

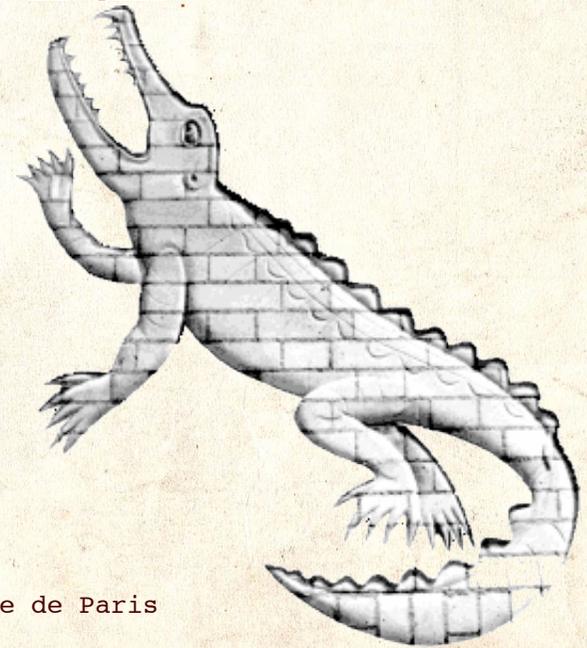
PETITE HISTOIRE DE LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE

4 – RUTHERFORD

Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule et Cosmologie

CNRS - Université Denis Diderot - CEA - Observatoire de Paris



« All science is either physics or stamp collecting »

Rutherford

ERNEST RUTHERFORD

ERNEST RUTHERFORD (1871-1937)

- Au Cavendish Laboratory de Cambridge (1895-1898)
 - Ionisation des gaz sous l'effet des rayonnements
 - Radioactivités alpha et bêta

- À l'université MacGill de Montréal(1898-1907)
 - Découverte du radon
 - Découverte de la décroissance radioactive, avec Soddy puis Hahn
 - Découverte des transmutations « atomiques »

- À l'université de Manchester (1907-1919)
 - Identification des alphas avec des ions hélium
 - Découverte du noyau, avec Geiger et Marsden
 - Collisions nucléaires et découverte du proton, avec Chadwick

- À la direction du Cavendish Laboratory de Cambridge (1919-1937)
 - Théorie des noyaux
 - Dirige les recherches de Chadwick, Blackett, Cockroft, Walton, Kapitza ...

ERNEST RUTHERFORD

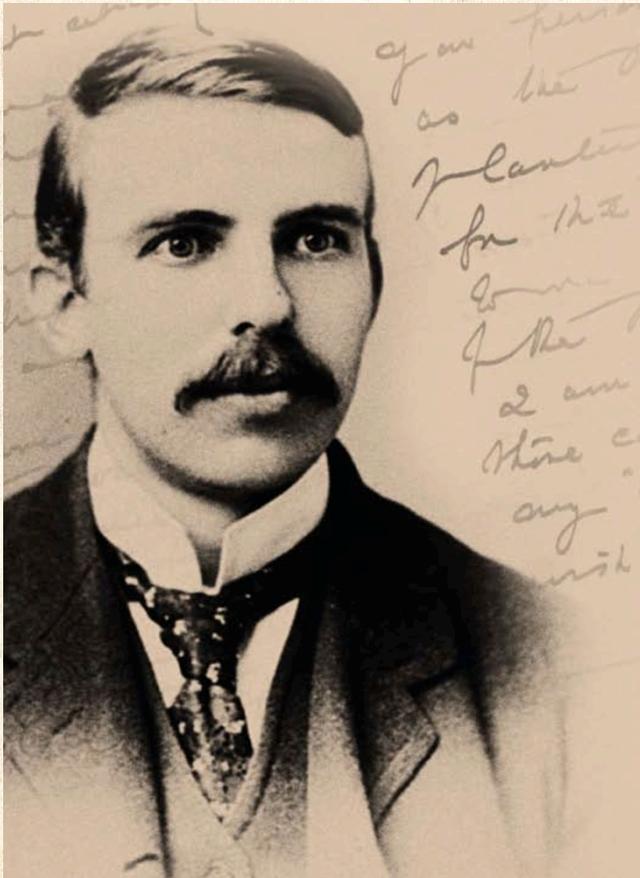
- Prix Nobel de **chimie** 1908
- Parmi ses élèves et collaborateurs
 - Frederick Soddy Nobel 1921 chimie
 - Francis Aston Nobel 1922 chimie
 - Niels Bohr Nobel 1922 physique
 - Charles Wilson Nobel 1927 physique
 - James Chadwick Nobel 1935 physique
 - Otto Hahn Nobel 1944 chimie
 - Edward Appleton Nobel 1947 physique
 - Patrick Blackett Nobel 1948 physique
 - Cecil Powell Nobel 1950 physique
 - John Cockroft Nobel 1951 physique
 - Ernest Walton Nobel 1951 physique
 - Piotr Kapitza Nobel 1978 physique



