

Amelycor

(Association pour la mémoire du Lycée et du Collège de Rennes)

Cité scolaire E Zola Avenue Janvier Rennes

B. Wolff

(professeur au lycée E. Zola)

Cahier n°3

***Petite histoire de la radioactivité et du
noyau de l'atome***

Amelycor

(Association pour la mémoire du Lycée et du Collège de Rennes)

Cité scolaire E Zola Avenue Janvier Rennes

B. Wolff

(professeur au lycée E. Zola)

Cahier n°3

Petite histoire de la radioactivité et du noyau de l'atome

Ce texte reprend principalement le contenu d'un des premiers « jeudis d'Amelycor » (janvier 97). Ces conférences mensuelles sont organisées dans la cité scolaire E. Zola dans le cadre de l'action que mène l'association pour la défense et la mise en valeur de tous les aspects du patrimoine historique de l'établissement.

Je remercie les organisateurs de la « quinzaine des sciences » de décembre 99 au lycée Joliot-Curie de m'avoir donné l'occasion de reprendre ces notes à l'intention de lycéens engagé dans une étude sur les aspects les plus variés de la radioactivité.

Sources :

- Je me suis largement inspiré d'un excellent article, clair et documenté, "La radioactivité artificielle a 50 ans", de Sven ORTOLI paru dans "Sciences et Vie" n° 799 d'Avril 84.
- La même année, dans le n° de novembre de l'excellente "Revue du Palais de la Découverte" : "La radioactivité artificielle et sa découverte" par P. Radvanyi.
- Une référence majeure : « La radioactivité artificielle et son histoire », de P.Radvanyi et M.Bordry (« points sciences », éditions du Seuil)
- « Electrons et atomes », de J.L. Lewis (« thèmes Vuibert », ne sont plus édités)
- « Idées et découvertes en physique » de Sir Lawrence Bragg (« thèmes Vuibert »)
- « La radioactivité » de J.L. Lewis et E.J. Wenham (« thèmes Vuibert »)
- Sur Niels Bohr et la naissance de la mécanique quantique, « Niels Bohr », de François Lurçat (éditions Critérion).
- Articles de l'Encyclopédie Universalis : « Electron », « les Curie », « Rutherford », « radioactivité (historique) », etc.
- Un bref et joli article de J.P. Maury, "des rayons cathodiques à l'atome de Bohr" (1895-1914) dans "Revue du Palais de la Découverte" n°255 (02/1998)

Au 19^e siècle

L'hypothèse atomique s'impose progressivement grâce surtout au développement de la chimie : les atomes sont considérés comme particules *indivisibles et indestructibles*, se conservant lors des réactions, qui en modifient seulement les combinaisons.

Dès 1833 cependant la découverte par Faraday des lois de l'électrolyse conduisait à l'idée d'une "structure granulaire de l'électricité" et dès 1874 G.J. Stoney évalue la "charge élémentaire" transportée par un ion monovalent. C'est "l'atome d'électricité" (que Stoney baptisera "électron" en 1891, avant la découverte du corpuscule qui prendra ce nom)

1895 ou : comment Röntgen, croyant étudier les "rayons cathodiques", découvre les rayons X.

Enveloppant son tube de Crookes¹ de papier noir, il découvre qu'un matériau réputé pour ses propriétés de luminescence est rendu luminescent, à distance, par un mystérieux rayonnement « X » provenant du tube et traversant ce papier. D'où les premières radiographies présentées dès le 20/1/96 à l'Académie des Sciences. Le « rayonnement X » semble provenir du verre du tube.

Cela est vrai : selon l'interprétation moderne les atomes constituant le verre du tube sont « excités » par le bombardement qu'ils subissent de la part des électrons du « rayonnement cathodique », puis ils se « dés excitent » par émission de rayonnement électromagnétique : si le « saut d'énergie » était faible il s'agirait de lumière ou d'ultra-violet ; s'il est important on obtient les « rayons X », de beaucoup plus courtes longueurs d'onde.

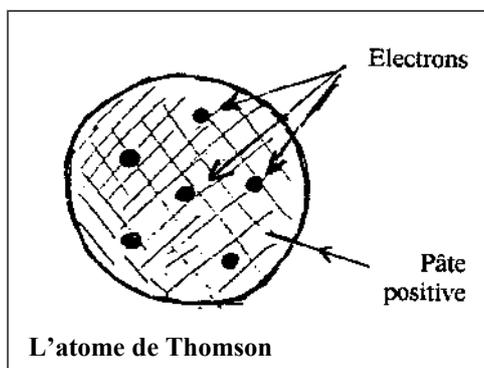
En utilisant comme cible une grosse anode métallique, dite anticathode, au lieu du verre de l'ampoule, Röntgen améliore la production de ce rayonnement². L'hypothèse (juste) que l'on considère alors comme vraisemblable est que les "X" sont des ondes électromagnétiques de plus courtes longueurs d'onde que la lumière.

Mais ce n'est pas Röntgen qui finit d'élucider la nature du "rayonnement cathodique" :

1897 J.J. Thomson et la découverte de l'électron ; l'atome « pain aux raisins »

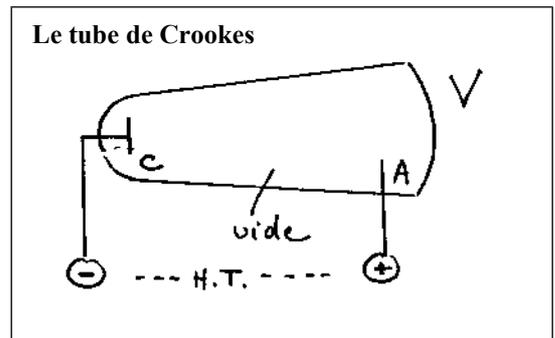
En 1895, **Jean Perrin** avait déjà montré que ces « rayons » portaient des charges négatives (contrairement à la luminescence et à l'émission « X », qui ne transportent pas de charge électrique). En déviant ce rayonnement par des champs électrique et magnétique, **J.J. Thomson** montre qu'il est formé de particules de charge négative, beaucoup plus légères que les atomes. **C'est la découverte de l'électron**³.

