mathrm{n} \\ {}^{65}_{29}\mathrm{Cu} = 29 \cdot {}^{1}_{1}\mathrm{H} + 36 \cdot {}^{1}_{0}\mathrm{n} \end{cases}$

Nous avons ainsi, pour chaque élément ou pour les isotopes d'un élément, une représentation univoque à l'aide de protons et de neutrons.

Les formules de constitution autrefois admises pour les noyaux (protons, neutrons, électrons, hélions) étaient bien plus compliquées. *) Ajoutons que c'est Heisenberg qui a montré que, chaque fois qu'on considère l'électron comme existant dans la structure du noyau, on est amené à des contradictions.

Nature des forces intra-nucléaires.

Admettons sans autre discussion cette structure du noyau. Nous n'avons par conséquent plus à considérer les électrons appelés nucléaires, mais on admet toujours l'existence des électrons périphériques qui gravitent autour du noyau de l'atome. Hâtons-nous d'ajouter que les électrons dits nucléaires étaient considérés comme étant absolument identiques aux électrons périphériques. Le sujet étant limité comme l'indique le titre de notre article, nous ne ferons pas l'étude des forces reliant les électrons périphériques à la partie centrale de l'atome.

La question de la stabilité du noyau est résolue par l'examen des forces agissant entre protons et neutrons. Pour la clarté de l'exposé, nous les diviserons en 3 groupes:

a) forces d'origine *électrique* ou *magnétique;*
b) forces d'origine *gravitationnelle;*
c) forces d'origine purement *quantistique.*

Il convient de remarquer tout de suite que le bilan des forces ne peut être dressé que d'une façon imparfaite à l'heure actuelle, car les lois de l'électrodynamique quantifiée ne sont pas connues, malgré les efforts considérables faits dans cette voie par Heisenberg, Pauli et Dirac. Il ne nous est pas possible d'écrire les équations rigoureuses d'un problème dans lequel figurent plusieurs protons (ou plusieurs électrons). Signalons que l'interaction entre le proton et le neutron telle qu'elle ré-

*) Cf. p. ex. «Der Bau der Atomkerne und die Radioaktivität», von G. Gamow, Leningrad, übersetzt von Houtermans.

Voir aussi notre article «Quelques considérations sur l'évolution des théories concernant la structure nucléaire».

sulte de l'expression non-relativiste de Kemmer-Yukawa a rendu de grands services.

Nous donnerons maintenant des indications sur chacune des forces mentionnées ci-dessus.

a) *Forces électriques et magnétiques.*

Quant aux forces électriques, ce sont les forces coulombiennes de répulsion qui se manifestent entre les protons. A la force électrique il faut ajouter la force magnétique. Le champ électrique et le champ magnétique sont reliés entre eux par les équations de Maxwell.

b) *Forces de gravitation.*

Dès qu'on aborde la question de la stabilité du noyau, il est clair que la considération de forces s'exerçant entre des particules portant des charges de même nom ne saurait suffire; il faut en outre admettre des forces agissant entre neutrons et protons. Abstraction faite des actions exercées entre particules chargées et particules non chargées qui doivent être considérées ici comme étant très faibles si non négligeables, ce sont les forces de gravitation qui prennent de l'importance. Des recherches expérimentales effectuées directement sur des protons ont démontré l'existence de forces attractives entre des particules ayant des charges électriques de même signe.

Pour les petites distances, la loi de Newton présente des anomalies. On admet qu'elle cesse d'être applicable quand les distances sont de l'ordre du millième de micron = 10^{-15} m. Deux molécules extrêmement rapprochées se repoussent. Si la distance diminue encore, la répulsion, après avoir été forte, devient faible, ou peut-être nulle pour des valeurs de la distance inférieures à 10^{-9} m. On admet que la loi d'attraction, en raison inverse du carré de la distance, se retrouve, rigoureuse, à l'intérieur même des édifices atomiques. Cette hypothèse s'accorde avec ce qui précède; nous savons en effet que le diamètre de l'atome est de l'ordre de 10^{-10} m, donc du dix-millième de micron.