Bas-relief à l'entrée de l'ancien *Cavendish Laboratory* de Cambridge en l'honneur de Lord Rutherford

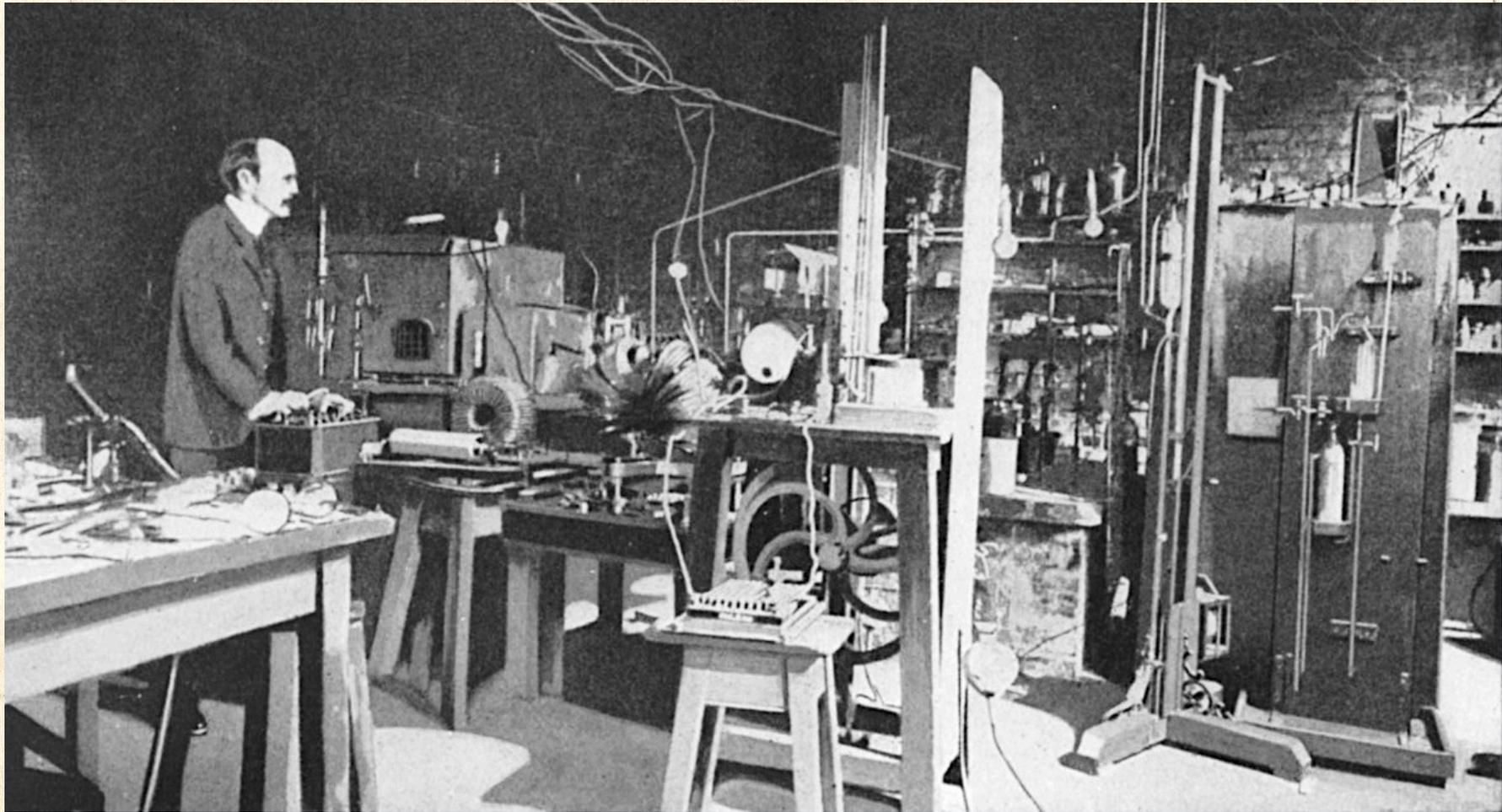
UN INVENTEUR

- 4^e des 12 enfants d'une institutrice et d'un fermier, mécanicien, et ingénieur néo-zélandais



- Bourse pour l'université de Christchurch, diplômé en 1893 en mathématiques et physique
- Recherches personnelles sur la magnétisation du fer par les ondes hertziennes (~cohéreur de