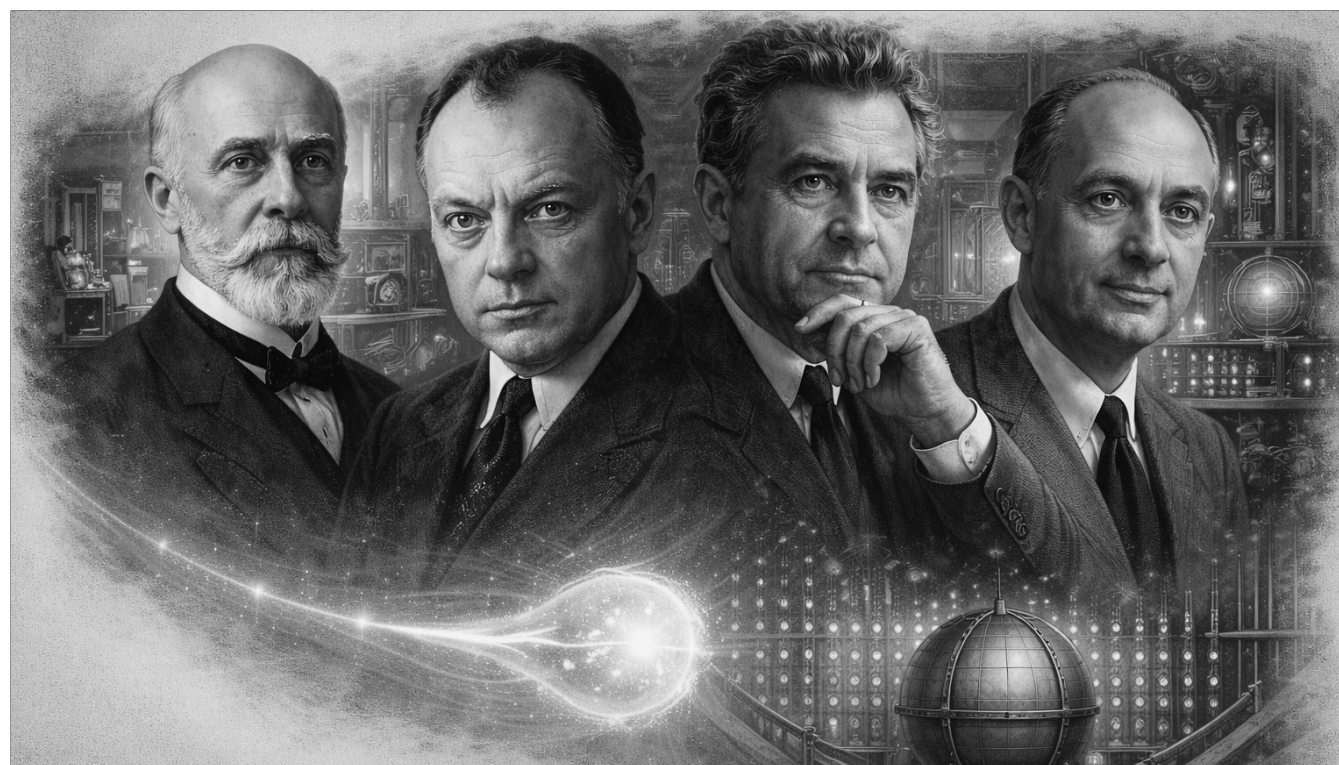




Les neutrinos, fantômes de la physique

Yves Schutz, Printemps 2026



Commençons par rappeler le titre de cette série de cours. Il annonce que les neutrinos en sont l'objet principal, mais il précise la nature fantomatique de ces particules. On ne peut pas les voir, ni même imaginer leur existence, s'ils ne se manifestent pas d'une façon ou d'une autre : telle est la nature des fantômes.

Dans le chapitre précédent, nous avons suivi comment, par un extraordinaire épisode de sérendipité s'étalant sur moins de cinq ans, les actes fondateurs d'une nouvelle ère — la physique moderne — ont été rédigés. Tout se résumait alors à une interrogation centrale : « Quelle est la nature de certains rayonnements ? »

INCIPIT

- 2 mars 1896 : la physique nucléaire, Henri Becquerel
- 17 octobre 1897 : la physique des particules, Joseph-John Thomson
- 14 décembre 1900 : la physique quantique, Max Planck



La découverte de l'électron dans les rayons cathodiques a donné naissance à la physique des particules.

L'interprétation du rayonnement du corps noir a ouvert la voie à la physique quantique.

Le rayonnement spontané découvert par Becquerel a préparé le terrain de la physique nucléaire.

Nous nous étions attardés sur ce dernier phénomène, dont la découverte dépendait de la météo maussade qui a frappé Paris à la fin février 1896. En cherchant des rayons X émis par des corps luminescents, Henri Becquerel a constaté, dans des sels d'uranium, un rayonnement qui, à première vue, possédait toutes les propriétés des rayons de Röntgen.

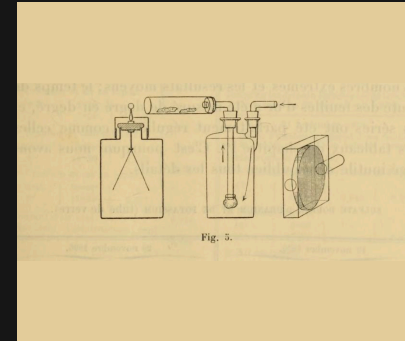
À première vue seulement ? S'agit-il réellement de rayons X ?



C'est précisément ce que Becquerel s'est efforcé de déterminer durant le reste de l'année 1896.

Rayonnement spontané ?

- Ne faiblit pas avec le temps
- Partiellement absorbé par l'air
- Ionise l'air
- Présent avec tous les sels d'U
- Le plus intense avec l'U métallique



Dans sa communication à l'Académie des sciences du 2 mars 1896, Becquerel souligne qu'il vient de mettre en évidence un phénomène fondamentalement nouveau : l'émission de rayons pénétrants sans cause excitatrice extérieure. Contrairement aux rayons de Röntgen, qui ne sont générés que par l'interaction des rayons cathodiques avec le verre du tube ou à la luminescence de certains corps après exposition à lumière du soleil, les rayons de Becquerel semblent apparaître spontanément, sans qu'on leur fournisse d'énergie externe.

Dès le lendemain, Becquerel va d'abord s'attacher à élucider ce fait troublant. Il prend toutes les précautions nécessaires pour empêcher tout rayonnement extérieur, blindage de plomb, carton noir opaque, obscurité totale ...

Il constate que le rayonnement persiste quasi indéfiniment : le même rayonnement est émis sans affaiblissement après plusieurs heures, plusieurs jours et même plusieurs années. **"... qu'ils gardent tout leur pouvoir actif bien plus longtemps que n'importe quel phénomène le luminescence [...] les sels d'urane émettent des radiations invisibles avec une constance remarquable mais il n'en est pas de même avec les autres substances phosphorescentes"** Communication du 27 mars.

La deuxième observation d'importance est l'affaiblissement du rayonnement avec la distance séparant l'échantillon de la plaque photographique montrant que l'air absorbe une partie du rayonnement. L'effet est visible dès que la distance est de 3mm.

Enfin l'observation la plus décisive survient le 7 mars 1896 : le rayonnement ionise l'air, c'est-à-dire qu'il crée des "corps électrisés". Cette ionisation rend possible la mesure quantitative de l'intensité du rayonnement. **"j'ai observé récemment que les radiations invisibles émises dans ces conditions ont la propriété de décharger les corps électrisés soumis à leur rayonnement"**

Dès lors le rayonnement peut être étudié suivant deux méthodes distinctes : la méthode photographique qui donne des résultats qualitatifs et la méthode électrique qui peut fournir des valeurs numériques.

Il peut ainsi démontrer que la production de ces nouveaux rayons n'est pas liée à la phosphorescence, puisque ceux-ci apparaissent dans tous les sels d'uranium qu'il a étudiés, qu'ils soient phosphorescents ou non.

Mieux encore, seuls les composés d'uranium donnent lieu à l'émission des nouveaux rayonnements. Et lorsqu'il remplace les sels d'uranium par de l'uranium métallique, il observe un rayonnement quatre à cinq fois plus importants (communication lors de la séance du 18 mai 1896). Il ne fait, dès lors, aucun doute que le rayonnement nouveau est une propriété atomique.

RAYONS URANIQUES



Dans une nouvelle communication du 23 novembre 1896, sa dernière de l'année sur le sujet, Becquerel désigne ces rayons invisibles sous le nom de rayons uraniques. Il constate, une fois pour toute, que **"la durée de l'émission de ces rayons uraniques est tout à fait en dehors des phénomènes ordinaires de phosphorescences"**, et il s'interroge encore **"d'où l'uranium emprunte l'énergie qu'il émet avec une si longue persistance"**.

Cherchant d'abord à démontrer, de façon rationnelle, une idée logique — celle selon laquelle l'émission de rayons X accompagnerait la fluorescence — Becquerel, grâce à sa persévérance et une méthode expérimentale systématique et rigoureuse, parvient à montrer que le phénomène recherché n'existe pas.

Cependant, il demeure le seul de la communauté scientifique à s'intéresser à ce phénomène, et sa découverte est perçue comme secondaire, tant elle était concentrée sur les fabuleux rayons X. En 1896, 1000 publications portent sur les rayons X et, à peine, une dizaine sur les radiations de l'uranium.

Le grand public n'en entend même pas parler, au contraire des rayons X. On peut ainsi lire dans l'Almanach Hachette de 1897 : **"C'est bien l'invisible que nous montrent ces mystérieux rayons X, dont tout le monde a entendu parler, et qui constituent certainement la plus intéressante découverte de l'année 1896. Reproduire l'os caché sous la chair, l'arme ou le projectile resté dans la blessure ; lire dans le corps humain tout entier — dans la pensée peu-être ! — compter les pièces de monnaie à travers la bourse soigneusement fermée ; aller chercher, derrière l'enveloppe close et scellée, le secret de nos plus intimes confidences; ce sont aujourd'hui jeux d'enfants pour le premier amateur venu. Et que faut-il pour exécuter ces prodiges ? Bien peu de chose. Une bobine d'induction, une ampoule de verre, et une simple plaque photographique."**

Les rayons de l'uranium, beaucoup plus faibles (il faut des heures d'exposition alors que 10 minutes suffisent avec les rayons X), ne semblent présenter aucun intérêt pratique.

Henri Becquerel conclut ainsi cette année 1896 consacrée à l'étude des rayons uraniques :

"L'uranium et tous les sels de ce métal émettent un rayonnement invisible et pénétrant qui produit des actions chimiques photographiques et décharge à distance les corps électrisés. Ce rayonnement paraît avoir une intensité constante, indépendante du temps, et n'être influencé par aucune cause excitatrice extérieure connue. Il paraît donc spontané. Il traverse les métaux, le papier noir et les corps opaques pour la lumière.

La plaque photographique et l'électroscope forment les bases de deux méthodes d'investigation pour étudier le nouveau rayonnement. La propriété radiante est liée à la présence de l'uranium ; c'est une propriété atomique indépendante de l'état moléculaire des composés."

