Sur les éléments radioactifs créés artificiellement.

Dans l'histoire des découvertes qui ont contribué à accroître nos connaissances sur la structure intime de la matière, il y a trois dates importantes à retenir:

1° la découverte de la radioactivité par Becquerel en 1896;

2° la découverte de la transmutation artificielle par Rutherford en 1919, et

3° la production artificielle d'éléments radioactifs par M^me^ Curie et F. Joliot en 1934.

Chacune de ces découvertes a eu une influence retentissante sur les théories concernant la constitution de la matière. Nous allons l'indiquer brièvement pour les 2 premières, puis donner des développements plus amples pour la troisième.

La découverte des éléments radioactifs a écarté d'une façon définitive la conception de l'atome comme particule de matière inaltérable; elle a conduit les physiciens à considérer dans l'atome une région superficielle et une région interne appelée le noyau. La région superficielle est occupée par les électrons appelés périphériques; la structure du noyau est bien plus complexe et son étude constitue un chapitre à part de la physique, appelé la physique du noyau. La somme algébrique des charges positives et des charges négatives du noyau s'appelle le nombre atomique, dont les résultats concordants de plusieurs recherches d'un ordre différent aussi bien théoriques qu'expérimentales, telles que la dispersion des particules α, les spectres de rayons X des éléments, etc., ont démontré la signification importante. Pour caractériser un élément, il ne suffit plus d'indiquer sa *masse atomique;* il faut en plus donner son *nombre atomique.* On écrit par exemple $^{27}_{13}Al$, les deux nombres caractéristiques figurant à gauche de Al; celui d'en haut indique la masse atomique (ou le nombre de masse) du noyau considéré, celui d'en bas indique son nombre atomique, c'est-à-dire la charge positive résultante du noyau de l'atome, et par conséquent aussi le nombre des électrons périphériques de l'atome à l'état normal (non inonisé).

Les rayons émanant des corps radioactifs sont de 3 espèces: rayons α, β et γ. Les rayons α et β sont constitués par des projectiles matériels, les rayons γ sont de nature électromagnétique. Les rayons α sont formés par des atomes d'hélium, ayant perdu chacun deux électrons, autrement dit,

par des noyaux d'hélium ${}^{4}_{2}He$; les rayons β sont constitués par des électrons négatifs ($\bar{\varepsilon}$).

Considérons par exemple les premiers maillons de la chaîne des transformations radioactives de l'uranium UI → UX_1 → UX_2. UI se transforme en UX_1 avec expulsion de particules α, UX_1 en UX_2 avec projection de particules β etc. Nous avons pour les deux cas examinés les réactions suivantes:

$$^{238}_{92}\,UI - {}^{4}_{2}\,He = {}^{234}_{90}\,UX_1$$

$$^{234}_{90}\,UX_1 - \bar{\varepsilon} = {}^{234}_{91}\,UX_2$$

Ces deux exemples sont des cas-types des modifications des éléments radioactifs. Le mécanisme des transformations radioactives avec expulsion de particules α ou de particules β se fait d'après les lois de Soddy que nous indiquerons schématiquement ci-après, en désignant par ${}^{m}_{n}E$ un noyau quelconque, m étant son nombre de masse et n son nombre atomique.

Transformation radioactive avec projection de

corpuscules α	corpuscules β
${}^{m}_{n}E - {}^{4}_{2}He = {}^{m-4}_{n-2}E'$	${}^{m}_{n}E - \bar{\varepsilon} = {}^{m}_{n+1}E''$

Ces deux lois s'énoncent ainsi :

Toute transformation avec expulsion

de rayons α	de rayons β
diminue le nombre de masse de 4 unités, et diminue le nombre atomique de 2 unités.	n'altère pas le nombre de masse, et augmente le nombre atomique d'une unité.

Les égalités écrites plus haut traduisent des réactions appelées nucléaires, parce qu'elles correspondent à une modification du noyau envisagé.

Une propriété caractéristique des réactions nucléaires traduisant l'évolution d'un élément radioactif est qu'aucun phénomène, d'ordre chimique ou physique, ne s'est révélé capable d'accélérer, de retarder, ou de modifier d'une façon quelconque la désintégration.

Par la découverte de la radioactivité la voie avait été préparée à celle de *la transmutation artificielle*. Les premières expériences vraiment sensationnelles ont été effectuées par Rutherford, qui, au début de ses recherches relatives à ce

sujet, a réalisé la désintégration des noyaux atomiques de l'azote. En soumettant de l'azote à un bombardement intense par des particules α lancées par une pellicule de radium C, Rutherford a constaté l'apparition de particules nouvelles, constituées par des noyaux d'hydrogène. Or, il n'y avait pas trace d'hydrogène dans la matière bombardée; il s'agit donc manifestement d'un phénomène de transmutation.