¹ "tube de Crookes" : une haute tension appliquée entre la cathode C et l'anode A arrache des électrons à C ; leur impact excite en V la luminescence du verre (et même celle de l'air résiduel si le vide est mauvais). L'expérience date de 1885 mais parler alors - et même en 1895 - d'*électrons* est anachronique : la nature de ce "rayonnement cathodique" est inconnue. C'est elle que Röntgen voulait élucider; il en fut détourné par sa découverte.



² Pour ses travaux sur les rayons X Röntgen reçoit le prix Nobel en 1901.

³ Thomson fait alors l'hypothèse d'un atome constitué d'une masse positive dans laquelle seraient piqués des électrons négatifs. Cet atome « plein », comparable à un « pain aux raisins », ferait sourire un élève de collège aujourd'hui. Mais admettre la nature composite de l'atome était une révolution. Par ailleurs c'était la seule structure possible en accord avec les lois de la mécanique et de l'électromagnétisme dont les physiciens du 19^{ème} siècle venaient d'achever fièrement l'édifice.



1896 ou comment Becquerel, croyant étudier les "rayons X", découvre la radioactivité de l'uranium.

L'idée que luminescence et rayonnement X semblent associés dans l'expérience de Röntgen conduit Henri Becquerel à étudier des substances phosphorescentes.

La phosphorescence est une forme "retardée" de la luminescence ; les substances dites luminescentes, lorsqu'elles reçoivent de l'énergie lumineuse, en réémettent une partie sous forme d'une lumière de couleur bien déterminée - soit immédiatement et c'est la fluorescence (exemples : fluorescéine, peintures "fluo")
- soit après la fin de l'excitation et c'est la phosphorescence (exemple : les vers luisants).

Certains sels d'uranium sont phosphorescents : Becquerel les expose à la lumière solaire, puis les place sur une plaque photographique, protégée de la lumière par une plaque d'aluminium et du papier noir. Merveille, la plaque est cependant impressionnée. Un rayonnement X accompagnerait donc bien la phosphorescence ?

Mais quelques jours de temps gris amènent Becquerel à laisser son matériel quatre jours dans un tiroir. Les sels d'uranium ne sont donc pas en état de phosphorescence. Il a cependant l'idée de développer la plaque photo restée dans le tiroir : elle est fortement impressionnée !

Becquerel vient de découvrir la radioactivité de l'uranium⁴. Son hypothèse de départ est donc inexacte : tous les composés de l'uranium présentent en effet la même propriété, et ce en l'absence de toute excitation préalable, donc sans lien avec la phosphorescence. Il reste cependant persuadé de l'analogie de nature entre ce qu'il appelle "rayons uraniques X" et les rayons X. Le terme radioactivité ("radio" = rayonnement) a d'ailleurs subsisté, même si nous savons aujourd'hui qu'il est impropre.

1897-99 : Pierre et Marie Curie découvrent d'autres éléments radioactifs.

Becquerel avait remarqué que les "rayons uraniques" rendaient l'air conducteur.

(Propriété largement utilisée dans les détecteurs actuels tels que compteur Geiger et autres plus modernes : nous disons que le "rayonnement" des éléments radioactifs est ionisant).

Marie Curie (née Sklodovska, elle a épousé Pierre en 1895), utilise cette propriété⁵ pour une étude quantitative des "rayons uraniques". Elle découvre ainsi qu'il existe des minerais, comportant de l'uranium et d'autres éléments, qui sont plus « actifs »⁶ que l'uranium. Elle isole, par des procédés chimiques nécessitant un travail acharné et minutieux, le polonium (Po) puis le radium (Ra).

1902 : D'environ 2 tonnes de minerai de pechblende, Marie Curie, installée dans un inconfortable hangar de l'école de Physique et Chimie de Paris, a tiré 9 décigrammes de chlorure de radium pur. Elle peut en déduire, à une unité près, la masse molaire atomique (226 g/mol) de Ra, élément jusqu'alors inconnu ! En **1911**, date où elle obtient le Nobel de chimie, elle aura isolé 1 g de radium.

Mystères ... et détectives

Les sels de radium émettent de la lumière de façon durable, les substances radioactives concentrées dégagent de la chaleur (P. Curie montrera en 1903 que 1 g de radium ferait fondre en 1 heure plus de 1 g de glace). *D'où vient ce dégagement apparemment inépuisable d'énergie ?*

Ce mystère attire les scientifiques. Mais c'est la nature du "rayonnement" qu'ils élucideront avant !

⁴ Il partagera pour cela avec Pierre et Marie Curie le prix Nobel de physique en 1903

⁵ Pierre Curie, qui a découvert la piézoélectricité en 1880, a conçu un électromètre ultrasensible (à quartz piézoélectrique).

⁶ le mot « radioactivité », dû à Marie Curie, date de 1898.

Méfais et bienfaits de la radioactivité

Si l'origine de l'énergie libérée est mystérieuse, sa réalité se manifeste vite : en 1901, Pierre Curie et Henri Becquerel sont victimes de brûlures et lésions cutanées. L'utilisation thérapeutique du « rayonnement » du radium dans le traitement des tumeurs cancéreuses intéresse les Curie dès 1903, ce qui conduit à la fondation dès 1909 de « l'Institut du Radium ».

1900 : « le » rayonnement « uranique » est multiple !

Par déviation électrique, les Curie, Rutherford et Villard distinguent petit à petit plusieurs émissions : les « β^- » (identifiés comme constitué d'électrons⁷ de haute énergie), les « α » (chargés positivement) et les « γ » (rayonnement électromagnétique, mais plus énergétique encore que le rayonnement X). La figure ci-contre donne le principe d'une séparation des trois « rayonnements ».

Puis Rutherford constate qu' α , β et γ ont des pouvoirs de pénétration très différents.