Fin 1896, estimant avoir épuisé le sujet, Becquerel lui-même abandonne pour plusieurs années l'étude des radiations de l'uranium, et passe à autre chose.

Un souffle nouveau venu de l'Est



Mais la situation est sur le point de changer. Un nouveau souffle vient d'arriver de l'Est, de la Pologne. Privée d'accès aux études supérieures malgré d'excellentes notes au lycée, Marya Sklodowska quitte, en 1891, Varsovie pour rejoindre à Paris sa sœur aînée Bronia, fraîchement diplômée en médecine.

Après son arrivée à Paris, Marya Sklodowska s'inscrit à la Faculté des sciences. En juillet 1893, après deux années vécues à Paris dans des conditions très difficiles, elle obtient la licence de physique, première de sa promotion, puis, l'année suivante, la licence de mathématiques, où elle se classe deuxième.



Dès cette période, elle collabore avec Pierre Curie, que lui a présenté un ami polonais Josef Kowalski. Pierre est alors chef des travaux de physique à l'École municipale de physique et de chimie industrielles (EPCI), sur des recherches portant notamment sur le magnétisme. Leur collaboration scientifique se transforme rapidement en relation personnelle : le 26 juillet 1895, ils se marient. Deux ans plus tard, leur première fille, Irène, voit le jour.

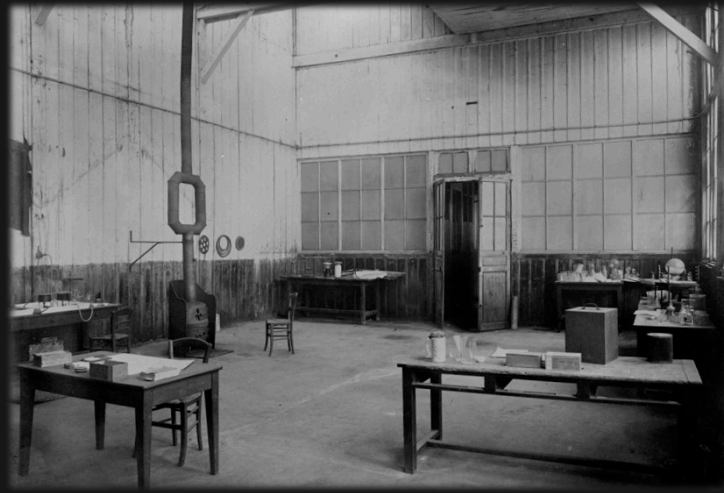
Pierre Curie est le fils d'une famille de médecins alsaciens. Avec son frère Jacques, ils ont découvert la piezo électricité (production d'électricité par la compression ou l'étirement de certains cristaux).

Un sujet de thèse : les rayons uraniques



C'est à ce moment-ci que Marya, devenue Marie, décide d'entamer ses recherches en vue d'obtenir un doctorat en sciences ! Aucune femme n'a jusque-là soutenue de thèse en France. Pierre suggéra à Marie, de reprendre l'étude des rayons uraniques abandonnée par Becquerel.

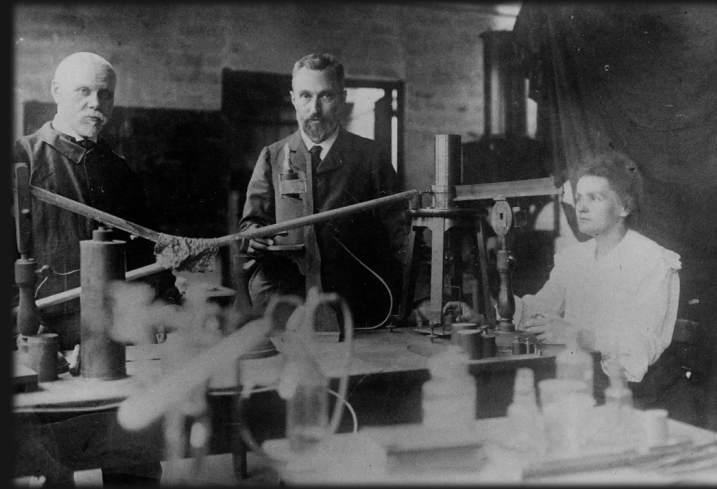
Les rayons uraniques ... saison 2



Grâce à Pierre, qui a sollicité le directeur de l'ECPI, Paul Schutzenberger – issu d'une famille alsacienne de brasseurs portant le même nom, homme intelligent et libéral – elle obtient l'autorisation d'installer son laboratoire dans un hangar désaffecté aux conditions très spartiate.

Les premiers résultats obtenus par Marie révèlent une perspective tellement prometteuse que Pierre décide d'abandonner ses propres investigations pour unir ses efforts à ceux de Marie. Leur collaboration s'enrichit rapidement, donnant naissance à un projet d'envergure titanesque.

Les rayons Radioactifs. . saison 2



Ils décident d'utiliser exclusivement la méthode électrique, qui consiste à mesurer la conductivité que l'air acquiert sous l'influence des substances émettant les rayons uraniques. Pierre conçoit alors un dispositif capable de mesurer cette électricité : une chambre d'ionisation – un convertisseur transformant la radioactivité en courant électrique – et un électroscope couplés à un système à quartz piézoélectrique. La mesure repose sur la comparaison entre l'électricité générée par les rayons et celle produite par le quartz piézoélectrique.

La première question qui les animait était la suivante : d'autres substances que l'uranium peuvent-elles émettre des rayons ?

Après avoir étudié minutieusement une grande variété de minerais fournis par leurs collègues des laboratoires parisiens, ils ont rapidement constaté que la réponse était affirmative. Le thorium, par exemple, s'est avéré être une source de rayonnements similaires ; cette découverte a été annoncée le 12 avril 1898. Ces observations ont montré que le phénomène observé n'était pas l'apanage exclusif de l'uranium, mais une propriété atomique. Il était donc nécessaire de revoir la terminologie employée.

Ainsi, le « rayonnement uranique », trop restrictif, a cédé la place au terme radioactivité, ou plus précisément à la notion d'« activité radiante » (18 juillet 1898).

Cette évolution lexicale a permis de rendre compte, de façon plus juste, de la nature universelle du phénomène : plusieurs éléments, et non seulement l'uranium, sont capables d'émettre des radiations.

Radioactivité

- Le thorium également
- La pechblende



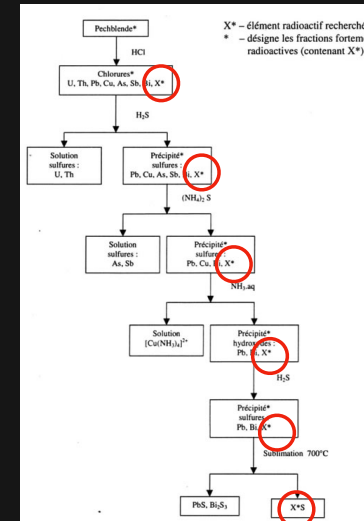
Les Curie sont frappés par un détail : des minéraux contenant de l'uranium, la pechblende ou la chalcopite, sont nettement plus radioactifs que l'uranium pur sous forme métallique. Cette différence d'intensité les amène à en déduire que ces roches renferment, en très petite proportion, une matière extraordinairement active, distincte des substances déjà connues à l'époque.

En d'autres termes, la radioactivité observée ne provient pas uniquement de l'uranium lui-même, mais aussi d'un autre constituant présent dans ces minéraux, dont la nature reste alors encore inconnue.

Reste donc à extraire de la pechblende cette nouvelle substance radioactive. Pechblende signifie « fausse poix » en allemand, de pech (« poix ») et blende (« trompeur »). Le minerai d'U, qui se trouvait en abondance dans les mines d'argent, était extrait des mines de Joachimsthal (aujourd'hui Jáchymov, République tchèque) pour l'industrie verrière et la fabrication de colorant des verres. La pechblende est un résidu non utilisable.

Radioactivité

- Le thorium également
- La pechblende
- Un nouvel élément très radioactif ?



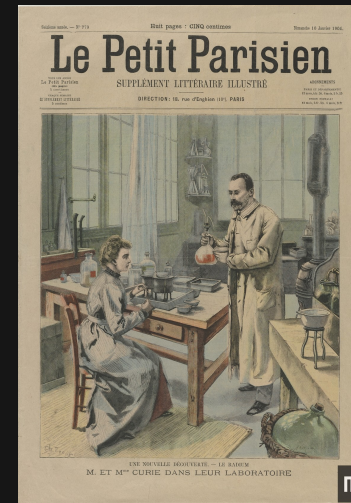
Fort de l'obtention, grâce à la générosité du gouvernement autrichien, d'une première tonne de pechblende, Pierre et Marie Curie se lancent alors dans une série d'opérations chimiques .

Ils commencent par réduire le minerai en fine poudre, puis le dissolvent dans des acides appropriés. À chaque étape successive de filtration et de précipitation, ils récupèrent un résidu de plus en plus purifié.

Il faut souligner l'ampleur du défi : il faut traiter plusieurs milliers de kilogrammes de pechblende pour ne récupérer que quelques décigrammes de matière ultra-active, dont la puissance dépasse largement celle du minerai d'origine (5 millions de fois).

Radioactivité

- Le thorium également
- La pechblende
- Un nouvel élément très radioactif ?



Les Curie constatent que cette nouvelle matière ne correspond à aucun des éléments répertoriés. Ils annoncent alors la découverte de deux nouveaux éléments : Le polonium, identifié le 18 juillet 1898 (son nom rend hommage à la Pologne, terre natale de Marie Skłodowska-Curie) et le radium, mis en évidence le 26 décembre 1898.

L'année suivante, un troisième élément sera isolé par un collaborateur des Curie, André-Louis Debierne, à partir du même processus : l'actinium.