Voici la réaction nucléaire qui traduit la transmutation:

$$^{14}_{7}N + {}^{4}_{2}He = {}^{17}_{8}O + {}^{1}_{1}H$$

Elle signifie que la particule α est incorporée au noyau qui perd un noyau d'hydrogène appelé proton; le noyau primitif se transforme en un noyau de masse atomique 17 et de nombre atomique 8, qui correspond à un isotope de l'oxygène.

Il existe à côté de $^{14}_{7}N$ un isotope $^{15}_{7}N$. En considérant celui-ci, nous obtenons la réaction nucléaire suivante:

$$^{15}_{7}N + {}^{4}_{2}He = {}^{18}_{8}O + {}^{1}_{1}H$$

Cette réaction est également possible; elle correspond encore à la transformation du noyau d'azote en un noyau d'oxygène.

Depuis les recherches de Rutherford, de nombreux types de transmutations artificielles ont été découverts. Les projectiles utilisés étaient:

1° des particules α;

2° des protons accélérés;

3° des deutons (noyaux d'hydrogène de masse 2);

4° des neutrons (protons liés chacun à un électron négatif).

Il convient de mentionner ici les effets de désintégration artificielle obtenus au noyau des rayons cosmiques, l'effet Bothe et Becker, l'effet Curie-Joliot, les expériences de Cockroft et Walton, etc.

Les produits expulsés ne sont pas toujours, comme dans l'expérience de Rutherford avec les noyaux d'azote, des protons, mais ils sont, dans les différentes expériences, de nature diverse: des protons, des particules α, ou des neutrons.

Quant au mécanisme de la transmutation, il semble qu'en général la particule incidente est capturée par le noyau bombardé qui explose en quelque sorte en projetant une particule d'une autre nature que la première.

Expériences fondamentales des époux Joliot-Curie.

Nous arrivons maintenant aux premières expériences sur la *découverte d'un nouveau type de radioactivité* par M^me^ Irène Curie et F. Joliot (résultats publiés en mars 1934). Dans les

expériences susmentionnées sur la transmutation artificielle, la projection de particules par la matière bombardée cessait en même temps que le bombardement. Mais en irradiant une feuille d'aluminium avec les rayons α produits par une forte source de polonium, les époux Joliot-Curie ont constaté que la feuille manifeste encore une activité tout en n'étant plus soumise à l'influence des rayons α. Le même phénomène a été constaté dans des expériences faites sur le bore et le magnésium. Il s'agit donc d'une radioactivité excitée (par opposition à la radioactivité spontanée des radioéléments naturels).

L'examen du rayonnement émis montre une différence profonde entre les deux genres d'activité. Tandis que la désintégration spontanée ne s'accompagnait jamais de l'émission d'électrons positifs, la radioactivité provoquée s'effectue avec expulsion d'électrons positifs. Ainsi, dans le bombardement de l'aluminium et du bore, le ravonnement émis comporte uniquement des électrons positifs; dans le cas du magnésium, il comprend des électrons négatifs et des électrons positifs.

Ces expériences ont démontré l'existence des faits suivants:

1) Sous l'influence d'un bombardement par des particules α certains éléments sont modifiés de façon à devenir radioactifs;

2) le rayonnement émis comprend un genre de corpuscules qu'on n'avait jamais constaté dans celui des radioéléments naturels; ce sont les électrons positifs appelés encore positrons.

Explication des expériences.

On a imaginé plusieurs hypothèses pour expliquer ces faits. Voici les réactions nucléaires qui expliquent, d'après Joliot-Curie, la production de cette radioactivité artificielle en même temps que l'expulsion d'électrons positifs ou négatifs.

Occupons-nous d'abord du cas plus simple de l'aluminium et du bore, où le rayonnement créé artificiellement est formé exclusivement de positrons.

Les noyaux ${}^{10}_{5}B$ et ${}^{27}_{13}Al$ capturent chacun une particule α d'après le mécanisme décrit plus haut pour les transmutations artificielles, puis projettent un neutron, d'après les réactions:

$${}^{10}_{5}B + {}^{4}_{2}He = {}^{13}_{7}N + {}^{1}_{0}n \quad ({}^{1}_{0}n, \text{ neutron})$$

$${}^{27}_{13}Al + {}^{4}_{2}He = {}^{30}_{15}P + {}^{1}_{0}n$$

Les 2 noyaux ${}^{13}_{7}N$ et ${}^{30}_{15}P$ ne sont pas connus. On peut donc admettre qu'ils sont instables et qu'ils se désagrègent en

émettant des positrons d'après les nouvelles réactions nucléaires:

$$^{13}_{7}N = ^{13}_{6}C + \overset{+}{\varepsilon} \qquad (\varepsilon, \text{ charge d'un positron})$$

$$^{30}_{15}P = ^{30}_{14}Si + \overset{+}{\varepsilon}$$

Les noyaux ainsi formés sont stables et correspondent effectivement à des noyaux connus.