Branly) publiées dans les *Transactions of the New Zealand Institute*
- 1895 : bourse de 3 ans lui permettant d'aller au Royaume-Uni
- Objectif : déposer des brevets sur la radiotélégraphie – et faire fortune pour se marier avec sa fiancée, Mary Newton
- Arrivée au Cavendish Laboratory à Cambridge, pour travailler sur le magnétisme et les ondes radio

J.J. THOMSON AU CAVENDISH

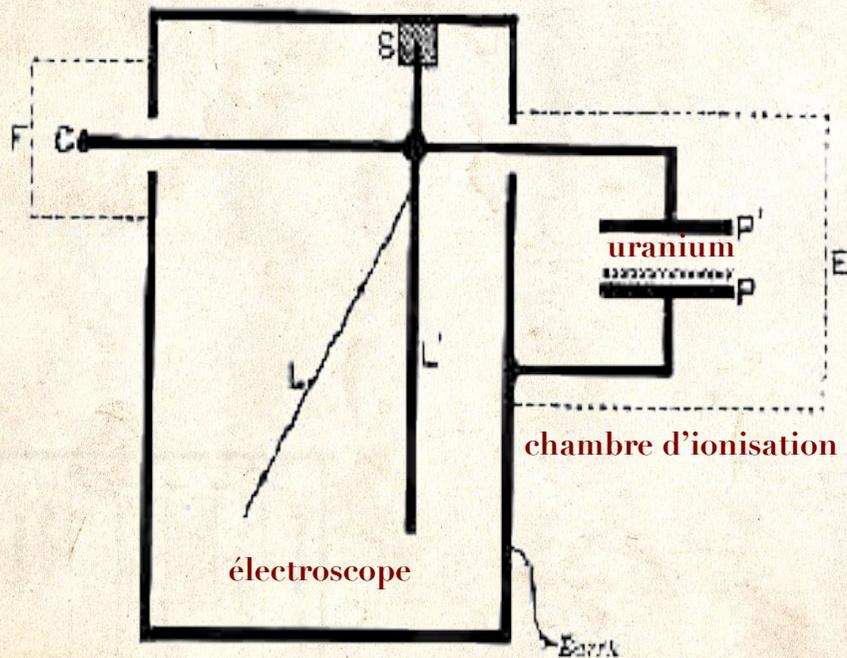


ALPHA, BÊTA...