Radioactivité

- Le thorium également
- La pechblende
- Un nouvel élément très radioactif ?
- Polonium, Radium, Actinium

1 H Hydrogen [1.008]	2 He Helium [4.003]																	10 Ne Neon [20.180]	11 Na Sodium [22.990]	12 Mg Magnesium [24.305]	13 Al Aluminium [26.982]	14 Si Silicon [28.086]	15 P Phosphorus [30.974]	16 S Sulfur [32.06]	17 Cl Chlorine [35.45]	18 Ar Argon [39.948]	19 K Potassium [39.098]	20 Ca Calcium [40.078]	21 Sc Scandium [44.956]	22 Ti Titanium [47.867]	23 V Vanadium [50.942]	24 Cr Chromium [51.996]	25 Mn Manganese [54.938]	26 Fe Iron [55.845]	27 Co Cobalt [58.933]	28 Ni Nickel [58.693]	29 Cu Copper [63.546]	30 Zn Zinc [65.38]	31 Ga Gallium [69.723]	32 Ge Germanium [72.630]	33 As Arsenic [74.922]	34 Se Selenium [78.96]	35 Br Bromine [79.904]	36 Kr Krypton [83.798]	37 Rb Rubidium [85.468]	38 Sr Strontium [87.62]	39 Y Yttrium [88.906]	40 Zr Zirconium [91.224]	41 Nb Niobium [92.906]	42 Mo Molybdenum [95.94]	43 Tc Technetium [98]	44 Ru Ruthenium [101.07]	45 Rh Rhodium [102.905]	46 Pd Palladium [106.36]	47 Ag Silver [107.868]	48 Cd Cadmium [112.414]	49 In Indium [114.818]	50 Sn Tin [118.710]	51 Sb Antimony [121.757]	52 Te Tellurium [127.6]	53 I Iodine [126.905]	54 Xe Xenon [131.29]	55 Cs Cesium [132.905]	56 Ba Barium [137.327]	57 La Lanthanum [138.905]	58 Ce Cerium [140.12]	59 Pr Praseodymium [140.908]	60 Nd Neodymium [144.24]	61 Pm Promethium [145]	62 Sm Samarium [150.36]	63 Eu Europium [151.964]	64 Gd Gadolinium [157.25]	65 Tb Terbium [158.925]	66 Dy Dysprosium [162.50]	67 Ho Holmium [164.930]	68 Er Erbium [167.259]	69 Tm Thulium [168.934]	70 Yb Ytterbium [173.054]	71 Lu Lutetium [174.967]	72 Hf Hafnium [178.49]	73 Ta Tantalum [180.948]	74 W Tungsten [183.84]	75 Re Rhenium [186.207]	76 Os Osmium [190.23]	77 Ir Iridium [192.222]	78 Pt Platinum [195.084]	79 Au Gold [196.967]	80 Hg Mercury [200.592]	81 Tl Thallium [204.38]	82 Pb Lead [207.2]	83 Bi Bismuth [208.98]	84 Po Polonium [209]	85 At Astatine [210]	86 Rn Radon [222]	87 Fr Francium [223]	88 Ra Radium [226]	89 Ac Actinium [227]	90 Th Thorium [232]	91 Pa Protactinium [231]	92 U Uranium [238]	93 Np Neptunium [237]	94 Pu Plutonium [244]	95 Am Americium [243]	96 Cm Curium [247]	97 Bk Berkelium [247]	98 Cf Californium [251]	99 Es Einsteinium [252]	100 Fm Fermium [257]	101 Md Mendelevium [258]	102 No Nobelium [259]	103 Lr Lawrencium [262]	104 Rf Rutherfordium [261]	105 Db Dubnium [262]	106 Sg Seaborgium [266]	107 Bh Bohrium [264]	108 Hs Hassium [277]	109 Mt Meitnerium [268]	110 Ds Darmstadtium [271]	111 Rg Roentgenium [272]	112 Cn Copernicium [285]	113 Nh Nihonium [284]	114 Fl Flerovium [289]	115 Mc Moscovium [288]	116 Lv Livermorium [293]	117 Ts Tennessine [289]	118 Og Oganesson [294]
-------------------------------	------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	------------------------------	--------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------	-----------------------------------	------------------------------	---------------------------------	-------------------------------	----------------------------------	---------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	---------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	-----------------------------	---------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	--------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------	----------------------------------	---------------------------------	------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	--------------------------------	-------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	------------------------------------	--------------------------------	---------------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	------------------------------------	----------------------------------	------------------------------------	----------------------------------	---------------------------------	----------------------------------	------------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------	----------------------------------	--------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	-----------------------------	---------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	----------------------------	-------------------------------	-----------------------------	-------------------------------	------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------	--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	-----------------------------	--------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	-------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------	----------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	----------------------------------	------------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	---------------------------------

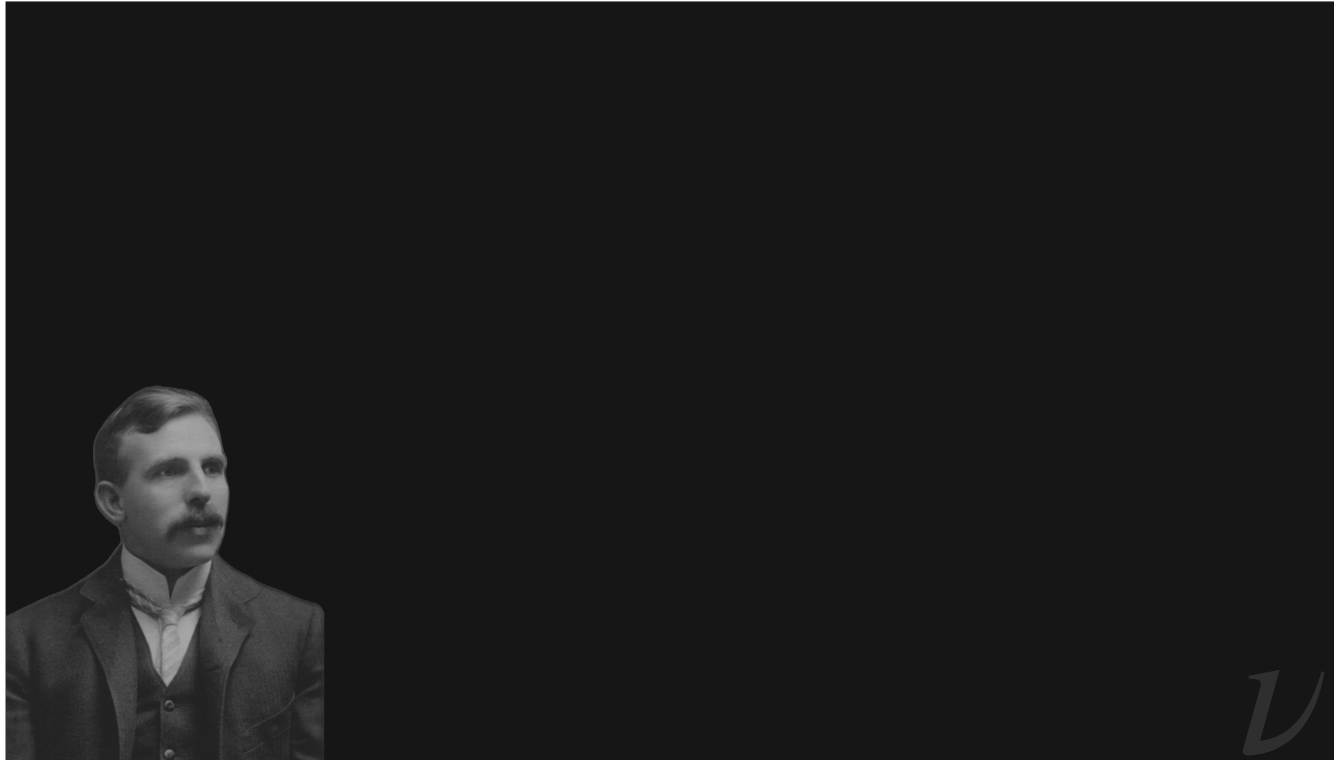
Grâce à leurs travaux, les Curie ouvrent une toute nouvelle ère :

Ils mettent au jour de nouveaux éléments (polonium, radium, puis actinium), confirmant que la radioactivité ne se limite pas à l'uranium.

Ils inventent une méthode d'identification des éléments basée sur leurs propriétés radioactives : la radiochimie. Cette approche se révèle des milliers de fois plus sensible que les techniques spectrales de l'époque, permettant de détecter des quantités infinitésimales de matière.

Enfin, et surtout, ils fournissent aux physiciens une source radioactive d'une intensité sans précédent. Cette source rend possible l'étude détaillée de la nature des rayonnements ouvrant la voie à la physique nucléaire moderne.

Ce dernier apport transforme radicalement la recherche : les rayonnements, jusque-là mystérieux, deviennent accessibles à l'expérimentation, et la compréhension du monde atomique va s'accélérer de façon décisive.



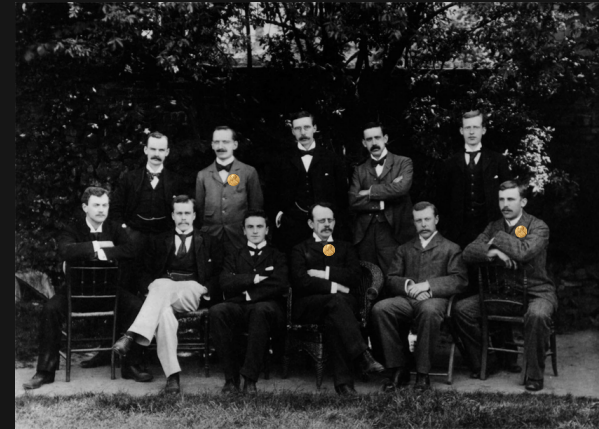
Celui qui saura exploiter pleinement les découvertes des Curie et qui deviendra l'un des acteurs les plus prolifiques de cette nouvelle discipline, c'est sans doute Ernest Rutherford.

Né en Nouvelle-Zélande, Rutherford se distingue dès le collège : il termine premier de sa classe dans toutes les matières, tout en étant un rugbyman passionné et talentueux. À l'université, il obtient un Bachelor ès sciences et se spécialise dans l'expérimentation en électromagnétisme, notamment sur les techniques de pointe de la téléphonie sans fil (ondes radio).

Grâce à ces résultats exceptionnels, il reçoit une bourse réservée aux ressortissants de l'Empire britannique et décide de se consacrer à la recherche fondamentale au laboratoire Cavendish, dirigé par J.J. Thomson.

Ernest Rutherford, père de la physique nucléaire

- Cambridge 1895-1898



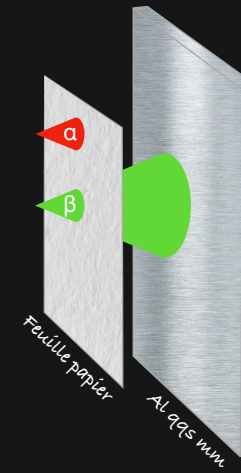
Doctorants de JJ Thomson, 1897

CTR Wilson (chambre à brouillard), JJ Thomson, E Rutherford

Il arrive à Cambridge en décembre 1895, juste après la découverte des rayons X par Röntgen. Avec Thomson, il étudie les effets des rayons X lorsqu'ils traversent différents gaz. Il montre que ces rayons ionisent l'air, produisant des particules chargées ; cela suggère déjà qu'ils sont, comme la lumière, une forme de rayonnement électromagnétique. La preuve décisive ne viendra cependant qu'en 1912, grâce aux expériences de diffraction de Max von Laue, qui confirmeront que les rayons X sont bien des ondes du champ électromagnétique.

Ernest Rutherford, père de la physique nucléaire

- Cambridge 1895-1898 : α , β



Dès l'annonce, par Henri Becquerel, de la découverte des rayons provenant de l'uranium, Rutherford entreprend une étude systématique de la pénétration de ces radiations dans différents matériaux.

Lors de ses expériences, il remarque qu'une partie du rayonnement est très facilement absorbée par de fines feuilles d'aluminium, par une simple feuille de papier, voire par quelques centimètres d'air. En revanche le rayonnement qui franchit ce premier filtre se montre indépendant du matériau utilisé.

Il en déduit que les rayons uraniques sont en réalité composés de deux constituants : Le premier, très peu pénétrant, est absorbé dès qu'il rencontre un obstacle léger ;

le second traverse aisément toutes les substances testées sans perte notable d'intensité.