Examinons le cas plus complexe du magnésium. Nous expliquons la production de positrons par des réactions nucléaires analogues à celles données pour le bore et l'aluminium.

$$^{24}_{12}Mg + ^{4}_{2}He = ^{27}_{14}Si + ^{1}_{0}n$$

$$^{27}_{14}Si = ^{27}_{13}Al + \overset{+}{\varepsilon}$$

La première réaction signifie que le noyau $^{24}_{12}Mg$ capture une particule α et se transforme, avec expulsion d'un neutron, en un noyau instable, $^{27}_{14}Si$. Ce noyau se transforme d'après la deuxième réaction ci-dessus en un noyau stable avec émission d'un positron.

Pour expliquer la production des électrons négatifs, on peut considérer la modification du noyau isotope $^{25}_{12}Mg$:

$$^{25}_{12}Mg + ^{4}_{2}He = ^{28}_{13}Al + ^{1}_{1}H$$

$$^{28}_{13}Al = ^{28}_{14}Si + \overset{-}{\varepsilon}$$

Il se produirait donc dans le 2e cas un noyau stable connu $^{28}_{14}Si$.

Il est important de remarquer qu'il y a dans chaque cas *deux* réactions nucléaires pour expliquer la radioactivité créée artificiellement:

La 1re exprime que le noyau considéré est transformé en un noyau instable;

La 2e exprime que ce noyau instable explose avec production, soit d'un électron positif, soit d'un électron négatif.

Remarques sur ces réactions nucléaires.

On peut se demander si les réactions nucléaires ne pourraient s'écrire en prenant l'isotope du noyau $^{10}_{5}B$, soit $^{11}_{5}B$. On aurait, en supposant que le même mécanisme intervienne:

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

D'après la réaction nucléaire envisagée, on ne saurait créer ainsi un élément radioactif, vu que le noyau $^{14}_{7}N$ est stable et ne se désagrège pas spontanément. (Ce n'est pas le cas pour le noyau $^{13}_{7}N$ obtenu avec $^{10}_{5}B$).

A propos de l'aluminium, la question ne se pose plus, vu qu'il n'y a pas d'isotopes. Mais, quant au magnésium, on peut demander si le noyau $^{24}_{12}Mg$ ne pourrait donner lieu à la production d'électrons négatifs, ou inversement, le noyau $^{25}_{12}Mg$ à l'émission de positrons. La réponse est négative, car les réactions nucléaires correspondantes:

$$^{24}_{12}Mg + {}^{4}_{2}He = {}^{27}_{13}Al + {}^{1}_{1}H$$
$$^{25}_{12}Mg + {}^{4}_{2}He = {}^{28}_{14}Si + {}^{1}_{0}n$$

donneraient lieu à la production des noyaux stables $^{27}_{13}Al$ et $^{28}_{14}Si$, donc il ne peut y avoir de radioactivité artificielle.

Etudions encore le cas du noyau $^{26}_{12}Mg$.

La réaction $^{26}_{12}Mg + {}^{4}_{2}He = {}^{29}_{14}Si + {}^{1}_{0}n$ donne un noyau stable, donc elle ne peut donner lieu à la production d'un radioélément.

Mais le couple suivant de réactions peut correspondre à la production d'un radioélément avec projection d'électrons négatifs:

$$^{26}_{12}Mg + {}^{4}_{2}He = {}^{29}_{13}Al + {}^{1}_{1}H\ ;\ {}^{29}_{13}Al \text{ est instable ;}$$
$$^{29}_{13}Al = {}^{29}_{14}Si + \bar{\varepsilon}$$

Comparaison entre les Radioéléments artificiels et naturels.

1° Joliot-Curie proposent d'appeler:

radioazote	le noyau instable	$^{13}_{7}N$
radiophosphore	„	$^{30}_{15}P$
radiosilicium	„	$^{27}_{14}Si$
radioaluminium	„	$^{28}_{13}Al$.

Tous ces noyaux instables donnent par leur désintégration, en émettant des positrons ou des électrons négatifs, des noyaux stables. Mais il n'y a pas comme pour les radioéléments naturels le grand nombre de *noyaux intermédiaires* instables entre l'élément primitif et l'élément final de la chaîne de désintégration.

Le radioazote, le radiophosphore, le radiosilicium et le radioaluminium ont respectivement le même nombre atomique que l'azote, le phosphore, le silicium ou l'aluminium. Il n'est pas inutile de signaler la différence quant aux désignations du radioactinium et du radiothorium. Le radioactinium, de nombre atomique 90, se transforme spontanément en actinium X, dont le nombre atomique est 88; le radiothorium, de nombre atomique 90, se transforme en thorium X de nombre atomique 88.