1902 : où Rutherford et Soddy découvrent la transmutation...

(chère aux alchimistes) au risque de passer pour des sorciers aux yeux de la "science sérieuse".

Ils constatent en effet que le thorium (radioactif) donne naissance à un gaz radioactif perdant sa radioactivité à un rythme assez rapide (en termes actuels, sa « période » ou « demi-vie »⁸ - voir figure ci-contre - est de 43 h), se transformant en même temps en un 3^{ème} élément... C'est le premier pas vers la découverte de « familles » radioactives (un élément engendre des « descendants »).

Rutherford sait, comme P. et M. Curie l'ont compris dès leurs expériences de 1898, que la radioactivité est une propriété de l'atome (indépendante des combinaisons chimiques dans lesquelles il est engagé). Associant cela aux hypothèses de Thomson sur la structure de l'atome il imagine que la radioactivité résulte d'interactions entre les constituants de l'atome. Il conçoit ainsi la « désintégration » et donc la transmutation de l'atome. On peut imaginer la résistance des mentalités à cette époque (l'atome indivisible, indestructible ...).

Dans la foulée, c'est la découverte des 3 grandes familles radioactives naturelles (celles de l'Uranium, du Thorium et de l'Actinium). Soddy découvre du même coup la notion d'isotopie (à un même élément correspondent plusieurs radioéléments de radioactivités et périodes diverses). On s'apercevra peu après que l'isotopie existe aussi pour les éléments stables⁹

Quant au mystère énergétique, il s'amplifie !

L'énergie dégagée lors des transmutations est sans commune mesure avec celle libérée par des réactions chimiques mettant en jeu les mêmes quantités de matière. Et en 1903 Rutherford montrera que *la chaleur libérée par la radioactivité naturelle est une contribution essentielle à la chaleur interne de notre planète*¹⁰ !

⁷ Dès 1898 Becquerel aurait perçu que la « radioactivité » comportait une émission analogue aux "électrons" découverts par Thomson dans le rayonnement cathodique.

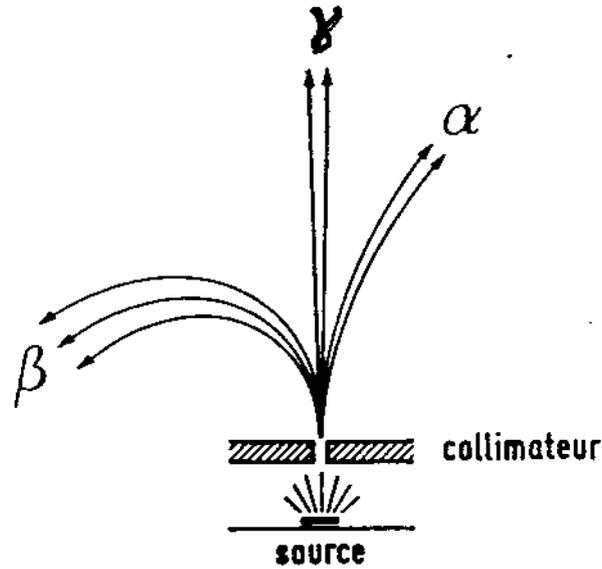
⁸ C'est d'ailleurs Rutherford et Soddy également qui établissent en 1903 les **lois de décroissance radioactive**

⁹ En **1912 Thomson** découvrira, grâce à la déviation électrique et magnétique d'atomes de néon ionisés, qu'il y a deux isotopes du néon. C'est seulement en **1920** qu'**Aston**, grâce à son premier « spectrographe de masse » (au programme de terminale S !), leur assignera les formules ²⁰Ne et ²²Ne. En **1932 Urey** découvrira le deutérium ²H, isotope stable de l'hydrogène « normal » ¹H.

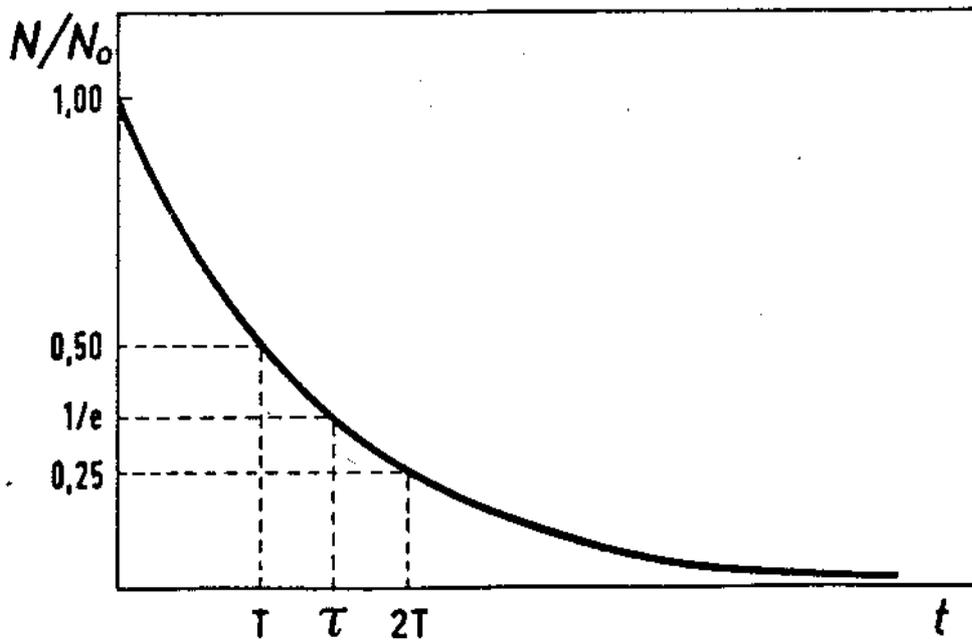
¹⁰ **C'est cette chaleur principalement qui maintient en équilibre thermique notre Terre, et qui en fait une planète encore « active » (volcanisme, tectonique de plaques, etc.).** Sinon elle se refroidirait du fait de son rayonnement thermique vers l'espace : Lord Kelvin avait calculé précédemment que pour se trouver dans son état thermique actuel, elle n'avait pu s'être formée il y a plus de 100 millions d'années. On sait maintenant que son âge est très supérieur !