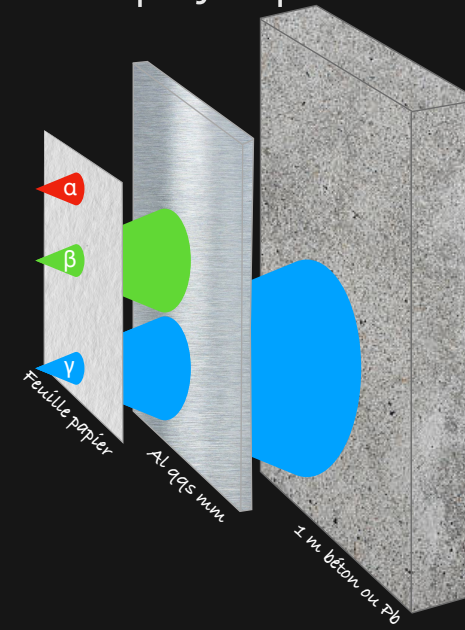
Ces observations, qui constituent le sujet de sa thèse de doctorat, le conduisent à formuler la conclusion suivante :

"Ces expériences montrent que le rayonnement de l'uranium est complexe et qu'il comporte au moins deux types distincts de rayonnements – l'un qui est très facilement absorbé et que l'on appellera par commodité le rayonnement α , et l'autre de caractère plus pénétrant qui sera appelé le rayonnement β ."

Il n'exclut pas cependant la présence d'une autre composante encore plus pénétrante.

Ernest Rutherford, père de la physique nucléaire

- Cambridge 1895-1898 : α , β , γ

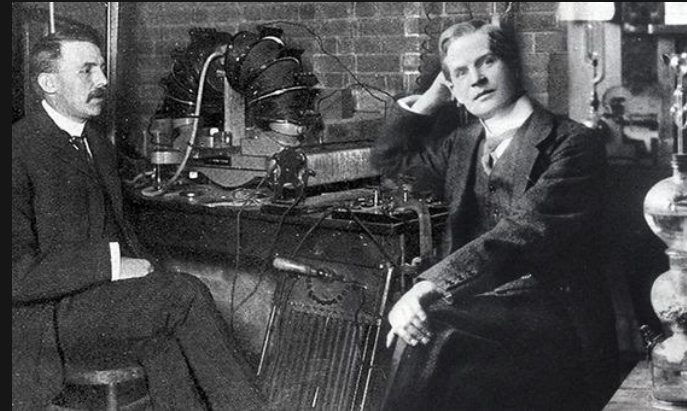


Ce dernier type de rayonnement sera identifié par Paul Villard en 1900. Il est 160 fois plus pénétrant que les rayons β , et n'est pas déviable. Ce rayonnement sera logiquement appelé rayonnement gamma.

Ces dénominations furent assez rapidement acceptées par tous les chercheurs et sont encore utilisées aujourd'hui.

Ernest Rutherford, père de la physique nucléaire

- Montréal 1898-1906 : transmutation
demi-vie



Les alchimistes 1905

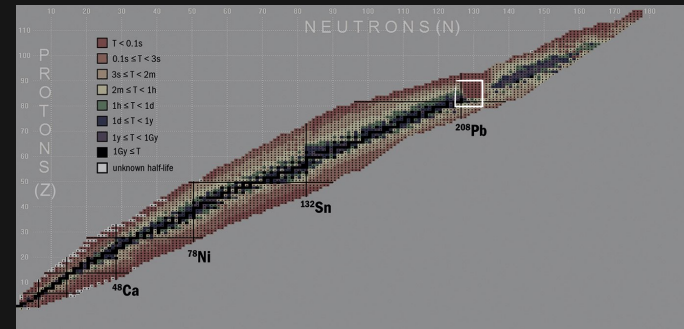
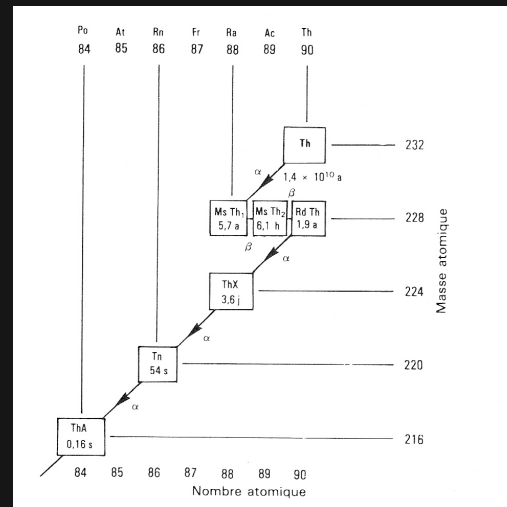
Après trois années à Cambridge, Rutherford, alors âgé de 26 ans, obtient en 1898 la chaire de physique à l'Université McGill, à Montréal. Le financement de poste ainsi que celui du laboratoire de physique qui lui est attaché est assuré par un millionnaire du tabac, un certain MacDonald. C'est là qu'il fait la rencontre déterminante du chimiste Frederick Soddy, collaboration qui ouvrira la voie à ses futures découvertes majeures en physique nucléaire.

En 1902, ils publient un article intitulé "**the Cause and Nature of Radiation**". Cet article synthétise trois années de travail conjoint, considérées comme l'une des collaborations les plus fructueuses jamais réalisée entre un physicien et un chimiste Soddy, à propos de cette période déclara : "**Rutherford... m'a séduit. J'ai tout abandonné pour le suivre, et pendant plus de deux ans ma vie scientifique est devenue d'une agitation rare au cours d'une existence humaine.**" Cette citation illustre parfaitement le charisme de Rutherford, capable d'attirer autour de lui des esprits brillants prêts à consacrer toute leur énergie à la recherche.

Cet article est révolutionnaire : ils montrent, grâce à leurs expériences, que le rayonnement radioactif est du à la transformation spontanée d'un élément chimique donné — dans leur cas le thorium — en un autre élément chimique distinct. Cette découverte renverse le dogme des chimistes, selon lequel l'atome est indivisible et immuable. Ils se réapproprient même le terme de transmutation, jadis cantonné à l'alchimie.

Rutherford et Soddy montrent que la transmutation d'un élément radioactif s'accompagne par une diminution régulière de son activité. Cette baisse suit une loi exponentielle propre à chaque produit de désintégration : plus le temps passe, plus le nombre d'atomes capables d'émettre des particules diminue de façon prévisible. Cette observation a permis de définir la demi-vie de chaque produit.

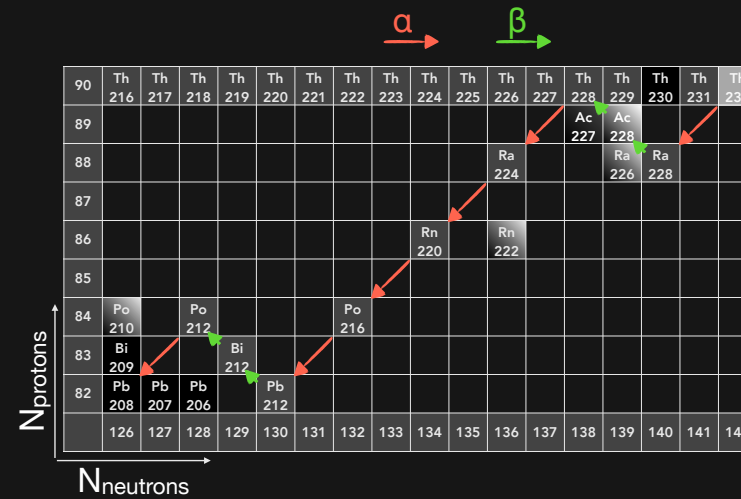
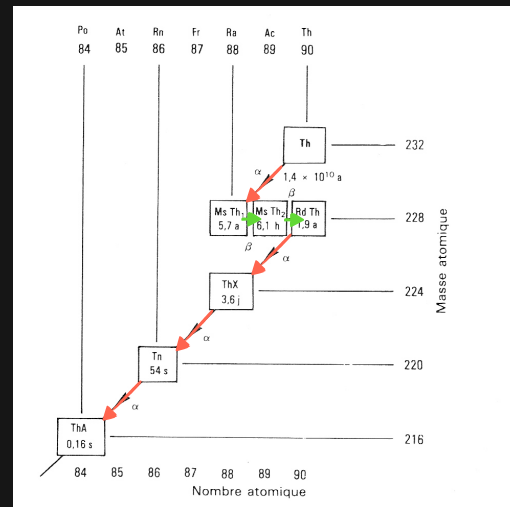
Ernest Rutherford, père de la physique nucléaire



Chaine de décroissance radioactive du Thorium : Ms = Mésothorium; Rd = Radiothorium, Tn = Thoron. Case noire isotope présents dans la nature, case gris/noir présent dans la nature mais pas stable

À l'époque, l'isotopie n'était pas encore connue ; ce ne sera qu'en 1913 que Frederick Soddy la décrira, précisément pour rendre compte de la chaîne radioactive du thorium. On désigne deux nuclides d'un même élément chimique comme étant des isotopes lorsqu'ils possèdent le même nombre de protons tout en différant par le nombre de neutrons. Le mot isotope est forgé à partir des deux mots grecs iso, égal, et topos, lieu. Tous les isotopes d'un même élément occupent la même place dans la classification de Mendeleev.

Ernest Rutherford, père de la physique nucléaire



Une anecdote raconte comment Rutherford a découvert la présence d'un nouvel élément :

Au cours de l'été de 1899, Rutherford fait une observation étonnante : après avoir placé un échantillon radioactif sur le plateau inférieur d'une chambre d'ionisation afin de mesurer le courant d'ionisation généré par le rayonnement, il remarque que :

"La sensibilité de l'oxyde de thorium à de faibles courants d'air est remarquable. Le mouvement de l'air, provoqué par l'ouverture ou la fermeture d'une porte à l'extrémité de la pièce opposée à l'endroit où est placé l'appareillage, est souvent suffisant pour diminuer considérablement la vitesse de décharge [...]"

Quand l'appareillage est placé dans une enceinte fermée, pour supprimer les courants d'air, on trouve que l'intensité est pratiquement constante."

De cette observation, Rutherford conclut que :

"En plus du rayonnement ordinaire, j'ai trouvé que les composés de thorium émettent continûment des particules radioactives d'une certaine sorte, qui conservent leurs propriétés radioactives pendant plusieurs minutes. Cette « émanation », comme nous l'appellerons pour être bref, a le pouvoir d'ioniser le gaz dans son voisinage..."

L'émanation en question c'est le Radon, gaz radioactif naturel inodore, incolore et inerte.