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

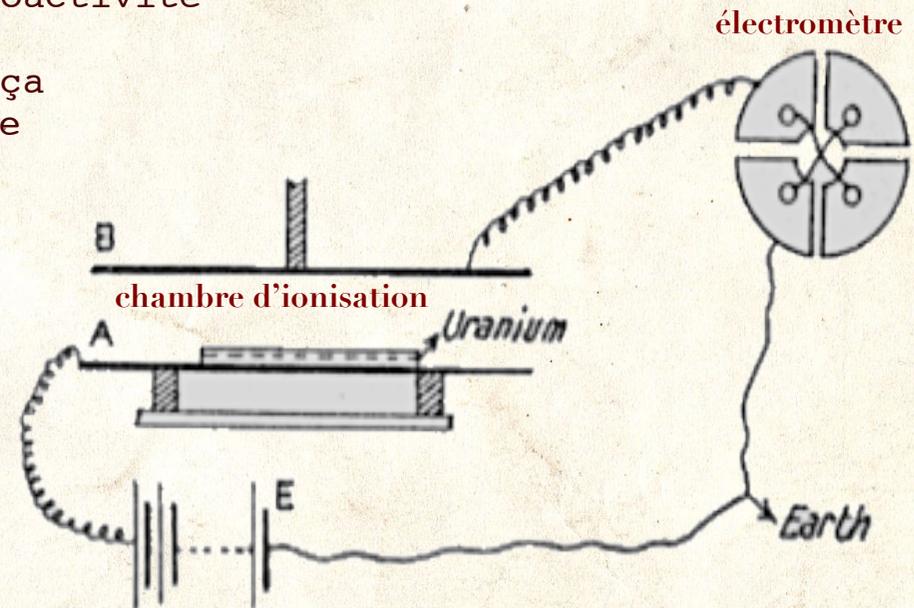
RAYONNEMENTS IONISANTS

- Dès 1896, Thomson réorienta Rutherford vers l'étude de l'**ionisation de l'air**
 - par les rayons X de Röntgen
 - puis par les rayons de Becquerel
- Montage très simple
 - chambre d'ionisation
 - électroscope à feuille d'or



RAYONNEMENTS IONISANTS

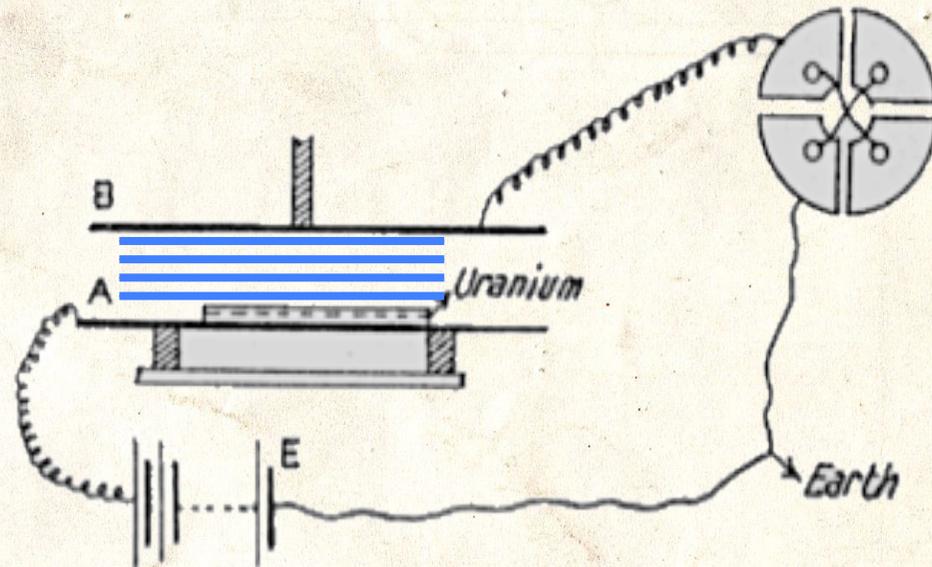
- Thomson et Rutherford montrèrent que rayons X et rayons de Becquerel produisaient de fortes quantités de particules chargées, ions positifs et électrons négatifs (identifiés par Thomson en 1897)
- Début 1898, **Rutherford inversa ses priorités**, utilisant désormais l'ionisation pour étudier la radioactivité
- Pour plus de précision, il remplaça l'électroscope par un électromètre de Kelvin
- Son montage était donc analogue à celui de Pierre Curie au même moment
 - chambre d'ionisation
 - électromètre à quadrants
 - (mais sans balance à quartz)



Les expériences de Rutherford furent toujours très simples, très ingénieuses, et très minutieuses pour éliminer artefacts et varier les paramètres (sources, absorbants, géométrie, environnement)

ABSORPTION DES RAYONS DE BECQUEREL

- Rutherford examina la manière dont les rayons de Becquerel étaient absorbés par différentes substances
- Interposition successive de feuilles métalliques (de 5 nm)
 - le courant d'ionisation diminue d'abord très vite quand le nombre de feuilles augmente
 - puis il ne varie presque plus, même en augmentant le nombre de feuilles
- → Étude systématique
 - selon la **composition** et la **disposition** du sel d'uranium (en bloc, en poudre ± étalée...)
 - selon la nature des feuilles interposées : laiton (cuivre + zinc), aluminium, puis cuivre, argent, étain, platine et verre