Figures tirées de « la radioactivité artificielle et son histoire »
(Radvanyi et Bordry. Points science Ed. du Seuil)

Les 3 types de « rayonnements », soumis à l'action d'un champ magnétique :



Décroissance exponentielle d'un radioélément : N_0 atomes sont présents au temps $t = 0$. Au bout d'un temps T (demi-vie, dit improprement « période ») il n'en subsiste que la moitié ; au bout de $2T$, un quart ; et ainsi de suite. τ est la « constante de temps ».



1907-1909 : Rutherford¹¹ identifie les « α » comme étant des ions hélium (He^{2+})

... par une superbe expérience : il détermine, par action de champs électrique et magnétique, le rapport charge/masse et collecte les α de façon à obtenir leur spectre d'émission, qui est bien celui de l'hélium !

1911 : la « chambre de Wilson » permet de visualiser les trajectoires des α et β

Wilson produit dans une petite enceinte vitrée une atmosphère saturée d'humidité. Le passage de particules ionisantes provoque la condensation de fines gouttelettes sur leur parcours. De nombreux détecteurs utilisant des principes analogues prendront la suite.

1911 : Rutherford découvre l'existence du noyau de l'atome... et le vide atomique.

C'est la célèbre « expérience de Rutherford », menée par ses étudiants Geiger et Marsden. Des « α » sont utilisés comme projectiles.

Si l'atome avait la structure imaginée par Thomson, la traversée de la feuille d'or devrait disperser légèrement le faisceau, initialement formé de particules α émises selon une direction unique.

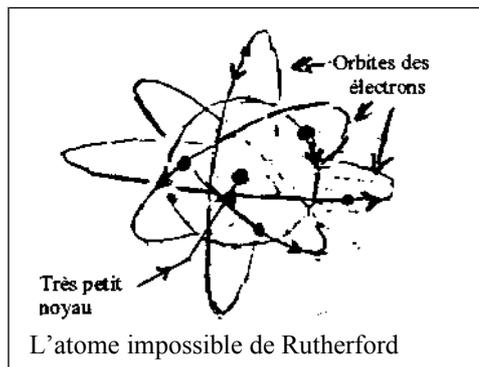
Or la majorité des α ne subit pratiquement aucune déviation, tandis que parmi les particules déviées, certaines le sont très fortement, et sont même parfois « réfléchies » vers l'arrière.

« c'est comme si un obus de 45 tiré sur un mouchoir revenait vous frapper » dira Rutherford.

Les calculs de Rutherford conduisent à l'interprétation suivante : toute la charge positive de l'atome est concentrée dans un volume minuscule, c'est le « noyau », dont le diamètre est dix mille à cent mille fois plus petit que celui de l'atome. Et autour ? un vide immense, dans lequel tournent les électrons à des vitesses fantastiques (sans quoi l'attraction électrique les ferait tomber sur le noyau). Il faut en somme imaginer l'atome comme un système solaire miniature...

L'atome de Rutherford existe, on l'a rencontré...mais il est « impossible » !

Tollé général ! Selon les lois physiques connues jusqu'alors (et celles enseignées jusqu'au bac !) rien n'interdit à ces atomes « pleins de vide » de se traverser les uns les autres... et à mon postérieur de passer à travers une chaise. De plus des charges électriques en mouvement non rectiligne émettent obligatoirement du rayonnement, perdant ainsi de l'énergie, au point qu'en une infime fraction de seconde, tous les électrons en orbite autour du noyau devraient avoir ralenti au point de s'effondrer sur le noyau !



1913 : Niels Bohr jette les bases d'une nouvelle physique.

En 1912, le jeune Niels Bohr s'est joint au laboratoire de Rutherford à Manchester.

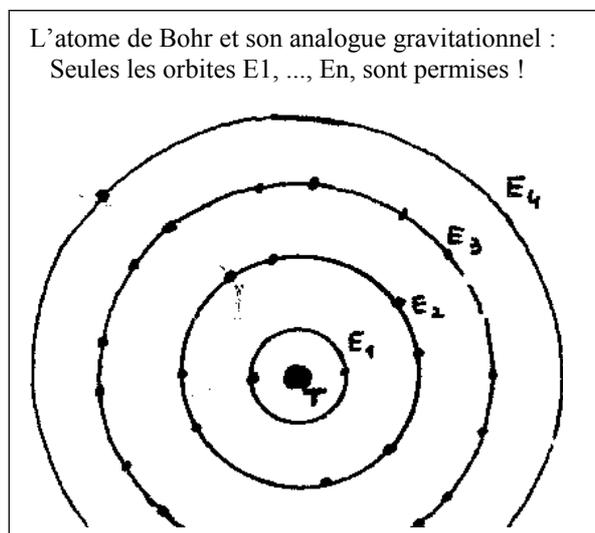
Son génie : renonçant à accommoder l'atome de Rutherford et la physique « classique », il cherche au contraire à rapprocher entre eux d'autres faits qui n'y trouvaient pas d'explication :

- les lois des « spectres de raie » de la lumière émise par les atomes excités

¹¹ Encore un prix Nobel ! (1908)

- la quantification des échanges entre matière et rayonnement, découverte par Max Planck (quantification : ces échanges se font non pas selon des quantités d'énergie variant de façon continue, mais par « grains d'énergie »).

Bohr fait les hypothèses suivantes, en rupture avec la mécanique et l'électricité classiques : il existe des orbites privilégiées, où l'électron peut se mouvoir sans rayonner, et où de plus ne peuvent être logés qu'un nombre limité d'électrons. Chacune de ces orbites correspond à un « niveau d'énergie » : l'énergie de l'électron dans l'atome ne peut donc varier que par « sauts », on dit qu'elle est quantifiée.