Ernest Rutherford, père de la physique nucléaire

- Manchester 1907-1919

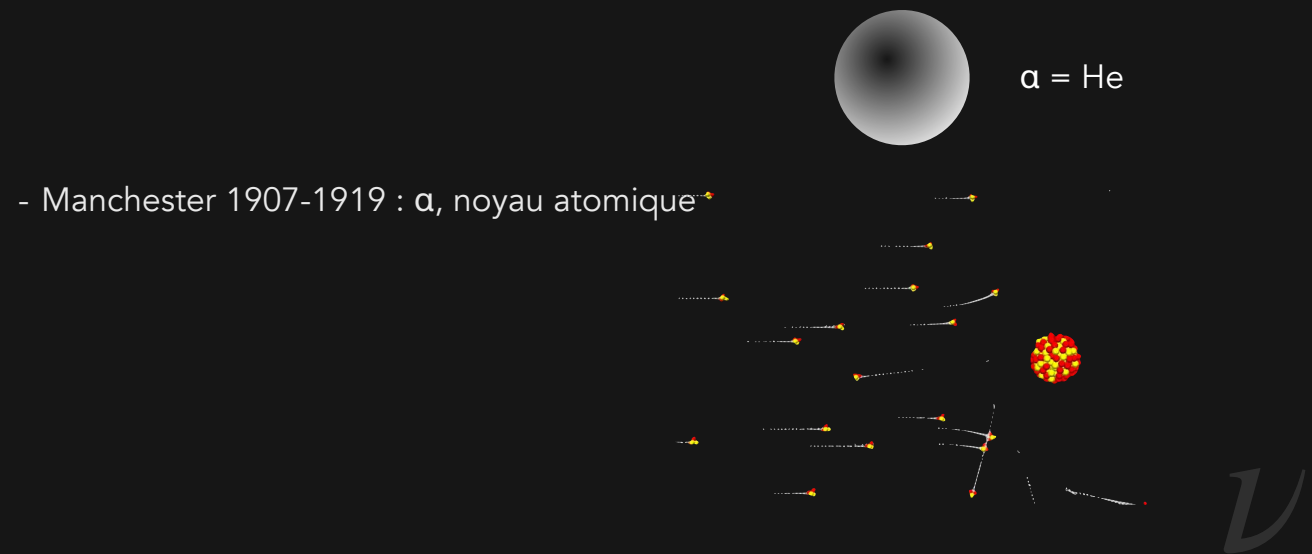


Laboratoire physique 1911

Hans Geiger et Edouard Marsden

En 1907, Rutherford retourne en Angleterre, où l'université de Manchester lui propose une chaire de physique. C'est le début d'une période extraordinairement prolifique.

Ernest Rutherford, père de la physique nucléaire



Avec son assistant Hans Geiger, il identifie d'abord le rayonnement alpha comme étant composé d'atomes d'hélium privés de leurs électrons. L'année suivante, il reçoit le Prix Nobel de ... Chimie, ce qui lui fera dire que le comité Nobel a réussi la transmutation d'un physicien en chimiste.

Sa découverte majeure survient en 1909 : la découverte du noyau atomique, toujours aux côtés de Geiger et d'un jeune étudiant, Ernest Marsden suite à l'observation stupéfiante de particules alpha, provenant d'une source de radium (leur vitesse est de l'ordre de 15000 km/s), rebondissant sur une feuille d'or. C'est aussi incroyable, dira-t-il, que si vous aviez tiré un obus de 375 kg sur un morceau de papier de soie et qu'il était revenu vous frapper. Cette observation spectaculaire le conduit, en 1911, à proposer le modèle planétaire de l'atome, où les électrons gravitent autour d'un petit noyau dense et chargé positivement.

Ernest Rutherford, père de la physique nucléaire

- Cambridge 1919-1937



Cavendish 1932

Prix Nobel de gauche à droite : Chadwick, Thomson, Walton, Rutherford, Wilson, Blackett, Cockcroft

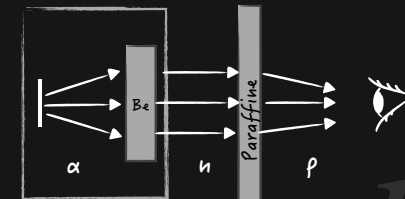
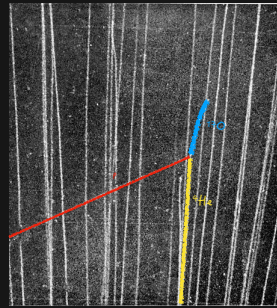
En 1919, la direction du laboratoire Cavendish propose à Ernest Rutherford de succéder à J.J. Thomson. Il accepte et reste très actif dans la physique expérimentale.

Ernest Rutherford, père de la physique nucléaire



$$\alpha = \text{He} = 2p + 2n$$

- Cambridge 1919-1937 : proton, neutron



Sous sa direction, Patrick Blackett découvre le proton grâce à une chambre à brouillard conçue par C.T.R. Wilson perfectionnée par le japonais Shimizu et par Blackett même, toujours sous la houlette de Rutherford.

Une fois le proton solidement établi parmi les particules élémentaires, Rutherford s'interroge sur la nature des isotopes. En 1920, lors de la fameuse conférence Baker (une tradition qui remonte à 1774), il avance l'hypothèse d'une particule neutre de masse comparable à celle du proton. Il la conçoit non pas comme une nouvelle entité, mais comme l'association intime d'un proton et d'un électron. Le raisonnement est celui du tube dentifrice : si un électron sort du noyau, lors de la radioactivité beta, c'est qu'il était auparavant présent dans le noyau.

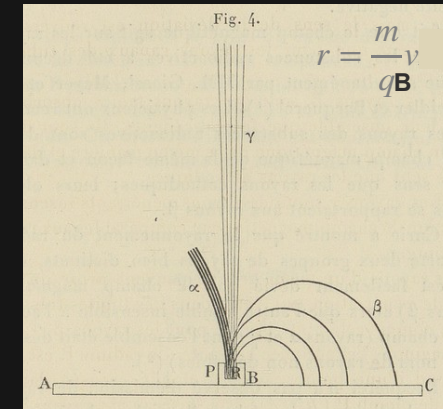
C'est finalement un autre chercheur du Cavendish, James Chadwick, qui confirme l'existence du neutron. Son parcours est presque fortuit : souhaitant s'inscrire en mathématiques à l'Université de Manchester, il se trompe de guichet et, entouré d'étudiants en physique, finit par s'inscrire dans cette discipline. En 1913, il obtient son master sous la direction de Rutherford, côtoyant alors des figures majeures telles que Geiger, Marsden et Bohr – un cadre idéal pour quiconque s'intéresse à l'atome.

Boursier, il part travailler avec Hans Geiger au Reichs-Institut de Berlin. La Première Guerre mondiale éclate ; il est arrêté et passe le reste du conflit dans un camp de prisonniers civils. À son retour, il est nommé professeur à Cambridge, où il collabore étroitement avec Rutherford sur la transmutation nucléaire induite par les rayons α . Ces recherches le conduisent, en 1932, à la découverte du neutron.

Mais nous voilà égarés dans le temps. Reculons un instant, jusqu'aux premières années du siècle précédent.

Un rayonnement hétérogène

- α : noyaux d'He
- β : électrons



A cette époque, on sait déjà que la radioactivité est une propriété intrinsèque de l'atome et que le rayonnement qu'elle engendrait est complexe. Au delà des expériences déjà évoqués, les scientifiques ont soumis le rayonnement à l'action de champs magnétiques. Ceux-ci dévient la trajectoire rectiligne des constituants du rayonnement selon des caractéristiques propres à leur charge électrique et à leur masse.

On est ainsi conduit à distinguer trois composantes qui, selon la nomenclature de Rutherford, sont :

- le rayonnement alpha, le plus intense, est le moins pénétrant. Il est difficilement dévié par un champ magnétique dans le sens opposé à celui des rayons cathodiques. Ces derniers étant constitués, comme l'a montré JJ Thomson, d'électrons porteurs d'une charge négative. La différence de comportement indique que le rayonnement alpha est constitué de particules porteurs d'une charge positive. Rutherford mesure le rapport charge sur masse en 1908 et montre que les rayons alpha sont des atomes d'hélium dépourvus de leurs électrons.
- Le rayonnement beta est plus pénétrant et il est dévié de la même manière et dans le même sens que les rayons cathodiques sous l'effet d'un champ magnétique. En décembre 1899, Becquerel constate que le rapport charge sur masse des rayons beta correspond exactement à celui mesuré par JJ Thomson pour les rayons cathodiques. Les constituants des rayons beta sont donc, comme ceux des rayons cathodiques, des électrons.
- Le rayonnement gamma est le plus pénétrant de tous et il est insensible à l'action du champ magnétique. Marie Curie suggère que ce rayonnement est identique à des rayons X : Il s'agit d'une forme de rayonnement électromagnétique, comparable à la lumière.

La nature du rayonnement étant plus ou moins bien connue, la question centrale est de savoir quelle en est son origine : **"la cause de la radioactivité spontanée reste mystérieuse, et ce phénomène est toujours pour nous une énigme et un sujet d'étonnement profond"** écrit Marie Curie dans sa thèse en 1904.

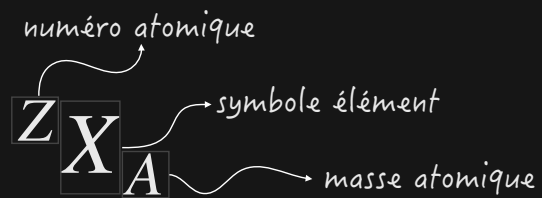
La question fondamentale est d'où vient l'énergie qui se manifeste sous forme de rayonnement des corps radioactifs ? Est-elle immanente, c'est-à-dire inhérente aux substances elles-mêmes ou transcendante provenant de sources extérieures ?

Parmi les hypothèses extérieures, Marie Curie évoque la gravitation (une idée surprenante) ou des rayonnements inconnus, venant de l'espace ou du soleil, ...

C'est finalement Rutherford et Soddy qui ont apporté la bonne explication : la radioactivité résulte d'une transmutation atomique c'est-à-dire le changement d'un isotope en un autre isotope, accompagné de l'émission de particules.

Un processus nucléaire

- α : ${}^{90}\text{Th}_{232} \rightarrow {}^{88}\text{Ra}_{228} + {}^2\text{He}_4$
- β : ${}^{88}\text{Ra}_{228} \rightarrow {}^{89}\text{Ac}_{228} + e^-$
- γ : ${}^{87}\text{Ac}_{228}^* \rightarrow {}^{87}\text{Ac}_{228} + \gamma$



Depuis la découverte du noyau atomique, les physiciens comprennent que la radioactivité résulte d'une transformation interne du noyau, sans toutefois connaître l'origine de l'énergie qui alimente ce processus.

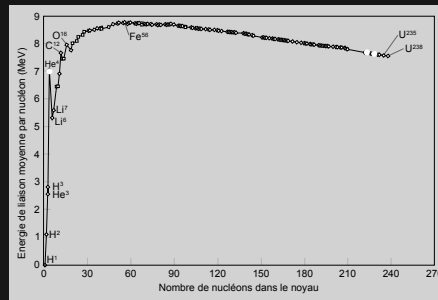
${}^{88}_{141}\text{Ra}_{228}$

Ce mystère ne sera élucidé qu'au cours des années 1930 avec la découverte du neutron par James Chadwick.