2° Il est intéressant de comparer les *périodes* des radioéléments naturels et de ceux créés artificiellement. On sait que par période d'un élément radioactif on entend le temps après lequel l'activité de cet élément a diminué de moitié. Alors que la période des radioéléments naturels atteint, pour quelques-uns, des valeurs excessivement grandes (uranium I, 8.000.000.000 années, uranium II, 3.000.000 années, ionium, 100.000 ans, radium, 2400 ans), celle des radioéléments artificiels est toujours d'une durée restreinte; ainsi elle est pour

le radioazote (provenant du bore) de 14 minutes
le radiophosphore („ de l'aluminium) de 3 min. 15 sec.
le radiosilicium („ du magnésium) de 2 min. 45 sec.

Donnons encore, à titre de comparaison, la période d'un noyau radioactif se formant dans la désintégration naturelle de l'uranium I, l'uranium X_2: 1,65 minutes. Pour cette raison on appelle encore l'uranium X_2 le brévium.

3° Cette création de radioéléments nouveaux présente un caractère de certitude comme les phénomènes de transmutation artificielle. Mais tandis que, pour ceux-ci, en raison du petit nombre d'atomes produits lors de ces transformations nucléaires, aucun procédé d'analyse n'était applicable à les *déceler,* dans le cas de la radioactivité provoquée, le petit nombre d'atomes obtenus par transmutation n'empêche pas de les déceler, vu que leur rayonnement suffit à les mettre en évidence.

Autres expériences de création de radioéléments.

Depuis les expériences des époux Joliot-Curie bien d'autres tentatives ont été faites relativement au même sujet. Il était tout indiqué d'employer comme projectiles ceux qui avaient servi dans les transmutations artificielles, c'est-à-dire: 1° des rayons α, 2° des protons, 3° des deutons, 4° des neutrons. Dans un temps très court, de nombreux autres radioéléments ont été découverts. On a trouvé aussi d'autres types de radioactivité. Ainsi l'irradiation par les rayons α donne lieu à une radioactivité artificielle avec projection de positrons, mais, dans le cas du fluor, des protons et des neutrons sont projetés. Un certain nombre d'éléments légers irradiés par des protons ou des deutons émettent des positrons et un rayonnement gamma provenant de l'annihilation des positrons. De nombreux éléments ont été bombardés par les neutrons (Fermi et ses collaborateurs, 1934) et sont devenus ainsi émetteurs de rayons cathodiques;

parmi les éléments soumis à l'expérience il y en a de masse atomique très élévée. La transmutation qui, dans ce cas, serait irréalisable avec des particules chargées, protons, deutons, particules α, s'opère grâce aux neutrons, particules électriquement neutres, parce que celles-ci ne sont pas arrêtées par la barrière de potentiel des noyaux lourds. On doit signaler l'effet intense obtenu avec le fer (période 2 hrs.) et avec le phosphore (3 hrs.). Les époux Joliot-Curie ont obtenu, en collaboration avec M. Preiswerk, par le bombardement du phosphore et du silicium au moyen de neutrons, l'émission de nombreux électrons négatifs et de quelques positrons; ils attribuent la production de ces derniers à un phénomène de matérialisation des rayons gamma.

Conclusion.

Nous n'avons donné qu'un court aperçu sur les résultats qu'on a obtenus après ceux de Joliot-Curie dans la voie de la production artificielle d'éléments radioactifs. Mais il est suffisant pour faire ressortir l'importance de ces recherches. La découverte de la radioactivité a amené les physiciens à considérer les atomes comme des édifices complexes variant d'un élément à l'autre, et dépourvus de stabilité dans le cas des éléments spontanément radioactifs; l'atome d'un radioélément, instable, se désagrège, pour se transformer, après de multiples péripéties, en un atome stable. Les transmutations artificielles ont montré que les atomes des éléments non radioactifs, bien que stables à l'état normal, peuvent être modifiés jusque dans leur noyau de façon à donner naissance à un autre atome stable. Dans les recherches récentes pour la création artificielle de radioéléments, un atome stable est transformé en un atome instable qui se désagrège et donne lieu à la production d'un autre atome stable. Nous indiquerons sommairement cette évolution dans le schéma suivant:

		Transformation		
1° **Radioactivité naturelle :**	d'un atome	instable	en un atome	stable
2° **Transmutation artificielle :**	„	stable	„	stable
3° **Radioactivité artificielle :**	„	stable	„	instable
	avec „	instable	„	stable.

On peut en outre admettre que ces découvertes feront progresser dans une mesure très étendue nos connaissances sur le problème de la structure du noyau, sans parler des applications pratiques qu'elles pourront susciter.

Luxembourg, le 2 janvier 1936. A. Gloden.