L'analogie gravitationnel, en totale contradiction avec l'expérience et avec la physique classique, serait celui représenté ci-contre : on ne peut placer des satellites autour de la terre T qu'à des altitudes bien déterminées formant une suite discontinue, et de plus chacune de ces orbites est "saturée" par un nombre très limité de satellites.

C'est seulement lorsqu'un électron d'un atome « excité » « saute » d'une orbite à une autre que de la lumière est émise. Elle aussi est « quantifiée » (émise par « grains d'énergie », qu'on appelle maintenant « photons »).

Les « niveaux d'énergie » de Bohr et les « grains d'énergie » lumineuse permettent d'interpréter les spectres de raies des atomes excités (et, dans le cas

de l'atome d'hydrogène, avec une grande précision quantitative).

Restait à faire une théorie cohérente de cette quantification de l'énergie de l'atome et de celle de la lumière. Bohr est ainsi à l'origine d'une nouvelle physique : la « mécanique quantique » dont une des premières formes fut la « mécanique ondulatoire ». Paradoxalement cette dernière détruira la notion "d'orbite" de l'électron, et c'est pourquoi dès la classe de seconde cette notion et le modèle "planétaire" de Bohr sont proscrits du programme, au profit de la notion de "nuage électronique" ! Seule la notion de niveau d'énergie subsiste (la mécanique ondulatoire, en associant une "onde" à la particule "électron", interprète l'existence de ces niveaux privilégiés comme correspondant à des états "d'ondes stationnaires"). Mais ceci sort du cadre de cet exposé...¹²

Retenons que l'atome « vide » de Rutherford fut au départ d'une révolution en physique. Mais dans ce qui suit, ce n'est pas aux vertigineux et mystérieux mouvements des électrons « quantiques » que nous aurons affaire, mais bien au **noyau** mis en évidence par l'expérience de 1911. En effet :

La radioactivité est une propriété du noyau de l'atome.

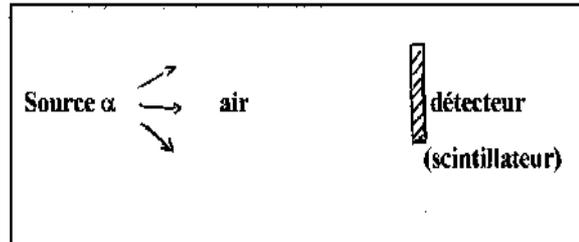
Nous avons vu que dès 1902 l'on avait constaté que les propriétés radioactives étaient indépendantes des combinaisons chimiques dans laquelle étaient engagés les atomes. On peut commencer à penser maintenant que les combinaisons chimiques mettent en jeu les électrons « périphériques », tandis que la radioactivité est une propriété du noyau découvert par Rutherford. La structure de ce dernier n'est pourtant pas encore comprise : le neutron ne sera découvert que beaucoup plus tard. Bien que porteur d'une charge positive, le noyau ne contient-il pas d'électrons (il faut expliquer l'émission d'électrons lors de la radioactivité β^-) ?

¹² La démarche de Bohr, la naissance de la mécanique quantique, la mécanique quantique après Bohr, et les problèmes philosophiques que posent sa compréhension et ses rapports avec la physique classique sont analysés avec une très grande clarté dans l'ouvrage de François Lurçat cité en référence. Ce petit ouvrage ne demande pratiquement pas de connaissances scientifiques préalables.

1919: Rutherford découvre "par hasard" la 1ère transmutation artificielle.

Dans la situation illustrée ci-contre, le détecteur était éloigné jusqu'à 40 cm de la source.

Il ne "devrait" donc plus compter de particules α (de pouvoir pénétrant trop faible pour dépasser 7 cm) ... et pourtant il y a toujours des scintillations !



Rutherford découvre de plus que du gaz hydrogène s'est formé dans le tube et il attribue alors les scintillations à des protons. La transmutation ainsi produite artificiellement serait donc¹⁴ :



Et dans les années qui suivent, on découvre de nombreuses autres transmutations artificielles.

« $E = mc^2$ » (Einstein) et les bilans énergétiques.

Dés 1905, dans sa « théorie de la relativité restreinte » Einstein émettait l'hypothèse d'une "énergie de masse" $E = mc^2$ et de sa conversion possible en d'autres formes d'énergie. Comparant alors les énergies de masse des "réactifs" et des "produits" des transmutations nucléaires, qu'il s'agisse de la radioactivité spontanée ou des transmutations provoquées comme celle découverte par Rutherford, on peut alors conclure quant au caractère plus ou moins exoénergétique de ces réactions.

L'usage du spectrographe de masse (note 9, page 4) permet dès 1920 d'atteindre avec précision les masses nucléaires. De la masse est bel et bien perdue lors des transmutations et l'application de la formule d'Einstein met alors en évidence l'immensité des énergies mises en jeu par noyau. Le "mystère" de l'origine du dégagement "inépuisable" d'énergie par les échantillons radioactifs est ainsi partiellement élucidé. Partiellement seulement, car la formule d'Einstein en donne une *mesure* plutôt qu'une *explication* :

Dans une combustion *chimique* banale, la formule d'Einstein prédit en effet aussi une « perte de masse » (trop faible pour être décelable). Personne ne dirait que cette perte est la *cause* de l'énergie dégagée : cette dernière provient du « travail » des forces électriques liant les atomes. De même dans les transmutations radioactives on est conduit à imaginer que l'énergie dégagée résulte du travail de *forces nucléaires* gigantesques liant les constituants du noyau. Dans les années 1920, la nature de ces forces, les lois qui les gouvernent restent inconnues.

Bilans énergétiques des radioactivités α et β^- : de l'énergie perdue dans le cas β^- ?

Les calculs utilisant la formule d'Einstein prédisent avec précision les énergies cinétiques effectivement constatées pour les particules α ¹⁵, mais dès 1920 on se heurte au mystère de « l'énergie perdue » dans la radioactivité β^- (les électrons n'atteignent pratiquement jamais l'énergie cinétique prévue par le calcul).