Rappel des fondamentaux

- énergie de liaison : $B = (Z_p m_p + N_n m_n - M_{\text{noyau}}) c^2$

- bilan énergétique : $Q = [M(^{232}\text{Th}) - M(^{228}\text{Ra}) - M(\alpha)] c^2$



↓

$$Q = (B_{^{228}\text{Ra}} + B_{\alpha}) - B_{^{232}\text{Th}} \approx 4.1 \text{ MeV}$$

Pour comprendre d'où vient l'énergie des particules émises lors d'un rayonnement radioactif, il faut d'abord revoir quelques notions fondamentales.

Le noyau atomique est un agrégat de protons et de neutrons tenus ensemble par la force forte, véritable colle qui agit à très courte distance .

Pour séparer ces protons et neutrons, il faut fournir une certaine quantité d'énergie, appelée énergie de liaison.

Inversement, lorsqu'on assemble un noyau à partir de protons et de neutrons, la même quantité d'énergie est libérée.

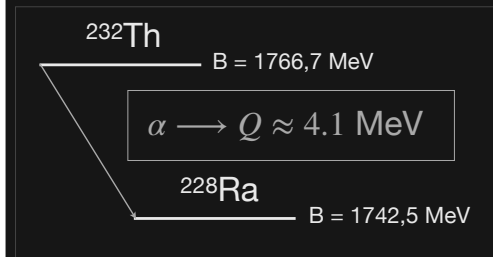
A cause de cette libération d'énergie, la masse d'un noyau est légèrement inférieure à la somme des masses de ses constituants. Ce « déficit de masse » se traduit, via la relation d'Einstein ($E=mc^2$), en énergie de liaison qui maintient les nucléons ensemble. Généralement on considère l'énergie de liaison par nucléon, c'est-à-dire l'énergie requise pour extraire un proton ou un neutron du noyau.

La valeur Q représente le bilan énergétique d'une réaction nucléaire. Prenons l'exemple de la désintégration alpha du ^{232}Th : on calcule Q en soustrayant la masse totale des produits ^{228}Ra et alpha de la masse du ^{232}Th . Le ^{228}Ra est plus stable que le thorium ; il possède une énergie de liaison par nucléon plus élevée, tout comme la particule alpha qui est exceptionnellement liée. Cette amélioration globale de la stabilité entraîne un Q positif, donc de l'énergie libérée.

Rappel des fondamentaux

- énergie de liaison : $B = (Z_p m_p + N_n m_n - M_{\text{noyau}}) c^2$

- bilan énergétique : $Q = [M(^{232}\text{Th}) - M(^{228}\text{Ra}) - M(\alpha)] c^2$

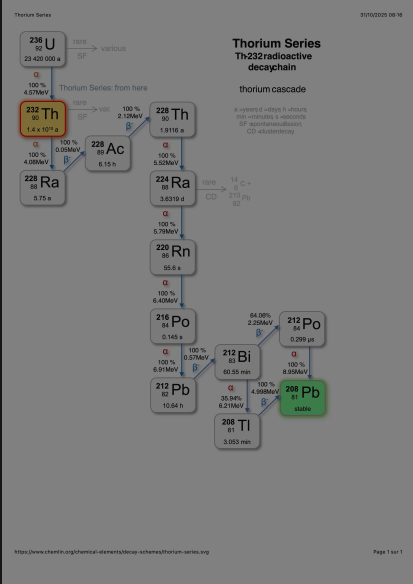


$$Q = (B_{^{228}\text{Ra}} + B_{\alpha}) - B_{^{232}\text{Th}} \approx 4.1 \text{ MeV}$$

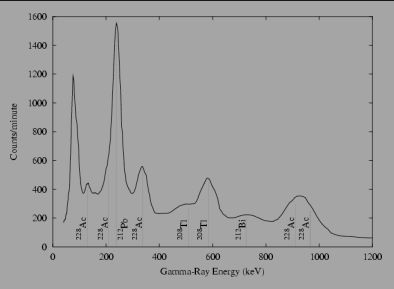
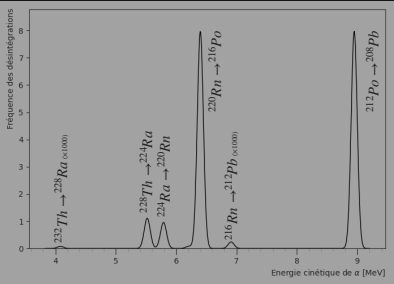
Comme la quantité de mouvement totale doit rester constante, l'énergie cinétique se partage proportionnellement à l'inverse des masses des fragments. Dans notre cas, presque toute l'énergie (environ 98 % du Q) apparaît sous forme d'énergie cinétique de la particule α , le reste allant au radium.

Une application numérique nous permet d'estimer la vitesse des particules alpha, elle est de 15000 km/s et son énergie est de l'ordre de 4 MeV. Cette énergie bien définie produit les pics caractéristiques que l'on observe dans le spectre α .

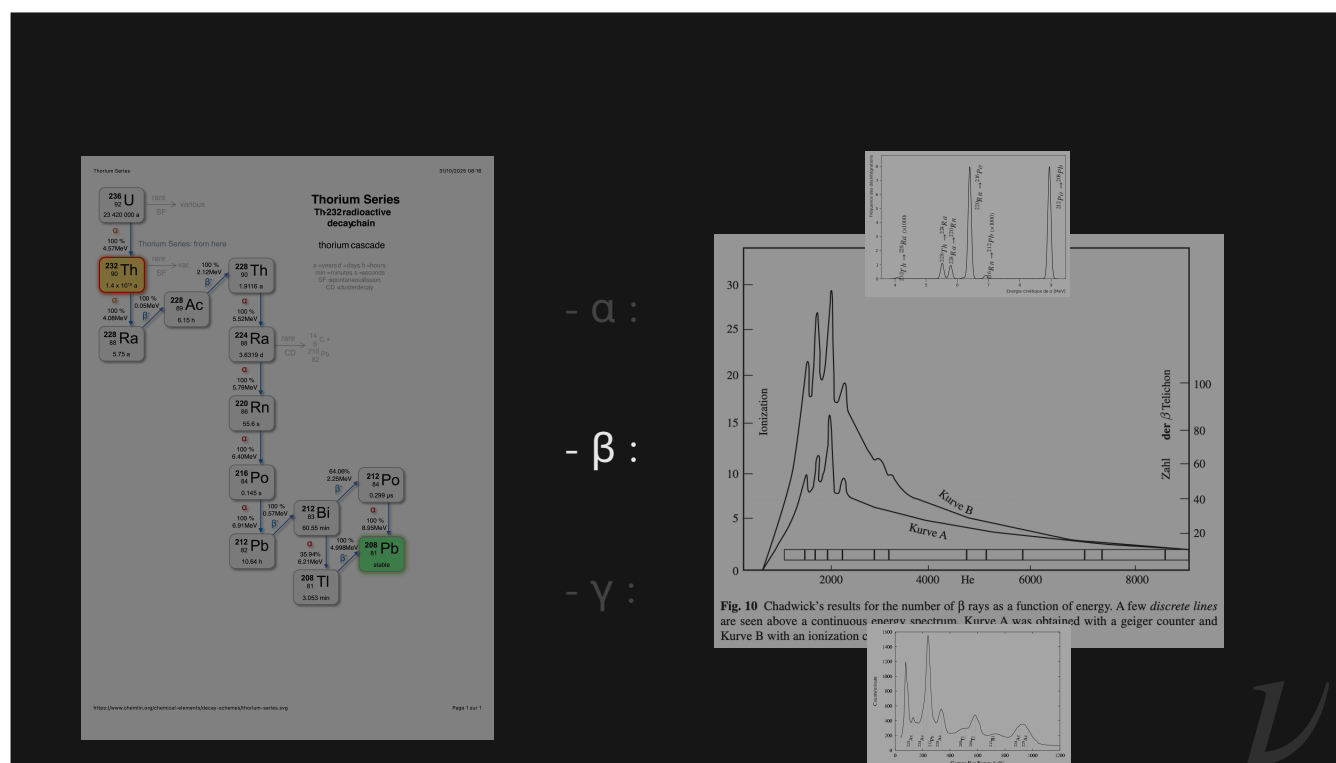
Origine de l'énergie ?



- α :



V



A première vue, on pourrait croire que le même raisonnement s'applique à l'énergie des électrons du rayonnement beta.

Or, pour vérifier cette hypothèse, il fallait disposer d'instruments capables de mesurer le spectre beta avec une précision suffisante afin d'y voir apparaître pour des raies nettement définies, comme c'est le cas pour le spectre alpha ou gamma.

Lors des premiers essais, en janvier 1899, Rutherford doit bien admettre que **"l'examen de l'homogénéité du rayonnement β ne peut être mené avec la même précision que pour le rayonnement α . Cependant, autant que les expériences l'ont permis, les résultats semblent indiquer que le rayonnement β est approximativement homogène, bien qu'il soit possible que d'autres types de rayonnements, soit de très faible intensité, soit de très grande puissance de pénétration, soient également présents."**

Rutherford suggère, avec toutes les précautions requises, que le spectre est continu. Cette idée est bien difficile à accepter, car on sait que les spectres d'émission atomiques sont discontinues, composés de raies bien distinctes propres à chaque élément.

Pourquoi alors en serait-il autrement du spectre nucléaire. Comme l'ont démontré Rutherford et Soddy, la radioactivité consiste en la transformation d'un atome A en un autre atome B. Si l'on connaît les énergies de A et B, on pourrait s'attendre à ce que l'énergie du rayonnement beta — identifié comme un électron de très grande vitesse — soit parfaitement définie, à l'instar du rayonnement alpha identifié dont l'énergie est également déterminée par la différence d'énergie entre les deux noyaux.

On cherche donc des pics dans le spectre beta en ignorant ce que disait la mesure : un spectre continu auquel se superpose des raies discrètes de très faibles intensités. Mais les mesures expérimentales étaient encore bien trop imprécises pour révéler que des particules beta issues d'une source donnée avaient une énergie cinétique inférieure à d'autres particules beta.

Pour mesurer l'énergie des électrons, on les fait passer dans un fort champ magnétique et on observe les traces imprimées sur une plaque photographique pour en mesurer la déviation de la trajectoire.

Dans les premières expériences, on voyait effectivement des taches ponctuelles correspondant à des électrons de même énergie, mais ces taches étaient noyées dans un bruit de fond (grain de la plaque, rayonnements parasites, diffusion multiple). Ce bruit rendait l'interprétation très difficile.

Berlin



Lise Meitner & Otto Hahn



A Berlin, Lise Meitner et Otto Hahn se sont attaqués au problème à partir de 1909.

Berlin



Lise Meitner & Otto Hahn



A Berlin, Lise Meitner et Otto Hahn se sont attaqués au problème à partir de 1909.

Le parcours d'Otto Hahn est loin d'être conventionnel. Au départ, il se projette une carrière dans l'industrie chimique, alors florissante en Allemagne. Ainsi, en 1901, il soutient une thèse en chimie organique à Marburg en 1901, accomplit son service militaire, puis se rend en Angleterre pour perfectionner son anglais. C'est là, en travaillant sur les matériaux radioactifs, qu'il révèle ses talents de chercheur. Cette expérience le détourne définitivement de son rêve d'ingénieur : il choisit la voie académique. Après un passage enrichissant à Montréal auprès de Rutherford, il obtient le titre de Privatdozent en chimie à l'Université de Berlin. C'est à ce moment qu'il croise le chemin de Lise Meitner, jeune physicienne fraîchement arrivée de Vienne.