ALPHA ET BÊTA

- Rutherford conclut le 1^o septembre 1898 qu'il existe **deux composantes** dans le rayonnement de l'uranium
 - l'une fortement absorbée: composante **alpha**
 - l'autre beaucoup moins absorbée: composante **bêta**
- Rutherford nota également que la composante alpha était d'autant plus facilement absorbée par une substance que celle-ci avait une **masse atomique élevée**
 - aluminium (27) < cuivre (64) < zinc (65) < argent (108) < étain (119) < platine (195)
 - de très faibles épaisseurs suffisent
 - quelques centimètres d'air arrêtent les rayons alpha
- La composante bêta était elle-aussi absorbée, mais beaucoup moins : facteur ~ 100 pour l'aluminium

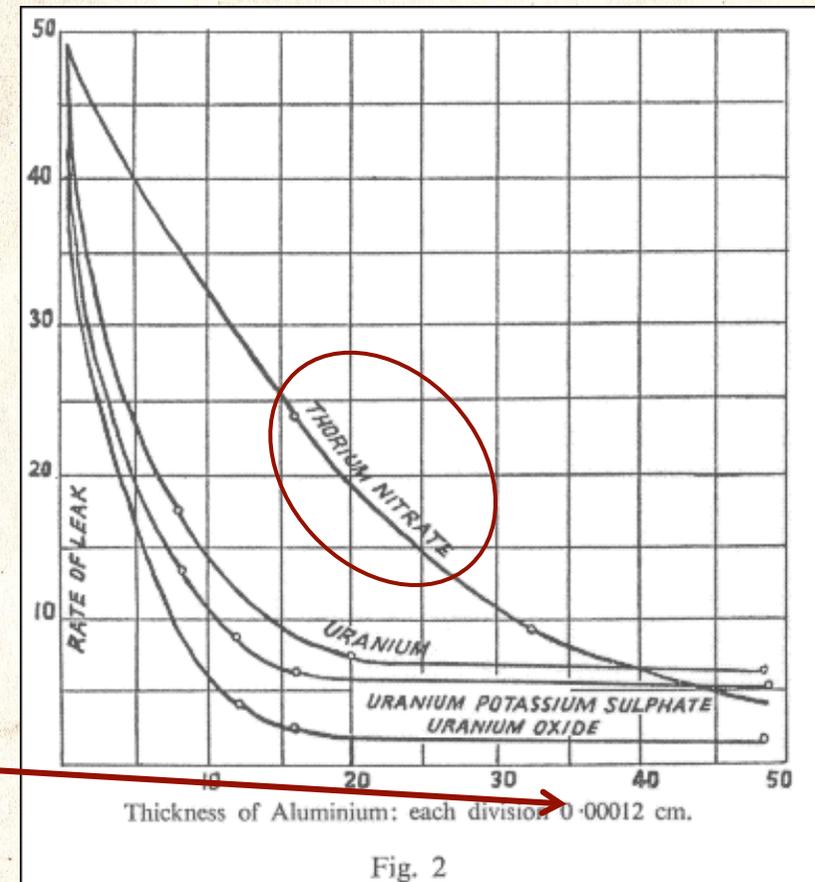
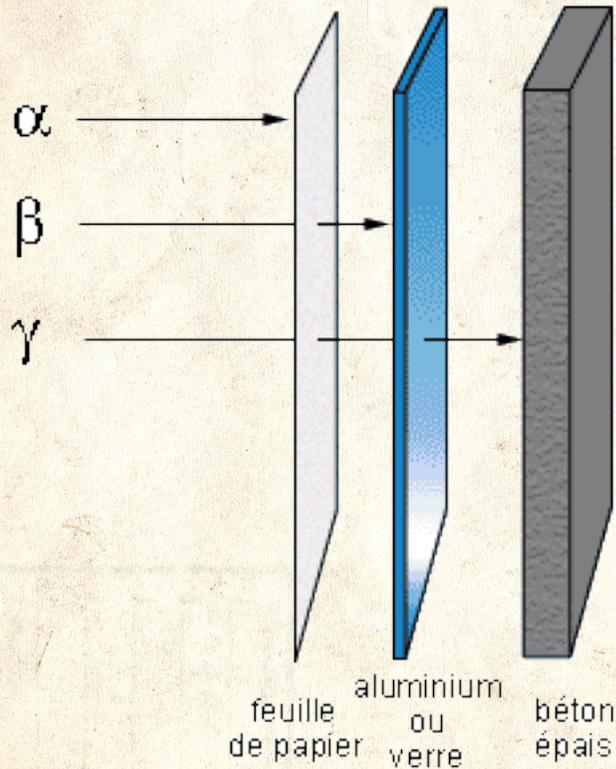


