# Quelques aspects de la physique atomique moderne.

par **Alph. WILLEMS.**

> L'atome ne doit pas être considéré comme un produit de l'imagination scientifique. C'est maintenant un objet d'expérimentation, dont les divers aspects, poids, dimension, structure, énergie se sont peu à peu dégagés.
>
> Jean Thibaud: Vie et transmutations des atomes.

Il y a quarante ans, on considérait l'atome comme une particule très simple, insécable et irréductible. Depuis, un grand nombre de faits expérimentaux (émission cathodique, radioactivité, effet photoélectrique, spectres lumineux et spectres Rœntgen, etc.) ont profondément modifié nos idées sur la constitution de la matière et nous ont conduits à voir dans l'atome un monde nouveau, un microcosme, aussi étonnant dans sa complexité que dans la régularité de son mécanisme.

*L'atome de Bohr.*

D'après les théories modernes établies surtout par *Rutherford* (1911), *Niels Bohr* (1913) et *Sommerfeld* (1915), l'atome est un système solaire en miniature. A la périphérie gravitent, animés de très grandes vitesses, des électrons planétaires sur des orbites quantifiées (c'est-à-dire obéissant aux lois de la mécanique des quanta) de forme circulaire (Bohr) ou elliptique (Sommerfeld). Le nombre des électrons planétaires est bien déterminé et varie d'un élément à l'autre. Au centre de l'atome se trouve le noyau infiniment petit, dans lequel se trouve concentrée toute la masse. Il est chargé positivement et cette charge positive, différente suivant les divers éléments, détermine le nombre des électrons planétaires. Dans leur état normal, en effet, les atomes sont des systèmes électriquement neutres. L'atome d'hydrogène, le plus simple de tous, est formé d'un seul électron tournant autour d'un noyau portant une seule charge positive élémentaire. On a réservé à ce noyau d'hydrogène le nom de «proton» et la masse du proton, prise comme unité, est environ 1850 fois plus grande que celle de l'électron. Son diamètre, pourtant, est 2000 fois plus petit que celui de ce dernier. Le diamètre approximatif de l'atmosphère électronique appartenant à un atome est de $10^{-8}$ cm. et le diamètre du noyau est de l'ordre de $10^{-12}$ cm., donc environ 10 000 fois plus petit que l'enveloppe électronique.

Pour les atomes des éléments plus lourds, le noyau porte une charge plus élevée. Le nombre des charges élémentaires

positives que porte le noyau est indiqué pour chaque élément par le nombre Z qui est appelé le nombre atomique ou le numéro d'ordre: c'est le rang qu'occupe cet élément dans la classification périodique de Mendeléieff. Pour le fer p. ex. Z=26, c'est-à-dire le fer occupe dans le système périodique le numéro 26; l'atome de fer se compose d'un noyau portant 26 charges positives élémentaires et autour de ce noyau gravitent 26 électrons satellites.

*Les électrons satellites.*

Aux électrons satellites sont dues les propriétés électriques, chimiques et mécaniques, autres que la masse, par lesquelles l'atome se révèle à l'expérimentateur extérieur. Un atome entre en relation avec d'autres atomes par ses électrons extérieurs. C'est donc la couche périphérique d'électrons qui détermine surtout les propriétés chimiques. Ces propriétés présentent, comme l'ont démontré Mendeléieff, Loth. Meyer et bien d'autres, un caractère nettement périodique, ce qui a conduit à admettre que la répartition des électrons dans les atomes présente elle aussi un caractère périodique. Les atomes reprennent les mêmes propriétés chimiques ou, du moins, des propriétés chimiques analogues, lorsque le nombre des électrons qui forment l'enveloppe électronique augmente de huit.

Les électrons sont donc répartis sur des couches successives, sur différentes orbites, chacune caractérisée par le travail à dépenser pour en extraire un électron. Ce travail détermine le niveau énergétique sur lequel se trouve l'électron. Ces niveaux énergétiques formant des couches bien définies pour chaque espèce d'atomes, sont désignés à partir du noyau par les lettres K, L, M, N, etc. Sur chacune de ces couches, les électrons sont disposés d'une façon aussi symétrique que possible. A partir de certains éléments, les couches internes sont identiques pour tous les autres éléments plus lourds. Le passage d'un électron à un niveau énergétique plus grand ou plus petit est accompagné d'une absorption resp. d'un dégagement d'énergie qui, dans ce dernier cas, se présente sous forme de radiation électromagnétique.

*Les isotopes.*

Le nombre et la répartition des électrons satellites dépendent uniquement de la charge, non de la masse du noyau. Deux éléments peuvent avoir un même nombre d'électrons planétaires et des noyaux de masses différentes. Les propriétés chimiques seront identiques et les deux corps ont le même numéro atomique, occupent donc la même place dans la classification de Mendeléieff: ce sont des isotopes. L'analyse

chimique isole sous le nom de chlore p. ex. un mélange d'atomes qui ont des poids atomiques voisins, mais non identiques. Ces divers atomes de chlore ont la même distribution des électrons satellites, ce qui leur confère les mêmes propriétés chimiques. Leurs noyaux, pourtant, ne sont pas les mêmes; les uns sont plus lourds que les autres: les uns ont une masse de 35 et les autres de 37. C'est un fait généralement reconnu aujourd'hui que les éléments de la chimie classique ne sont pas des éléments réels. Ils se composent plutôt d'un mélange d'atomes chimiquement identiques mais de masses différentes, ce sont des mélanges d'isotopes, des pléiades (Fajans).