Berlin



Lise Meitner & Otto Hahn



Si le parcours de Hahn est déjà singulier, celui de Lise Meitner l'est encore davantage. Née dans une famille juive peu pratiquante, elle montre très tôt une fascination pour les mathématiques et la physique. Mais, à cette époque, le Gymnasium était réservé aux garçons ; elle ne pouvait donc pas y accéder et, par conséquent, ne pouvait obtenir le diplôme équivalent au baccalauréat, indispensable pour entrer à l'université.

Déterminée, elle se prépare elle-même les cours requis, réussit les examens et, enfin, franchit la porte de l'université où elle suit les cours de Ludwig Boltzmann.

En 1906, elle obtient son doctorat en sciences avec les félicitations du jury (summa cum laude). Grâce au soutien financier de son père, elle se rend, en 1907 à 29 ans, à Berlin pour suivre les cours de physique théorique de Max Planck.

C'est là que le destin la conduit à Otto Hahn. Leur rencontre est presque providentielle : ils ont le même âge, elle est réservée et parfois peu sûre d'elle, tandis que Hahn adopte une attitude très informelle et détendue. Cependant, leurs premiers pas ensemble sont entravés par les préjugés de l'époque. Le directeur de l'institut interdit aux femmes d'assister aux cours et même d'entrer dans les laboratoires, invoquant, à tort, des raisons aussi absurdes que la crainte que leurs cheveux ne s'enflamment sur les becs Bunsen !

Malgré ces obstacles, Meitner persévère, et, avec Hahn, elle entame une collaboration qui durera trente ans et marquera l'histoire de la physique nucléaire.

Berlin



Lise Meitner & Otto Hahn

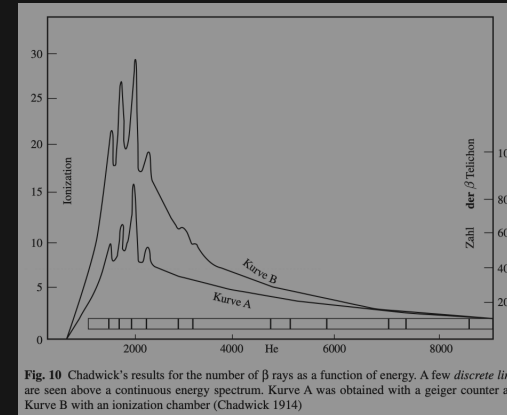


Fig. 10 Chadwick's results for the number of β rays as a function of energy. A few discrete lines are seen above a continuous energy spectrum. Kurve A was obtained with a geiger counter and Kurve B with an ionization chamber (Chadwick 1914)

Ils partent du principe que "les corps qui n'émettent que des rayons beta n'émettent des beta que d'une seule sorte, comme cela se passe pour les rayons alpha." Et les mesures réalisées avec un spectromètre magnétique semblent confirmer cette hypothèse, cependant des mesures réalisées à Manchester la contredisent !!

Confrontés à la persistance du bruit, ils sont forcés de conclure que «**Le problème avec les rayons doux est très grand et nous ne sommes pas sûrs de pouvoir dépasser les difficultés pour obtenir de bonnes raies.**» Mais ils cherchent avant tout des raies discrètes.

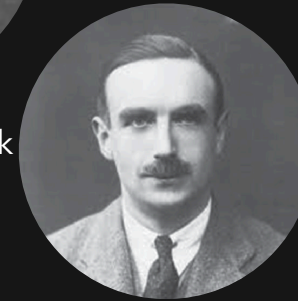
Personne ne s'inquiète vraiment de la présence du fond continu. Rutherford, lui même reste optimiste : «**Le spectre continu des β -rayons observé pour l'uraniumX et le radiumE pourra finalement être résolu en un certain nombre de raies.**»

Des raies, on finit par en trouver, bien qu'elles soient de très faibles intensités, et bien plus que ce à quoi on pouvait s'attendre. En effet, chaque raie devait correspondre à un élément donné et il n'était pas raisonnable qu'autant d'éléments nouveaux soient créés dans une chaîne radioactive. C'est aux raies que les physiciens s'intéressent délaissant le spectre continu vague et inexpliqué qui apparaît sur les plaques photographiques comme un fond légèrement assombri.

Manchester



James Chadwick



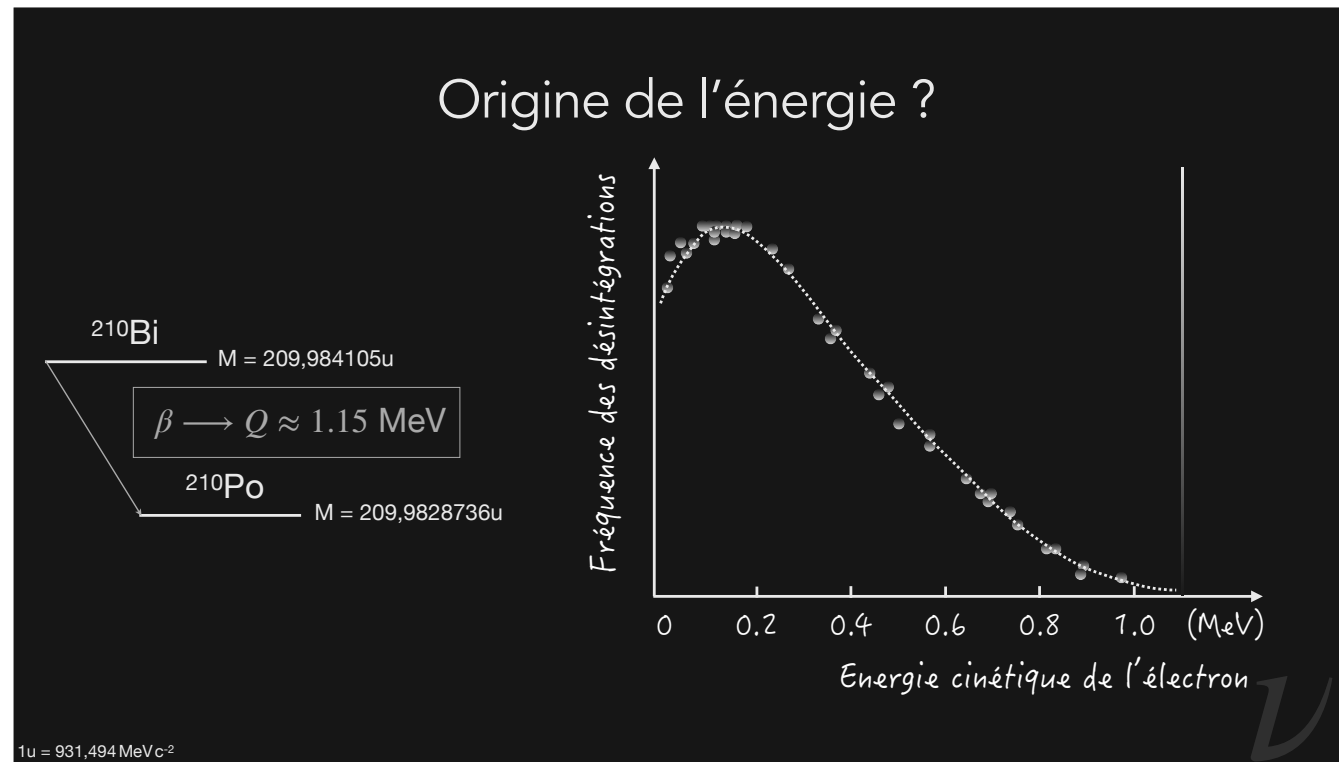
Charles Ellis

En 1913, James Chadwick publie une série d'expériences sur les rayons beta à l'Université de Manchester.

Pendant la Première Guerre mondiale, James Chadwick et Ellis se sont retrouvés dans le même camp d'internement près de Berlin. Tous deux étaient complètement pris au dépourvu par le conflit.

Chadwick venait d'être invité par Geiger à rejoindre le laboratoire de Berlin ; il s'attendait à poursuivre ses recherches, pas à être confiné.

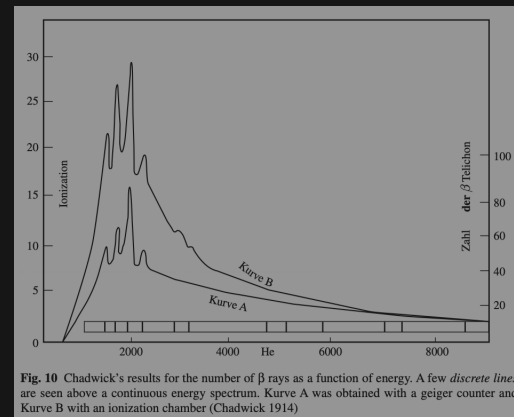
Ellis, quant à lui, était un jeune officier de 19 ans en plein congé d'été en Allemagne.



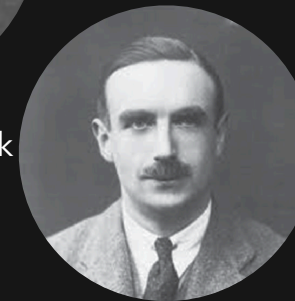
$$Q_{\beta^-} = B_f - B_i ; Q_{\beta^+} = B_f - B_i - 2m_e c^2$$

Au début de ses expériences, Chadwick utilisait les plaques photographiques pour enregistrer les trajectoires dans un champ magnétique. Dès 1914, il introduit un instrument beaucoup plus précis : le compteur Geiger-Müller. Le résultat est très surprenant : contrairement à ce qu'il s'attendait, aucune raie, des groupes d'électrons de même vitesse n'apparaît ! Au lieu de ça, Chadwick découvre un spectre continu. Autrement dit, les électrons beta sont présents avec toutes les vitesses possibles, allant de zéro jusqu'à une vitesse maximale caractéristique de la source radioactive.

Manchester



James Chadwick



Charles Ellis

Toutefois le spectre n'est pas parfaitement uniforme : à certaines vitesses (celles correspondant aux raies observées sur les plaques photographiques) il relève un léger excédent d'électrons par rapport aux des vitesses voisines.

Après la Première Guerre mondiale, les recherches se poursuivent et deux écoles s'opposent : celle de Berlin avec Lise Meitner, Otto Han et Max von Laue et celle de Cambridge avec Rutherford, Chadwick et Charles Drumond Ellis.

Le partie continue du spectre persiste . Serait-elle une propriété intrinsèque du rayonnement beta ? Ellis pense qu'elle a bel et bien une origine nucléaire, sans pouvoir en expliquer le mécanisme.

Finalement, après avoir perfectionné sa technique, Ellis conclut, en 1923, que la continuité ne peut être attribuée à des artefacts instrumentaux et confirme que les électrons d'origine nucléaire sont effectivement émis avec un spectre continu.