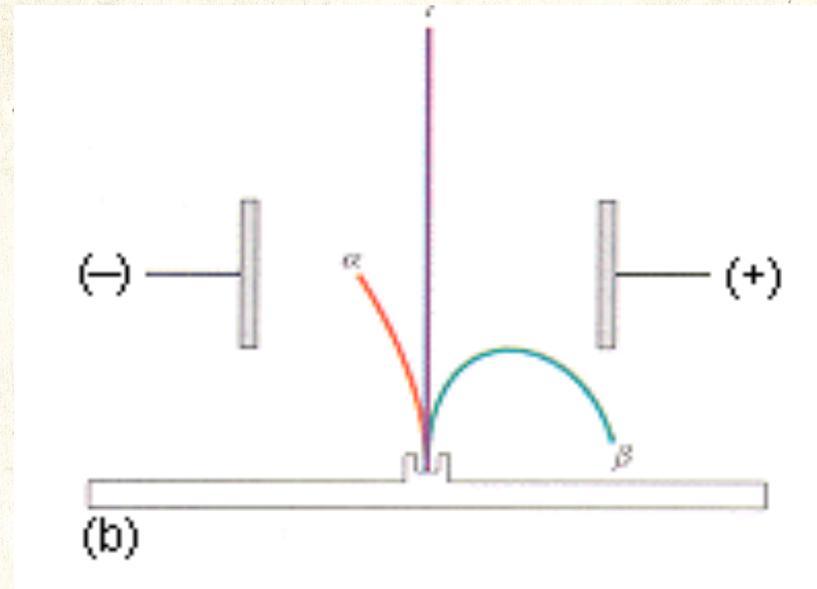
Figure de l'article de Rutherford montrant la décroissance exponentielle du rayonnement avec l'épaisseur d'aluminium