Pour distinguer les isotopes et pour rappeler en même temps les deux caractéristiques principales de l'atome, on se sert du symbole chimique usuel et l'on écrit en bas, en indice, le numéro atomique et en haut le nombre massique. Les deux isotopes du chlore, p. ex. sont représentés par $^{35}_{17}Cl$ et $^{37}_{17}Cl$, le fer par $^{56}_{26}Fe$ etc.

*Critique de la théorie de Bohr.*

La conception de l'atome selon Bohr, très simple mais quand même très féconde, n'a pu répondre à toutes les exigences théoriques. Parmi les nombreuses objections qu'on fait valoir contre cette manière de voir relevons les faits suivants: L'existence de trajectoires si rigoureusement déterminées, cet ordre si absolu, ne s'expliquait pas par lui-même, ne possédait pas, sous cette forme, de logique en soi. D'autre part, il y a ce fait, qui se trouve en contradiction avec les principes les mieux établis, selon lequel les électrons n'émettraient aucune énergie dans leur gravitation, excepté lorsqu'ils passeraient d'une orbite à l'autre. Ensuite la théorie de Bohr ne permettait pas l'explication complète des spectres des éléments plus lourds.

Ces difficultés ont été aplanies surtout par les travaux d'Erwin *Schrœdinger* et de Werner *Heisenberg* qui ont appliqué à l'enveloppe électronique de l'atome la théorie de la mécanique ondulatoire énoncée par Louis *de Broglie*.

*Théorie de la mécanique ondulatoire.*

D'après cette théorie, il faut admettre pour la matière le même dualisme que pour le rayonnement électromagnétique, dont le rayonnement lumineux n'est qu'un cas particulier. En effet, l'effet photoélectrique d'une part et la production de rayons X d'autre part nous obligent à admettre que la lumière, à côté de ses propriétés ondulatoires, possède également des propriétés corpusculaires. Ces deux manifestations, apparemment contradictoires, doivent être considérées comme deux

aspects complémentaires d'une même réalité. Dans le cas de la lumière, ondes et corpuscules sont des apparences étroitement liées l'une à l'autre.

Et, s'il en est ainsi de la lumière, il faut se demander avec L. de Broglie, si un dualisme pareil n'existe pas aussi pour la matière, si ce dualisme ondes-corpuscules ne constitue pas un caractère général de tous les phénomènes naturels? Complétant ainsi l'œuvre d'Einstein qui attribue une masse définie au quantum de radiation lumineuse, L. de Broglie associe une certaine onde, un certain phénomène périodique au déplacement de tout grain matériel. Tous les corpuscules matériels, les électrons p. ex., sont donc accompagnés d'une onde et le corpuscule et l'onde étant étroitement associés, le mouvement du corpuscule et la propagation de l'onde ne sont pas indépendants. Le calcul théorique montre que la longueur de l'onde associée est inversement proportionnelle à la quantité de mouvement (= produit de la masse par la vitesse) du corpuscule.

*Schrœdinger et Heisenberg.*

*Schrœdinger* a appliqué cette théorie, vérifiée par les magnifiques expériences de *Davisson* et *Germer,* à l'atome et a établi une équation différentielle qui a donné des résultats inespérés. L'électron n'existe plus comme corpuscule proprement dit, les charges négatives ne sont plus localisées; il y a des charges diffuses (verschmierte Ladungen). La charge est répartie autour du noyau sous forme d'un champ électrique qui se trouve dans un état ondulatoire. Des phénomènes d'interférences se produisent et en certains endroits il y a condensation des charges électriques.

*Heisenberg* est allé plus loin encore. Il établit le fameux principe d'incertitude. Il démontre l'impossibilité d'une conception exacte de l'atome en se basant sur l'infinie petitesse de celui-ci qui le soustrait à toute représentation. Tout ce que l'expérience peut nous apprendre, c'est que la position et la vitesse du corpuscule sont comprises entre certaines limites; autrement dit, il y a telle probabilité pour que le corpuscule ait telle position et telle autre pour qu'il ait telle vitesse.

Pratiquement les deux théories conduisent à des résultats analogues et permettent d'expliquer d'une façon logique les faits non expliqués ou difficiles à expliquer jusqu'à présent. *Sommerfeld* caractérise ces deux théories en écrivant: Wir rechnen mit Schrœdinger; aber wir denken mit Heisenberg.

*Le noyau atomique.*

Si la connaissance de la «partie extérieure» de l'atome est actuellement satisfaisante, celle de la «partie interne», c'est-à-

dire du noyau, était restée jusqu'à ces dernières années un mystère, sauf ce qui concernait sa charge et sa masse. Le noyau atomique est le siège de la presque totalité de la masse de l'atome et il est chargé positivement. Cette charge positive est égale à Z fois (Z = numéro d'ordre de cet atome) celle du proton.. Dès le début, il était clair que le noyau n'était pas simple, mais qu'il constituait un édifice complexe. Cette idée était imposée, en quelque sorte, par l'interprétation des phénomènes radioactifs.

La radioactivité est une propriété caractéristique de certains éléments lourds, propriété qui se manifeste par l'émission spontanée de rayons comprenant trois groupes: 1° Les rayons $\alpha$ sont constitués par des particules matérielles de masse 4 et portent deux charges positives élémentaires. Ce sont des noyaux d'hélium. 2° Les rayons $\beta$ sont formés par des électrons négatifs animés d'une grande vitesse. 3° Les rayons $\gamma$ ne transportent aucune charge électrique; ce sont des vibrations électromagnétiques de très hautes fréquences. On les considère aujourd'hui comme de véritables corpuscules de lumière ou photons. L'explication des phénomènes radioactifs a été donnée par *Rutherford* et *Soddy*. Les éléments radioactifs sont spontanément instables, c'est-à-dire, de temps en temps, le noyau d'un de leurs atomes fait explosion en se transformant en un atome généralement plus léger. Cette explosion est accompagnée de l'émission d'atomes ou plutôt de noyaux d'hélium, d'électrons et de photons.