1928 : la mécanique quantique explique pourquoi les α jouent les « passe muraille »

Vous savez qu'en chimie une réaction $A + B \rightarrow C + D$ peut être exothermique, et cependant ne pas "démarrer" spontanément : il faut d'abord sauter une « barrière énergétique » (les

¹⁴ Confirmation en 1925 par une photo en "chambre à brouillard" (comme nous l'avons vu page 5 c'est le physicien écossais Wilson, qui aimait voir les reflets du soleil sur les gouttelettes de brouillard, qui avait inventé ce détecteur).

¹⁵ Il y a quelques années ces calculs étaient effectués par les élèves de terminale scientifique.

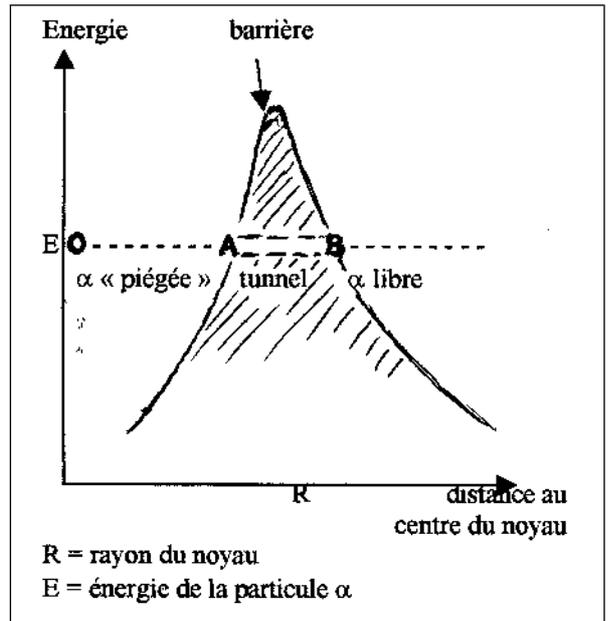
liaisons chimiques internes à A et B par exemple, doivent être brisées dans un 1^{er} temps). On dit qu'on « amorce » la réaction (approcher d'une flamme, présenter à une lumière vive, etc.).

De la même manière une particule α , par exemple, est retenue dans le noyau par une très haute « barrière énergétique ». Et c'est bien pour cela qu'un noyau radioactif peut exister un certain temps sans se désintégrer ! Pourtant, il finit à un moment ou un autre par le faire, et de façon spontanée, sans qu'aucun « amorçage » ne soit nécessaire !

Cela est totalement inexplicable en physique classique. En revanche, un calcul de mécanique quantique effectué par **Georges Gamow** prédit une probabilité non nulle de franchir, cette "barrière".

De façon imagée on parle "d'effet tunnel" : contrairement aux particules classiques condamnées à rester enfermées, ou bien à sauter par dessus les murs, les particules quantiques peuvent en quelque sorte « passer à travers » ! Ici la particule apparemment piégée dans le noyau entre O et A peut en sortir par le « tunnel » AB.

De la valeur plus ou moins élevée de cette probabilité dépend bien sûr la demi-vie (ou période) du radioélément considéré.



1928 encore: la mécanique quantique prédit l'existence d'un « électron positif »

En 1928 **Dirac** formule une théorie de l'électron dans le cadre à la fois de la mécanique quantique et de la théorie de la relativité d'Einstein. Or l'équation à laquelle il aboutit admet 2 solutions, dont l'une correspond à une particule de charge positive. Y a-t-il un objet correspondant dans la réalité ? (Suffit-il qu'un objet soit nécessaire à la cohérence d'une « belle » théorie pour qu'il existe dans la réalité ?) La réponse ne tarde pas :

1932: « l'électron positif » de Dirac existe, Anderson l'a rencontré !

Il observe en effet dans le rayonnement cosmique une particule de masse identique à celle de l'électron, mais de charge opposée. C'est la découverte de la 1^{ère} antiparticule (ce « positon » est un « antiélectron »). Par la suite nous noterons e^- l'électron, e^+ le positon.

1931 : Une particule neutre mystérieuse pour résoudre le mystère β^- .

L'autrichien **Pauli** suggère que "l'énergie manquante" (voir page 7) est emportée par une particule neutre de masse nulle ou quasi nulle, jamais observée car interagissant très peu avec la matière (on parlera "d'interaction faible") : elle a une probabilité si élevée de traverser toute la Terre sans interaction que la 1^{ère} observation d'une interaction attendra encore 25 ans !

1932: la découverte du neutron. Enfin le noyau tel que vous le connaissez !

De 1930 à 1932 plusieurs physiciens dont **F. et I. Joliot-Curie** (Irène, fille de Marie Curie, a épousé Frédéric Joliot) constatent que sous l'impact des particules α , des noyaux légers tels que Li et B émettent des particules neutres très énergiques (capables d'arracher des noyaux d'H - protons - à des composés hydrogénés).

Ils croient y voir des « γ » très énergiques. Mais **Chadwick** - alerté par l'hypothèse faite dès 1920 par Rutherford d'une particule neutre de même masse que le proton dans les noyaux - donne l'explication correcte: l'action subie par les noyaux d'hydrogène s'explique par le calcul si

on attribue aux mystérieuses particules neutres une masse pratiquement identique à celle du proton. Le neutron "libre" vient d'être découvert !¹⁶

Ce neutron est radioactif β^- (peut se transformer en proton, avec émission d'un électron : $n \rightarrow p + e^-$). Du même coup la théorie du noyau s'éclaire: on imaginait souvent jusque là qu'il était formé de protons et d'électrons. C'est donc en 1932 seulement que l'on admet pour le noyau la composition que vous connaissez : A nucléons dont Z protons et N = A - Z neutrons, tous étant liés entre eux par la force nucléaire (qui est elle-même une des manifestations de « l'interaction forte »).

1933 : Vous m'avez pris le nom « neutron », alors j'invente le « neutrino » !