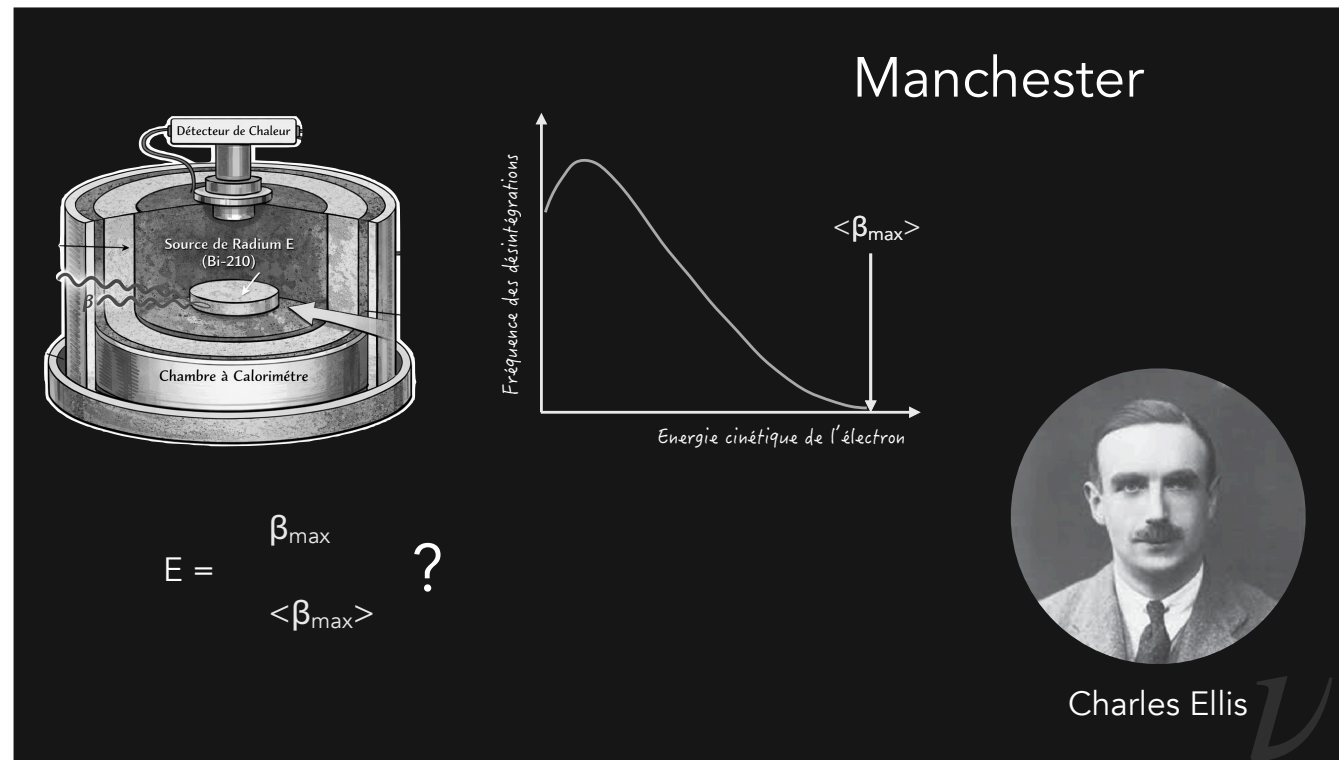
Convaincue par ces nouvelles données, Meitner reconnaît son impasse : elle avoue ne pas comprendre la nature de ces résultats, et personne à l'époque ne parvient à les expliquer davantage.

Lettre de Meitner à Otto Hahn (mai 1923): « **Les nouvelles mesures de M.Ellis confirment la partie continue du spectre β . Je ne peux plus soutenir mon modèle de β monochromatique; la nature du phénomène reste pour moi obscure** ».

La controverse porte surtout sur la nature même du spectre beta : est-il réellement continu, ou cache-t-il en réalité une série de raies discrètes que les instruments ne parviennent pas à distinguer ?

Les chercheurs anglais pensent que le spectre continu est une réalité physique et que dans chaque désintégration une partie de l'énergie est perdue d'une façon ou d'une autre.

Meitner, quant-à elle, reste sceptique. Elle avance que le spectre continu résulterait de beta nucléaires monochromatiques perturbés par diverses causes (diffusion, perte d'énergie dans le matériau de la source) ; l'interprétation des mesures magnétiques réalisées avec le compteur Geiger ne la convainquent pas et ses a-priori restent tenaces.

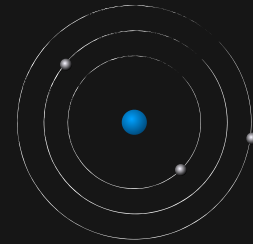
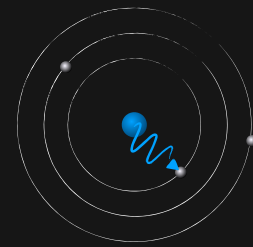


Ellis conscient que les mesures de trajectoires ou de comptage ne peuvent pas trancher le débat, conçoit, en 1925, une expérience calorimétrique originale avec laquelle il mesure l'énergie totale déposée dans une enceinte thermiquement isolée par le rayonnement beta. Si les berlinois ont raison et toute l'énergie recueillie correspond à l'énergie maximum du spectre, soient les anglais ont raison et l'énergie recueillie correspond à une valeur moyenne à mi-chemin entre zéro et l'énergie maximum.

L'expérience est délicate, il s'agit de mesurer une élévation de température de l'ordre du millième de degré, mais, deux années plus tard, le résultat est sans appel : l'énergie mesurée est bien l'énergie moyenne du spectre.

Fin de la controverse.

Origine de l'énergie ?



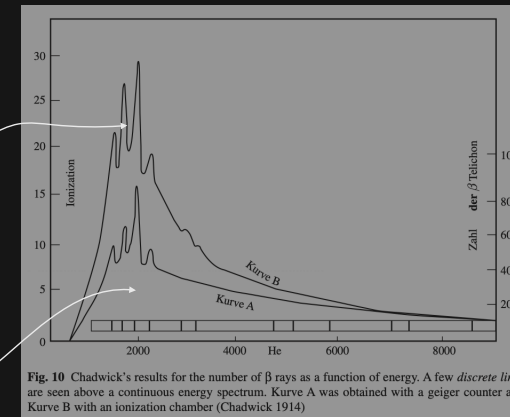
conversion interne

rayon β

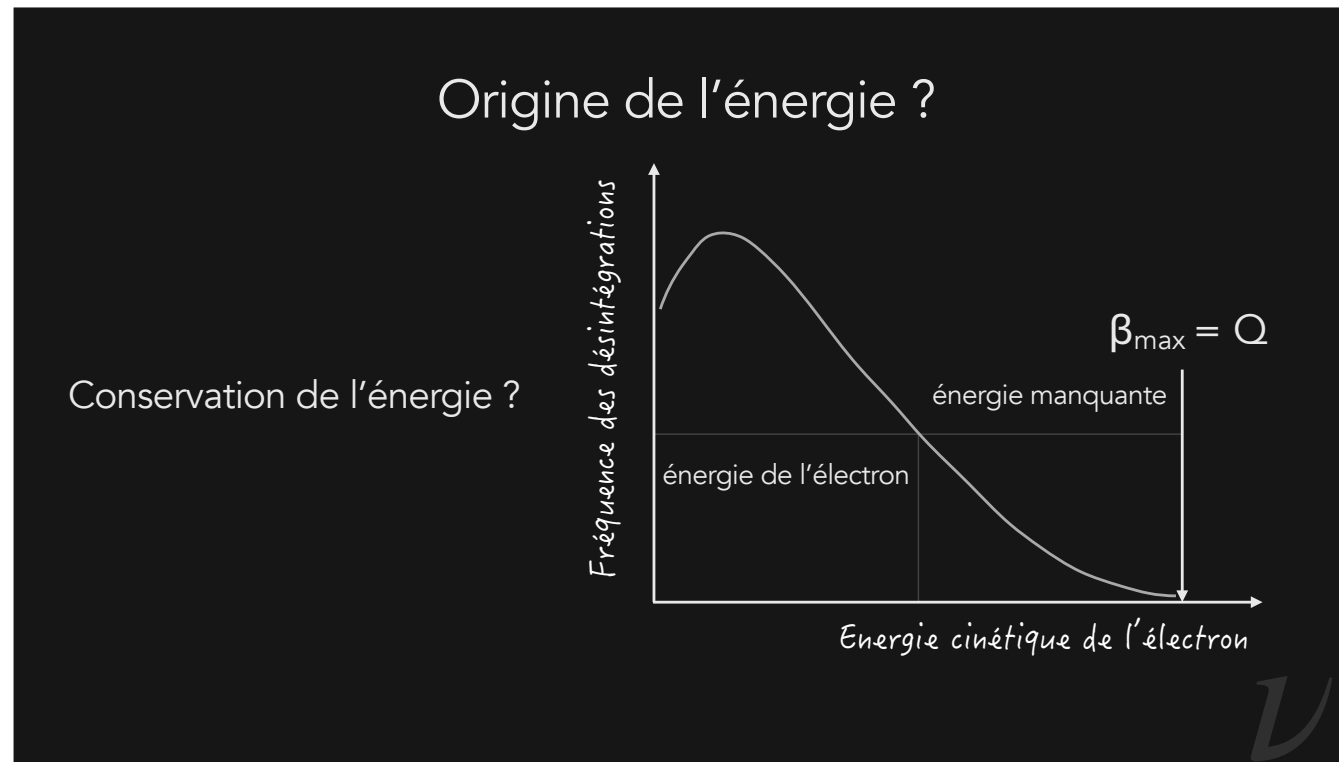
- α :

- β :

- γ :



V



Il est donc définitivement acquis à la fin des années 1920 que le spectre des électrons issus d'une désintégration beta est continu, contrairement aux spectres discrets des particules alpha ou des rayons gamma. Les mesures indiquent que l'énergie de l'électron n'est pas chaque fois la même ; elle peut prendre une valeur quelconque, tantôt grande, tantôt petite, alors qu'on s'attendait à une valeur précise, toujours la même, qui correspond exactement à la différence d'énergie entre le noyau initial et le noyau final.

Autrement dit, l'électron ne transporte pas toute l'énergie disponible ; une partie de cette énergie semble "disparaître".

Et voilà la physique confronté à un sérieux problème. En effet la réaction $A \rightarrow B + e$ paraît violer le principe de la conservation de l'énergie. Ce qui est une aberration et nie la définition même de l'énergie : l'énergie est, en physique, une quantité abstraite dont la propriété première est de rester constante dans les processus de la nature. L'énergie se transforme et ne se crée pas pas ni se perd.

Alors que faire ? Renoncer à la conservation de l'énergie à l'échelle subatomique ? Certains physiciens, parmi les plus brillants, ont envisagé cette hypothèse désespérée. Niels Bohr, par exemple, a suggéré que l'énergie ne serait conservé que de façon statistique, en moyenne, et non pas dans chaque réaction : les processus subatomiques ne respectant pas strictement la conservation de l'énergie.

Scandale et désaccord entre Einstein et Bohr !

REVELATIO

- Radioactivité : α , β , γ
- Une transmutation
- Spectre β : un défi aux lois de la physique