Les particules $\alpha$ et $\beta$, provenant du noyau, doivent être considérés comme des constituants réguliers des noyaux des atomes radioactifs. En généralisant ce fait, tout en admettant pour le noyau d'hélium la même complexité que pour les noyaux des autres atomes, on est arrivé à cette conclusion que les noyaux atomiques sont formés par la juxtaposition de deux éléments fondamentaux: le proton et l'électron. Le nombre de protons dont est formé un atome est supposé égal au chiffre indiquant le poids atomique, parce que les protons seuls contribuent à la masse de l'atome. Ce nombre dépasse de Z unités celui des électrons qui entrent dans la constitution du noyau et qui, pour cette raison, sont appelés électrons intranucléaires. Le nombre total des électrons, électrons satellites et électrons intranucléaires, est égal à celui des protons. Les électrons intranucléaires ont pour rôle d'unir les protons et leur existence à l'intérieur du noyau permet d'expliquer l'émission de rayons $\beta$ par les substances radioactives.

Rien n'empêche de supposer qu'une même charge positive du noyau peut être réalisée par deux ou plusieurs combinai-

sons différentes de protons et d'électrons, puisque la seule différence du nombre de ces deux sortes de constituants détermine la charge. On arrive ainsi à concevoir la possibilité d'atomes possédant le même nombre atomique Z et par suite le même nombre et le même arrangement des électrons satellites, c'est-à-dire d'éléments identiques par rapport à leurs propriétés chimiques, mais de poids atomiques différents, d'éléments que nous avons appelés isotopes.

*Transmutation des atomes par Rutherford.*

L'existence de protons dans le noyau fut nettement mise en évidence par la célèbre découverte de *Rutherford* (1919) appelée désintégration artificielle de l'atome. En soumettant à l'action des rayons α, eux-mêmes émis par des corps radioactifs, un certain nombre d'éléments légers, notamment l'azote, Rutherford est parvenu à briser ces atomes en en faisant sortir des particules dont il établit l'identité avec des protons. Des résultats analogues ont été obtenus avec presque tous les éléments légers.

L'appareil qui permet d'observer et d'étudier ces transmutations artificielles est la chambre à brouillard ou l'appareil à détente de *Wilson*. Il est constitué par une cage en verre, fermée à sa partie supérieure par une glace plane. Dans ce cylindre en verre, continué par un tube métallique, se déplace un piston dans un joint étanche. A l'intérieur de la chambre en verre se trouve de l'air débarrassé de poussière, mais saturé de vapeur d'eau. Si, par abaissement du piston, on produit une brusque détente, une partie de la vapeur d'eau devrait se condenser sous forme de fines gouttelettes. Mais cette condensation ne peut se produire qu'en présence de germes de condensation existant dans l'enceinte sous forme de poussière ou de centres électrisés (ions), sur lesquels s'amorcera la formation des gouttelettes. Si donc, au moment de la détente, un corpuscule chargé traverse l'air, il produit des ions sur son passage et ces ions fonctionnent comme d'importants centres de condensation. Le corpuscule chargé marquera sa trajectoire spatiale dans le gaz, si compliquée soit-elle, par un chapelet de fines gouttelettes que l'on observera comme une traînée de brouillard. On peut la rendre mieux visible et même la photographier par un éclairement approprié se produisant au moment favorable. La chambre à détente de Wilson permet ainsi de suivre les trajectoires des particules chargées, leur déviation due au choc avec d'autres particules, leur capture par un autre noyau, les trajectoires des produits résultant de la désintégration etc. Elle est donc l'instrument le plus important dans l'étude de l'atomistique.

La découverte de *Rutherford* marque le point de départ d'un grand nombre de recherches et d'expériences sur la transmutation des éléments, expériences qui ont conduit à une véritable chimie du noyau.

*Découverte du neutron et du positon.*

Au cours de ces recherches deux découvertes ont été faites qui ont apporté une révision de la théorie sur la constitution du noyau. En effet, l'hypothèse de la présence d'électrons intranucléaires se heurtait à de grandes difficultés. D'une part, l'électron était beaucoup plus volumineux que le noyau même, ce qui ne manquait pas d'être gênant. D'autre part, il était difficile d'imaginer une barrière de potentiel suffisante pour maintenir l'électron dans le noyau.

Les deux découvertes dont il s'agit sont la découverte du neutron et celle du positon.

En 1930, les physiciens *Bothe et Becker* ont trouvé que des éléments légers, en particulier le béryllium, appelé encore glucinium, émettent, lors du bombardement par les rayons $\alpha$, une radiation très pénétrante, radiation qui, tout d'abord, fut considérée par eux comme un rayonnement $\gamma$. Peu après, M. et Mme. *Joliot-Curie* démontrèrent la nature corpusculaire de cette radiation. Les corpuscules qui constituent ce rayonnement ont une masse sensiblement égale à celle du proton, mais ils sont dépourvus de charge, n'ont donc pas d'action ionisante sur les gaz qu'ils traversent. Pour cette raison, ils ne peuvent être décelés dans la chambre de Wilson que par le fait qu'ils transmettent leur énergie cinétique lors de leurs collisions avec d'autres noyaux ordinaires p. ex. avec des noyaux d'azote. Les noyaux chargés produits ainsi ont de nouveau la propriété d'ionisation normale par laquelle ils peuvent être détectés. Il y a dans la chambre de Wilson des trajectoires qui naissent, en apparence sans raison, au milieu de la chambre à détente. (Fig. 1.) *Chadwick* proposa, en 1932, de donner à ces corpuscules neutres le nom de «neutrons». Le neutron est représenté par ${}^{1}_{0}\mathrm{n}$.