Pauli et l'italien Fermi peuvent désormais faire la théorie complète de la radioactivité β^- : un neutron (lié) du noyau peut parfois (comme un neutron libre) se transformer en proton, avec émission simultanée d'un électron et d'un neutrino « ν », tous trois créés simultanément :



La particule annoncée dès 1931 par Pauli est donc maintenant baptisée ! (neutrino = « petit neutre » en italien).

Ces idées sont si nouvelles et surprenantes que la grande revue de physique anglaise "Nature" refuse de publier!

Fabriquons nous-mêmes nos projectiles ! L'ère des accélérateurs de particules.

Au lieu de dépendre des sources radioactives (fournissant des α ou β comme projectiles) pour provoquer des transmutations, accélérons des ions ! En 1928 et 1929, on construit des accélérateurs linéaires d'ions, puis de protons. **Corckroft** et **Walton** bombardent ainsi une cible de lithium par des protons et provoquent en 1929 la 1^{ère} désintégration artificielle d'un noyau (la "fission" du lithium en deux noyaux d'hélium) : ${}^7\text{Li} + p \rightarrow \alpha + \alpha$

En 1930 : **Lawrence** invente le cyclotron¹⁸, puis le perfectionne (1938 : protons d'énergie 100 MeV).

1932-34 - La découverte de la radioactivité artificielle.

Dès la découverte du neutron, I. et F. Joliot-Curie cherchent à détecter systématiquement les neutrons de transmutation (grâce à leurs collisions avec des noyaux d'hydrogène dans une chambre contenant du méthane par exemple. : contrairement aux neutrons, les noyaux H, étant chargés, provoquent des traces dans la chambre de Wilson).

1932 : la réaction entre une particule α et l'aluminium produit des neutrons. Serait-ce : ${}^{27}\text{Al} + {}^4\alpha \rightarrow {}^{30}\text{P} + {}^1\text{n}$ (1) où P est le phosphore ? Cette interprétation est laissée de côté car cet isotope du phosphore n'existe pas dans la nature. Or on croyait encore que toute réaction nucléaire provoquée conduisait à des « noyaux fils » stables (l'exemple des familles radioactives montre le contraire pour les réactions nucléaires spontanées).

1932-33 est par ailleurs une époque glorieuse de chasse aux positons. On observe notamment de nombreuses conversion énergie \rightarrow matière : « matérialisation » de photons très énergiques en paires $e^+ + e^-$. Les Joliot-Curie participent à cette chasse aux positons.

C'est alors qu'en **1933** ils reprennent l'étude de la réaction ${}^{27}\text{Al} + \alpha$ et découvrent une émission de positons. Interprétation provisoire : il existerait ${}^{27}\text{Al} + {}^4\alpha \rightarrow {}^{30}\text{Si} + {}^1\text{n} + e^+$ (2) ? Ils cherchent donc à prouver l'émission simultanée de n et e^+ en accord avec (2). Surprise ! Ils constatent au contraire que l'émission e^+ se poursuit bien après la suppression de la source α .

¹⁶ Cela vaudra à Chadwick le Nobel en 1935.

¹⁸ Il sera récompensé par le Nobel en 1939.

[Remarque : c'est avec le "compteur Geiger", mis au point en 1928, qu'ils détectent les « e+ »]. Les neutrons, eux, ne sont plus émis quand la source α n'est plus en place. L'émission différée des e^+ décroît exponentiellement conformément aux lois classiques de la radioactivité. L'interprétation correcte est immédiatement proposée par I. et F. Joliot Curie. Il y a 2 étapes :

$^{27}\text{Al} + ^4\alpha \rightarrow ^{30}\text{P} + ^1\text{n}$ (1) où le phosphore 30 est radioactif (de « période » 3 min) selon :

$^{30}\text{P} \rightarrow ^{30}\text{Si} + e^+ + \nu$ (3) ... et la réaction (2) n'existe pas.

Preuve : malgré la courte demi-vie du phosphore 30, ils arrivent à le mettre en évidence chimiquement. C'est une **double découverte**¹⁹ :

1) Il existe des **radioéléments "artificiels"** comme le phosphore 30. Les "naturels" sont, parmi ceux qui se sont formés à l'époque de la "nucléosynthèse" qui accompagnait la formation du soleil et du système solaire, ceux qui ont une très longue période (de l'ordre du milliard d'années) et leurs "descendants". Mais, à côté des "naturels" il peut en exister des centaines d'autres.

2) Il existe une **radioactivité β^+** (émission $e^+ + \nu$). D'autres exemples sont découverts à cadence accélérée. Les Joliot-Curie suggèrent à Lawrence de fabriquer de l'azote 13 en bombardant du carbone 12 par des deutons (ions « hydrogène lourd ») ^2H accélérés. Et cela marche dans la $\frac{1}{2}$ heure qui suit la réception de la lettre ! $^2\text{H} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{13}\text{N} + ^1\text{n}$, et l'azote 13 est radioactif β^+ .

Le bombardement des cibles les plus variées par divers « projectiles » (protons accélérés, α , deutons, etc.) fournis par les accélérateurs permet de découvrir de très nombreux radio-isotopes artificiels.

Les grandes étapes ultérieures : la fission de l'uranium....

Le phénomène de "résonance" : pour certaines énergies de neutrons utilisés comme projectiles, la probabilité de capture par le noyau cible passe par un maximum important (1936).

En cherchant alors à faire "avalier" ainsi des neutrons à l'uranium **Fermi** et ses collaborateurs croient produire des transuraniens... alors qu'ils réalisent, sans le savoir, **la 1^{ère} fission de l'uranium** (dès juin 1934). Mais c'est en 1939 que **Hahn, Strassmann, Lise Meitner, et Frisch** prouvent et interprètent la **fission de l'Uranium en deux noyaux moyens**. La nouvelle fait tache d'huile... Le simple impact d'un neutron peut briser un noyau d'uranium en deux fragments de plus forte cohésion, avec alors une libération immense d'énergie.