Si l'on calcule d'après les lois de Coulomb et de Newton la répulsion électrostatique ou l'attraction s'exerçant entre deux protons, on trouve que la force électrique a une valeur beaucoup plus grande que la force gravitationnelle. Il semble donc que ces deux forces ne suffisent pas à expliquer la stabilité du noyau.

c) *Forces d'origine quantistique.*

A ces forces d'origine purement électrique ou purement massique la nouvelle mécanique quantique en a ajouté une autre qui semble jouer un grand rôle. Cette force est d'origine purement quantistique et sa conception découle essentiellement des relations d'indétermination de Heisenberg. Celles-ci expriment l'impossibilité de déterminer, avec le degré d'approximation qu'on veut, les conditions initiales du mouvement d'une particule. Algébriquement, le principe de Heisenberg s'exprime par

$$m \cdot \triangle x \cdot \triangle v \geqslant h,$$

où x désigne une coordonnée spatiale et v la projection de la vitesse sur l'axe des x. h est la constante de Planck. Il en résulte que les erreurs faites dans la mesure de la coordonnée spatiale et de la vitesse sont liées de façon que, si l'une d'elles devient plus petite, l'autre devient plus grande. Cette indétermination est dans la nature des choses elles-mêmes et subsiste quel que soit le degré de perfectionnement de nos procédés de mesure.

Une conséquence du principe de Heisenberg est l'impossibilité de décrire mathématiquement la trajectoire d'une particule; tout au plus pourrons-nous indiquer la portion de volume dans laquelle elle va poursuivre son mouvement. Dans un ensemble de particules égales en mouvement, on ne peut pas suivre chacune sur sa trajectoire individuelle; on ne peut pas individualiser, discerner toutes les particules. Par conséquent, on ne saurait considérer comme distincts deux états d'un même ensemble de particules égales qui diffèrent seulement par l'échange de deux particules égales, puisque nous n'avons aucune possibilité, aucun moyen de constater cet échange.

Nous sommes maintenant en mesure de comprendre ce qu'on appelle *force quantistique* ou *force d'échange*. Soient deux électrons négatifs attirés par des centres distincts. Impossible de dire qu'un de ces électrons appartient à un centre, et le second à l'autre. Il est donc possible, en raison de l'égalité absolue et de l'indiscernabilité des deux particules, qu'il se produise un échange entre elles.

Comment cet échange peut-il se faire? C'est par une interaction des deux centres qui, bien entendu, exercent déjà l'un sur l'autre, avec les électrons qui les entourent, une action réciproque due à l'effet des forces coulombiennes d'attraction et de répulsion.

L'origine de la nouvelle interaction réside donc dans les forces coulombiennes, mais celle-ci ne se déclenche qu'en tant que les

deux électrons peuvent être considérés comme ayant échangé leurs positions par rapport aux deux noyaux.

On se rend aisément compte du fait que la grandeur de cette interaction dépend de la vitesse de l'échange, donc aussi de la distance des deux noyaux et de leur liaison plus ou moins intime.

L'existence de la force d'échange ne pouvait être prévue dans l'ancienne mécanique. Elle a un caractère spécifiquement quantistique.

Les conséquences déduites de l'existence de cette force nouvelle sont nombreuses. Nous mentionnerons seulement que c'est grâce aux forces d'échange qu'on a réussi à expliquer les liaisons homopolaires et, par suite, la stabilité de toutes les molécules chimiques n'ayant pas leurs atomes constituants à l'état d'ions, et il y a longtemps que les chimistes recherchaient la solution de cet important problème.

Les idées sommaires que nous avons développées ici concernant les forces nucléaires ont été complétées par la théorie de Fermi pour expliquer l'émission des rayons bêta et en soumettant le champ électromagnétique à la quantisation.