Une découverte non moins importante fut faite en 1932 par *Anderson* (Californie). En étudiant les effets de désintégration produits par les rayons cosmiques, Anderson et, plus tard, *Blackett* et *Occhialini* découvrirent, en se servant de la méthode de Wilson, une particule inconnue jusqu'alors, dont la masse était égale à celle de l'électron ($\frac{1}{1850}$ de la masse atomique de l'hydrogène). Sa charge électrique, égale aussi en grandeur à celle de l'électron, était de signe contraire. Ces électrons positifs ont été appelés positons, par opposition aux électrons

négatifs qui, depuis, portent le nom de négatons. L'existence des positions avait été annoncée, avant leur découverte, par *Dirac* qui s'appuyait sur des considérations théoriques. On représente les négatons par la notation «$e^-$» et les positons par «$e^+$».

*Transmutations d'éléments.*

Depuis, l'existence de ces particules nouvelles a été prouvée par les transmutations d'un grand nombre d'éléments. Les modalités des transformations provoquées, limitées, il y a quelques années encore, aux seuls éléments légers, se sont prodigieusement étendues et précisées dans ces derniers temps. Aussi peut-on se servir, comme agents capables de modifier le type atomique, non seulement de particules $\alpha$, comme l'avait fait Rutherford, mais de protons accélérés, de neutrons, de rayons cosmiques etc., pourvu que tous ces agents aient une énergie suffisamment élevée. On explique le mécanisme de la transmutation en admettant la capture de la particule incidente par le noyau bombardé qui alors fait explosion avec expulsion d'une ou de plusieurs autres particules.

Le fait que des particules chargées positivement peuvent s'approcher du noyau et même y pénétrer sans subir la répulsion électrostatique de celui-ci et sans qu'on ait besoin de donner aux projectiles des énergies potentielles trop élevées, est expliqué aujourd'hui d'après les lois de la mécanique ondulatoire. Les neutrons, ne portant pas de charge, sont, d'après les recherches de *Fermi,* des projectiles de choix. Ils peuvent atteindre les noyaux, même les mieux défendus, «sans être arrêtés par des barrières de potentiel» (de Broglie). (Fig. 2 et 3.) Comme source de neutrons, Fermi se sert d'un tube scellé renfermant de la poudre de glucinium mélangée à des quantités d'émanation de radium. Une telle source peut émettre près d'un million de neutrons par seconde dont les énergies individuelles se chiffrent par millions d'électrons-volts. Dans toutes ces mesures on se sert d'une unité particulière, l'électron-volt (eV), c'est l'énergie cinétique qu'un électron est susceptible d'acquérir dans un champ électrostatique d'un volt. Sa valeur est égale à $1.6 \times 10^{-12}$ erg. Pratiquement on l'exprime en millions d'électrons-volts (MeV), valant $1.6 \times 10^{6}$ erg.

Les résultats des expériences de désintégration se traduisent par les formules, analogues aux formules chimiques classiques, mais qui rempliraient de joie les anciens alchimistes, car elles montrent que la transmutation des éléments les uns dans les autres a cessé d'être une chimère pour devenir une réalité.

C'et ainsi qu'on exprime l'expérience fondamentale de Rutherford par l'équation suivante:

$$^{14}_{7}N + ^{4}_{1}He \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H \nearrow$$

Un noyau d'azote est frappé par une particule $\alpha$ ($^{4}_{2}$ He), les deux se réunissent pour un instant et font explosion immédiatement après avec expulsion d'un proton. Le noyau résiduel est un noyau de numéro atomique 8, c'est-à-dire d'oxygène, de masse atomique 17. C'est un isotope de l'oxygène qui existe réellement.

De même la formation de neutrons par Fermi est donnée par la réaction suivante:

$$^{9}_{4}Be + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{12}_{6}C + ^{1}_{0}n \nearrow$$

*Cockroft* et *Walton*, en bombardant du lithium par des protons accélérés ,ont constaté l'émission de particules $\alpha$ très rapides. On peut donc écrire:

$$^{7}_{3}Li + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He \nearrow + ^{4}_{2}He \nearrow$$

Un bombardement avec des neutrons est représenté par l'équation suivante:

$$^{14}_{7}N + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{11}_{5}B + ^{4}_{2}He \nearrow$$

il y a formation de bore et de particules $\alpha$. (cf. Fig. 2.)

Un même élément peut donc être désintégré par différents agents (voir ci-dessus N). On a même observé que le même élément peut réagir différemment sous l'influence du même agent, suivant le mode d'excitation qu'il lui fait subir. Tel est le cas de l'aluminium qui, bombardé par des corpuscules $\alpha$, donne une transmutation avec émission de protons rapides (Rutherford):

$$^{27}_{13}Al + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{30}_{14}Si + ^{1}_{1}H \nearrow$$

*Radioactivité artificielle.*

Les mêmes atomes d'aluminium soumis aux mêmes rayons $\alpha$ peuvent réagir encore d'une autre façon. Au lieu de donner immédiatement un noyau de silicium stable, il peut y avoir formation d'un atome qui, au bout d'un certain temps, se désintègre de nouveau, tout comme un élément radioactif, et le corps qui résulte de cette dernière désintégration est seulement stable.