En France (Joliot-Curie) et aux Etats-Unis des travaux progressent simultanément concernant la possibilité d'une « **réaction en chaîne** » de fission de l'uranium 235.

Dès Octobre 1939 les applications énergétiques et militaires en sont entrevues. La suite relève de l'histoire politique: la guerre de 39-45, des physiciens, dont Einstein, écartelés entre l'horreur des possibilités de destruction nouvelle, et la crainte de voir l'Allemagne nazie devancer les Etats-Unis... Frédéric Joliot-Curie rentre dans la « bataille de l'eau lourde » utile à la maîtrise de l'énergie nucléaire : en soustraire les stocks à l'Allemagne...

1942 : **première "pile atomique"** en fonctionnement (Université de Chicago), ancêtre des centrales nucléaires.

1943 : création du laboratoire de **Los Alamos**, pour construire, sous la direction de Oppenheimer, les premières « bombes A » américaines.

1945 : **Hiroshima**, lancement de la première bombe à fission nucléaire.

1948 : entrée en fonctionnement de Zoë, première « pile atomique » française²⁰.

¹⁹ Récompensée par le Nobel de chimie en 1935

²⁰ Réalisée sous la direction de Frédéric Joliot-Curie

Quelques dates dans l'histoire de la radioactivité et du noyau atomique

<p>La dynastie Becquerel : Antoine-César (piézoélectricité, électrochimie) naît en Fils : Edmond (la luminescence), petit-fils : Henri (découvrira la radioactivité)</p>	<p>1788</p>
<p>L'élément uranium, découvert par M.H. Klaproth dès</p>	<p>1789</p>
<p>Röntgen découvre les rayons X (→ <i>prix Nobel 1901</i>)</p>	<p>1895</p>
<p>Becquerel (Henri) découvre la radioactivité (« rayons uraniques X ») (→ <i>prix Nobel avec Pierre et Marie Curie en 1903</i>)</p>	<p>1896</p>
<p>J.J. Thomson : l'électron (et son rapport e/m 2000fois celui de H^+) et le modèle d'atome « plum-pudding » (→ <i>Nobel en 1906</i>)</p>	<p>1897</p>
<p>Pierre et Marie Curie (à l'école de phy. et chi. de Paris) : le polonium puis le radium (le mot radioactivité, la radiochimie...) (→ <i>Marie Curie 2^{ème} fois prix Nobel - de chimie - en 1911</i>)</p>	<p>1898 1899</p>
<p>Découverte progressive des isotopes radioactifs naturels (→ francium)</p>	<p>1898 à 1939</p>
<p>Ernest Rutherford distingue les émissions α et β de l'uranium Et Paul Villard montre qu'il y a aussi émission de rayonnement γ</p>	<p>1899 1900</p>
<p>Rutherford et Soddy : les transmutations, les familles radioactives... ... et les lois de décroissance radioactive (« période »). Rutherford encore... ... montre que la radioactivité maintient la chaleur interne de notre planète (→ <i>Rutherford, prix Nobel en 1908</i>)</p>	<p>1902 1903</p>
<p>Einstein : les quanta de lumière (photons), la relativité (<i>Nobel en 1921</i>)</p>	<p>1905</p>
<p>Rutherford identifie les particules α comme étant des noyaux d'hélium</p>	<p>1909</p>
<p>Wilson visualise dans sa «chambre à brouillard» des trajectoires d' α et β (→ <i>prix Nobel en 1927</i>)</p>	<p>1911</p>
<p>Rutherford (et ses étudiants <i>Geiger</i> et <i>Marsden</i>) : la découverte du noyau</p>	<p>1911</p>
<p>L'atome de Niels Bohr et ses niveaux d'énergie « quantifiés » (→ <i>prix Nobel en 1922</i>)</p>	<p>1913</p>
<p>Rutherford : la première transmutation artificielle</p>	<p>1919</p>
<p>Aston perfectionne le spectrographe de masse de Thomson (<i>Nobel chimie 1922</i>)</p>	<p>1920</p>
<p>Gamow : la mécanique quantique explique l'émission α par « effet tunnel »</p>	<p>1928</p>
<p>Dirac : la mécanique quantique prédit le positon (antiélectron) (→ <i>prix Nobel en 1933</i>)</p>	<p>1928</p>

Corckroft & Walton : 1 ^{ère} fission d'un noyau, à l'aide d'un accélérateur de protons 1929 (→ <i>prix Nobel en 1951</i>)	
Lawrence : invention du cyclotron (→ <i>prix Nobel en 1939</i>)	1930
Pauli et Fermi : le neutrino (émis en même temps qu'e ⁻ dans la radioactivité β) 1931-33 (<i>Fermi prix Nobel en 1938 et Pauli en 1948</i>)	
Anderson détecte des positons dans le rayonnement cosmique (→ <i>Nobel 1936</i>)	1932
Urey découvre l'isotope ² H (deutérium) de l'hydrogène	1932
Irène et Frédéric Joliot-Curie obtiennent des émissions de neutrons ... mais c'est Chadwick qui en calcule la masse, en comprend la nature : découverte du neutron 1932 (d'où la compréhension de la composition du noyau) (→ <i>Chadwick, prix Nobel en 1935</i>)	
Irène et Frédéric Joliot-Curie découvrent la radioactivité artificielle 1932-1934 (d'où leur <i>prix Nobel de chimie en 1935</i>)	
Etude des interactions neutron - noyaux par diverses équipes (dès 1934 Fermi réalise sans le savoir une fission de l'uranium)	1934-1936
Hahn, Strassmann, Lise Meitner, Frisch : la fission de l'uranium 235	1939
Fermi met en fonctionnement à Chicago la première pile atomique	1942
Construction de la 1 ^{ère} « bombe A » à Los Alamos, sous la direction de Oppenheimer	1943
Hiroshima	1945
Zoe , 1 ^{ère} pile atomique française, construite sous la direction de F. Joliot-Curie	1948