Ce fait a été observé pour la première fois, en 1934, par Irène et Frédéric *Joliot-Curie* et leur a valu l'attribution du prix Nobel de Chimie en 1935. Le phénomène connu sous le nom de radioactivité artificielle est décrit par ses auteurs de la façon suivante (Joliot-Curie: Radioactivité artificielle. p. 7.):

«On irradie une feuille d'aluminium avec les rayons $\alpha$ d'une forte source de polonium pendant quelques minutes. Quand on retire la feuille, elle possède une activité qui décroît de moitié en trois minutes. Le rayonnement émis est constitué par des électrons positifs. La décroissance de l'activité suit une loi exponentielle. Nous sommes donc en présence de véritables radioéléments nouveaux et d'un nouveau type de radioactivité.»

Cette découverte importante peut être exprimée par les réactions suivantes:

$$^{27}_{13}\mathrm{Al} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow ^{30}_{15}\mathrm{P} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \nearrow$$

Le corps formé $^{30}_{15}\mathrm{P}$, isotope du phosphore, est instable. Il se désintègre de nouveau après quelque temps avec émission de positons d'après le schéma

$$^{30}_{15}\mathrm{P} \rightarrow ^{30}_{14}\mathrm{Si} + \mathrm{e}^{+} \nearrow$$

La formation du phosphore radioactif, appelé aujourd'hui radiophosphore, a pu être démontrée chimiquement.

Depuis, en se servant des agents de désintégration ordinaires, on a radioactivé un grand nombre d'éléments.

Actuellement, on en connaît une quarantaine, dont nous citons: le radiophosphore, le radioazote, le radiofluor, le radiosodium etc. Leur nombre est donc égal à celui des radioéléments naturels et on envisage déjà leur utilisation pratique. *)

*Energétique nucléaire.*

Toutes les relations indiquées dans ce qui précède sont incomplètes. Elles décrivent quantitativement la réaction sans tenir compte du bilan énergétique de la transformation. En effet, dans les désintégrations atomiques, il s'agit de réactions nucléaires qui sont analogues aux réactions chimiques exothermiques. Tout comme en thermochimie, il faut donc inscrire en regard de la relation les quantités d'énergie libérée qui se chiffrent par millions d'électron-volts (MeV).

Pour comprendre l'origine de l'énergie dégagée dans une réaction nucléaire, il faut se rappeler le principe de l'équivalence entre la matière et l'énergie. Cette identité profonde a été formulée par *Einstein* comme conséquence de la théorie de la rélativité. Elle peut être résumée comme suit: Matière et énergie sont deux aspects différents d'une même réalité. La masse d'un corps augmente, dans de minimes proportions il est vrai, si on l'échauffe ou si on lui communique de l'énergie sous une autre forme. Elle diminue, au contraire, si on lui enlève de l'énergie. Donc, tout système subissant une variation de l'éner-

*) Voir Alph. Willems: Les isotopes et leurs applications en médecine et en biologie, **Bulletins mensuels de la S. N. L.** 1938, p. 41.

gie interne subit nécessairement, en même temps, une variation de masse. Cette variation de masse (d m) est égale au quotient de la variation d'énergie (d E) par le carré de la vitesse de la lumière (c = 300 000 Km/sec.):

$$dm = \frac{dE}{c^2}$$

La masse est de l'énergie potentielle et l'énergie est de la masse potentielle. La matière peut être considérée comme une source d'énergie. Un corpuscule de masse m libérera par sa destruction complète une énergie E égale à $mc^2$.

Considérons sous ce point de vue les réactions de désintégration. On constate qu'en général la somme des masses des particules résultant de la réaction est inférieure à celle des corpuscules ou atomes existant avant la transformation. Cette diminution de masse est la source des dégagements énergétiques observés. En effet, lors des réactions nucléaires des énergies considérables apparaissent, tantôt sous forme d'énergie cinétique communiquée aux fragments résultant de l'explosion, tantôt sous forme de rayonnement $\gamma$. Prenons à titre d'exemple la transformation du lithium par des protons accélérés (Cockroft et Walton)

$$^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} \nearrow + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \nearrow$$

$$7.017 + 1.008 = 4.0034 + 4.0034$$

Le total des masses réagissantes est de 7.017+1.008=8.025. (Les énergies cinétiques des protons accélérés par quelques centaines de milliers de volts apparaîtront seulement dans les décimales suivantes et sont, pour cette raison, négligées.) Il y a formation de deux particules $\alpha$ ($^{4}_{2}$He) dont la masse totale s'élève à 8.007. La diminution de masse est donc de 0.018, ce qui équivaut à une énergie de 17.1 MeV. Par des mesures très précises, *Oliphant* a trouvé l'énergie cinétique des deux particules $\alpha$ formées égale à 17.1 MeV. Cette détermination constitue donc une preuve expérimentale de l'équivalence entre la matière et l'énergie.

*Matérialisation de l'énergie et annihilation de la matière.*

Un autre fait prouve encore le principe d'équivalence de la masse et de l'énergie, c'est la découverte de M. et M^me^ ***Joliot-Curie*** (1934), connue sous le nom de «Matérialisation de l'énergie». Ce fait a été confirmé par les recherches de *L. Meitner, Philipp, Anderson, Neddermeyer, Chadwick* et d'autres savants encore. On fait arriver un rayonnement $\gamma$, qui est composé, comme nous l'avons dit plus haut, par des photons de grandes énergies (supérieure à 10 MeV.), sur une lame mince de plomb

qui se trouve dans une chambre de Wilson et on observera la naissance d'une «paire» d'électrons, c'est-à-dire d'un positon et d'un négaton. Un champ magnétique, convenablement choisi, sépare, d'après le signe de leurs charges, les deux électrons ainsi créés. (Fig. 4) Le rayonnement électromagnétique, le photon, s'est donc matérialisé en deux corpuscules électriques, de signes opposés.

Le processus inverse, c'est-à-dire la dématérialisation ou l'annihilation de la matière, a été bien démontré par les belles expériences de MM. *Thibaud* et *Joliot*. Il s'agit de la conversion en radiation de la masse entière d'un corpuscule. Le plus souvent ce phénomène se produit lorsqu'un positon pénètre dans la matière. Il s'y précipite sur un négaton et les deux charges identiques s'annihilent mutuellement. De cette fusion naissent deux photons opposés, chacun d'une énergie de 500 000 eV., c'est-à-dire un rayonnement qui satisfait au principe de l'identité entre matière et énergie.

Ce dernier fait nous explique aussi la rareté relative des positons qui ne peuvent exister que dans un milieu dépourvu de charges négatives.

*Neutron et proton.*

Une autre question s'y rattache directement: celle de savoir si le proton et le neutron sont, tous les deux, des entités simples ou si, au contraire, l'un des deux est complexe. On peut, en effet, envisager le neutron comme étant formé d'un proton et d'un négaton. Dans ce cas le proton serait simple. Ou encore, on peut considérer le proton comme complexe, c'est-à-dire issu de la réunion d'un neutron et d'un positon. Des déterminations très précises des masses respectives ont donné pour le neutron la masse de 1.01 et pour le proton 1.0078. Par conséquent la capture d'un positon par un neutron s'accompagnerait d'une grande perte de masse, c'est-à-dire d'énergie potentielle. Le produit qui résulterait de cette combinaison devrait être très stable et tel est réellement le cas pour le proton. Avec *Bainbridge* il faut donc regarder le neutron comme l'élément primordial et le proton est à considérer comme complexe. Il existe, comme dit *Jean Perrin,* une très forte attraction entre le positon et le neutron, mais on n'a aucun indice d'une attraction entre négaton et neutron. Le proton négatif n'a pas encore été signalé. D'autre part, il paraît même raisonnable d'admettre que le positon et le négaton, symétriques par nature, jouent vis-à-vis du neutron des rôles exactement opposés. Le neutron repousse le négaton exactement comme il attire le positon.

De toutes ces recherches il faut conclure qu'il y a à distinguer trois sortes de corpuscules élémentaires: le neutron et les deux sortes d'électrons, le positon et le négaton. *) le proton est plutôt une unité secondaire, résultant de l'union intime d'un neutron et d'un positon. Etant très stable, il peut exister au sein du noyau, d'où il pourra être expulsé, tel quel, lors d'une transmutation.

*Constituants du noyau.*

Ces constatations faites, il faut se rallier à la conception de *Heisenberg,* suivant laquelle le noyau atomique est formé de deux constituants fondamentaux: le proton et le neutron. La charge du noyau est uniquement déterminée par le nombre des protons et sa masse est due aux protons et aux neutrons. Les protons exercent les uns sur les autres la répulsion de Coulomb, mais entre neutrons et protons existent des forces attractives très grandes. L'interaction proton-neutron est la principale cause de la stabilité des atomes. A courte distance cette interaction est très vive. Les deux particules sont sollicitées l'une vers l'autre par une force analogue à l'affinité qui unit deux atomes dans une molécule chimique. L'origine de cette force se trouve dans la convoitise du neutron pour le positon du proton.

La stabilité du noyau atomique dépend surtout du rapport entre le nombre des protons et des neutrons. Dans les éléments légers: hélium, azote, oxygène etc. jusqu'au calcium, le rapport neutrons/protons est égal à l'unité, c'est-à-dire le nombre des protons est égal à celui des neutrons. Ce sont tous des éléments stables. Dans les éléments plus lourds, le nombre des neutrons dépasse plus ou moins sensiblement celui des protons et de ce fait leur stabilité diminue. Lorsqu'il y a trois neutrons sur deux protons, l'édifice nucléaire devient très instable, c'est le cas des éléments radioactifs.

Les noyaux des différents isotopes d'un même élément renferment le même nombre de protons, mais un nombre différent de neutrons. L'abondance relative, dans la nature, de tel ou tel isotope d'un élément ordinaire semble liée à sa stabilité, ce qui veut dire à la grandeur du rapport protons/neutrons. Les éléments les plus stables sont de beaucoup les plus répandus.

*) Pour échapper à certaines constatations expérimentales, dangereuses pour le principe de la conservation de l'énergie, P a u l i et, plus tard, F e r m i admettent l'existence d'une nouvelle particule qu'on appelle «neutrino». Cette particule ne possède pas de charge et a une masse infinitésimale des milliers de fois inférieure à celle du neutron. Sa détection paraît, pour le moment du moins, échapper à nos moyens d'investigation.

Lors de la transmutation d'un élément, il s'agit de faire varier le nombre de ses protons. Les particules $\alpha$ formées par la réunion de deux protons et de deux neutrons sont des corpuscules particulièremet stables; car leur formation s'accompagne d'un grand dégagement d'énergie causé par une grande perte de matière. Ces particules peuvent donc être considérées comme des unités secondaires dans la constitution du noyau et sont rejetées comme telles lors de la désintégration radioactive. Le noyau ne renfermant pas de négatons, le corpuscule $\beta$ est formé au moment même où il est émis, ce qui nous semble compréhensible, puisque nous avons vu que négatons et positons apparaissent à la suite de la matérialisation du rayonnement et vice-versa.

* * *

Notre image de la constitution de l'atome évoluera certainement encore dans l'avenir. Mais dès à présent nous possédons des méthodes qui permettent de transformer les éléments les uns dans les autres et de préparer des éléments nouveaux inconnus jusqu'à ces derniers temps. Lors de ces transmutations, des quantités énormes d'énergie sont libérées. La destruction ou l'annihilation d'un gr. de substance quelconque fournit, d'après la formule $E = mc^2$, $9 \times 10^{20}$ erg, ce qui équivaut à 20 000 millions de grandes calories ou à 25 milliers de Kwh. Ce sont là des sources d'énergie bien plus grandes que celles employées en technique ordinaire. Mais arrivera-t-on jamais à les utiliser ou saura-t-on un jour diriger et contrôler la destruction de la matière et remplacer, de cette façon, les réactions chimiques par des réactions nucléaires? Nous n'osons y répondre. Mais rappelons cette phrase de *Debye* (Wege der modernen Forschung in der Physik):

Galvani a joué jadis avec des cuisses de grenouille et de ce jeu sont nées l'électrochimie et l'électrotechnique d'aujourd'hui.

*Publications consultées*

et dont la lecture est à recommander à ceux qui voudraient approfondir le sujet:

**Boutaric:** La physique moderne et l'électron (1935)
**L. de Broglie:** Matière et Lumière (1937)
**P. Debye:** Kernphysik (1935)
**P. Debye:** Wege der modernen Forschung in der Physik (1938)
**L. Hopf:** Materie und Strahlung (1936)
**Joliot-Curie:** L'électron positif (1935)
**Joliot-Curie:** La radioactivité artificielle (1935)

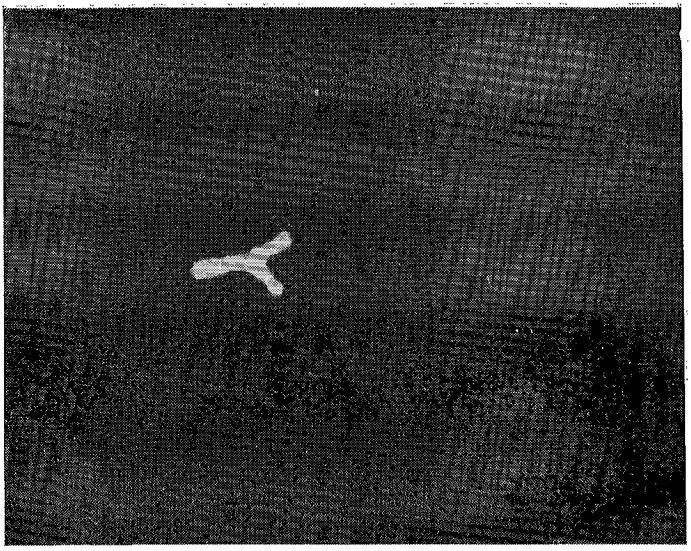


Fig. 1. Collision d'un noyau d'azote, mis en mouvement par un neutron, avec un deuxième noyau d'azote.

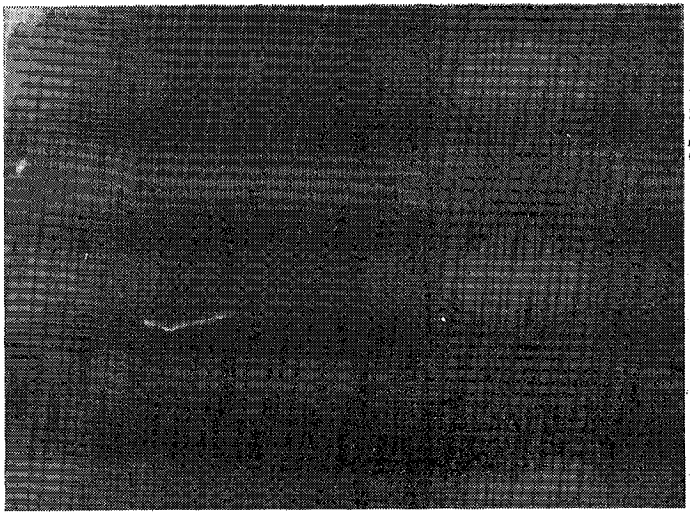


Fig. 2. Désintégration de l'azote par l'action des neutrons.

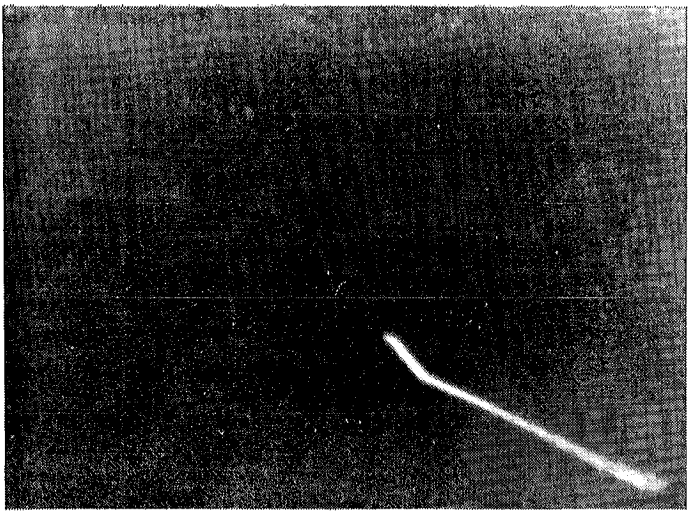
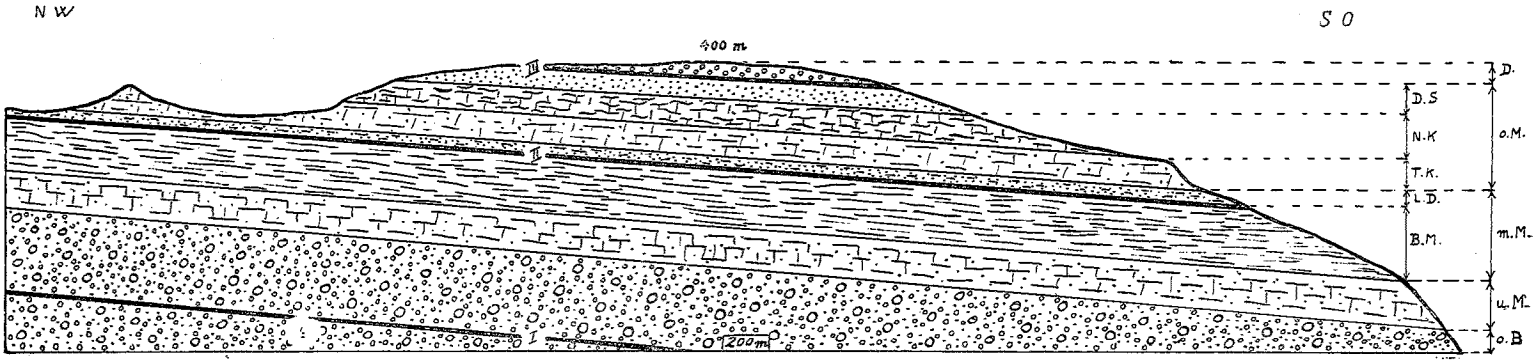


Fig. 3. Désintégration de l'oxygène par l'action des neutrons.
(Fig. 1—3. Meitner et Philipp, Naturwissenschaften 1932)



Fig. 4. Matérialisation de l'énergie: création d'une „paire" d'électrons dans une lame de plomb à partir d'un rayon $\gamma$ pénétrant en a dans une chambre de Wilson.
(C. D. Anderson)




**Profil durch den Herrenberg: NW—SO.**

o. B. = oberer Bundsandstein; u. M. = unterer Muschelkalk; m. M. = mittlerer Muschelkalk; o. M. = oberer Muschelkalk; D = Diluvium; B. M. = Bunte Mergel; L. D. = Lingula-Dolomit; T. K. = Trochitenkalk; N. K. = Nodosuskalk; D. S. = Dolomitische Schichten. I, II, III = Quellenhorizonte.

**J. Perrin:** Les atomes (1936)
**J. Perrin:** Grains de Matière et de Lumière (I—IV) (1935)
**Rassenfosse et Guében:** Des Alchimistes aux briseurs d'atomes (1936)
**J. Thibaud:** Vie et transmutations des atomes (1937)
**Th. Wulf S. J.:** Bausteine der Körperwelt (1935).

# Der Herrenberg.

## (Geologische Skizze)

Es soll nicht die Aufgabe dieser Zeilen sein, eine geologische Monographie des Herrenberges zu geben. Vielmehr soll angestrebt werden, den Teilnehmern der Exkursion vom 8. Mai letzthin in aller Kürze die Ergebnisse zusammenzufassen, die vielleicht zu sehr zerstreut dargeboten werden mußten.

Der Herrenberg liegt ganz im Gebiet der Trias und diese setzt sich zusammen aus Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper. Wegen der Nähe der Devonküste zeigt seine Ausbildung eine Annäherung an die Uferfacies, die jedoch erst deutlich westlich von Ettelbrück beginnt. Von der Ausbildung der Trias in sonstigen Gebieten ist die seinige daher ziemlich stark verschieden. Was die Tektonik des Herrenberges anbelangt, so soll erwähnt sein, daß dessen sämtliche Schichten nach Südost neigen.

Seinen geologischen Aufbau zeigt der Herrenberg am deutlichsten, wenn man ihn von der Südseite (Nélcheswé) zu ersteigen beginnt. Dies hat darüber hinaus den Vorteil, daß man so die Schichtenreihe in ihrer zeitlichen Folge, von den älteren zu den jüngeren, antrifft.

Bereits beim Beginn unsers Aufstiegs im Nélcheswé, dicht hinter dem letzten Hause linkerseits, sehen wir den Buntsandstein anstehen. Es handelt sich um den *oberen Buntsandstein,* der allein im Gebiete vorhanden ist. Während er in Lothringen noch einige Hundert Meter Mächtigkeit aufweist, ist er am Fuße des Herrenbergs nur mehr in seinen obersten Schichten (Voltziensandstein) vertreten. Er besteht vorwiegend aus braunrotem Sandstein, der erbsen- bis wallnußgroße Kieselsteine einschliesst: ist also *konglomeratisch* ausgebildet. Dadurch unterscheidet er sich vom Voltziensandstein anderer Gebiete (Born, Hinkel), in denen die Konglomerate nur eine unwesentliche Rolle spielen. Der Herrenberg birgt drei Quellenhorizonte, wovon der erste bereits im Buntsandstein liegt und dessen Wasser den Bach des Bamertales speist.

Den Rest des Herrenbergs bildet der *Muschelkalk,* der sich seinerseits gliedert in unteren, mittleren und oberen Muschelkalk. Die Grenze des oberen Buntsandsteins zum *unteren*