ALPHA, BÊTA... ET GAMMA

- 1900 : Paul Villard
 - Rayonnement neutre très pénétrant
- Pénétration



- Déviation électromagnétique

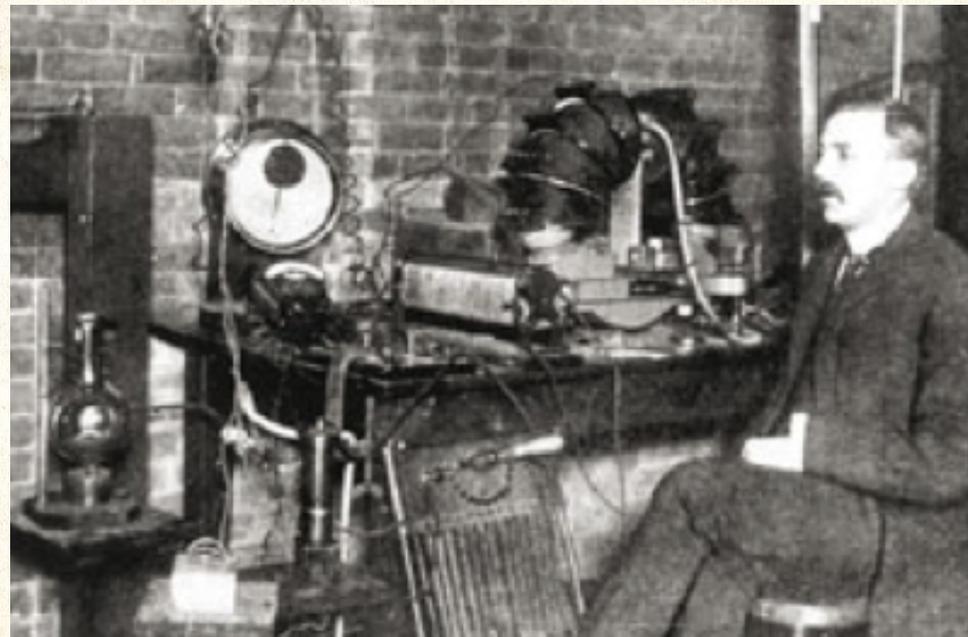


- Nature
 - Alpha : noyau d'hélium
 - Bêta : électron
 - Gamma : rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde ($< 1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$)

L'UNIVERSITÉ MCGILL DE MONTRÉAL



- Université anglophone de Montréal depuis 1821
- Département (et chaire) de physique créés en 1891 par scission du département de mathématiques et sciences naturelles, grâce à un don du philanthrope (et magnat du tabac quoique non-fumeur) William MacDonald
- Création d'une seconde chaire en 1893, avec un laboratoire très bien équipé pour l'époque
- Nomination de Rutherford comme professeur de physique à l'automne 1898
 - **Inconvénient majeur**
 - Montréal était très loin d'être un centre aussi en pointe que Cambridge!
 - **Avantages**
 - un poste de titulaire bien payé (→ Rutherford épousa Mary Newton en 1900)
 - un laboratoire moderne
 - **Frederick Soddy**



Ernest Rutherford en 1905 à McGill

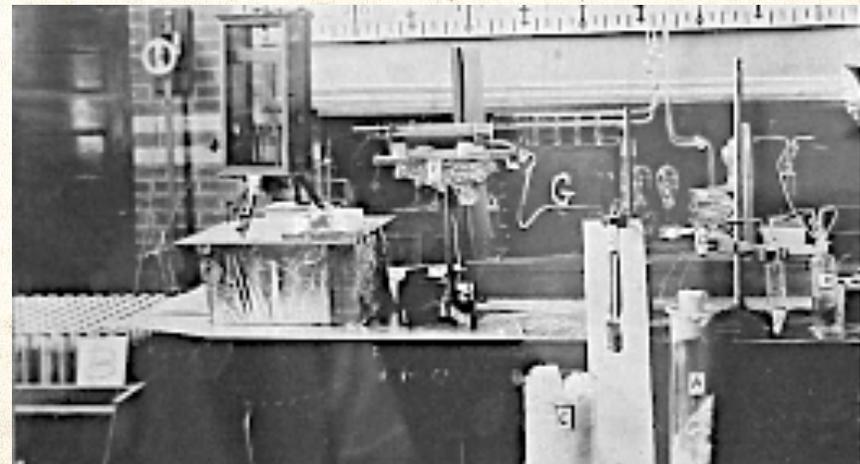
RADON

MOI J'AI DIT BIZARRE ? COMME C'EST BIZARRE...

- À McGill, à partir de 1899, Rutherford passa à l'étude de la radioactivité du thorium
- Mais ses expériences étaient perturbées
 - par les courants d'air
 - et une radioactivité envahissante
- Rutherford finit par démontrer
 - que le thorium libérait une «émanation» gazeuse
 - que celle-ci était ionisante (même loin du thorium) → radioactive
 - qu'elle était électriquement neutre → ni alpha ni bêta
 - et que sa radioactivité disparaissait en quelques minutes
- Mais rien de tel avec l'uranium
- → émanation → émanation du thorium
- → thoron → radon 220 ($\frac{1}{2}$ vie 56 s)
- Le nombre de corps radioactifs découverts ne cessait de croître
 - Uranium (Becquerel 1896)
 - Thorium (Schmidt 1898)
 - Polonium (Curie 1898)
 - Radium (Curie 1898)
 - Actinium (Debiere 1899)
 - Émanation (Rutherford 1900)
- Mais seule l'émanation voyait son activité diminuer rapidement
- Et même exponentiellement
$$A(t) = A(0) \exp\{-t/\tau\}$$
avec $\tau \sim 80$ secondes [$t_{\frac{1}{2}} = \tau \ln 2$]
- \Rightarrow il parut invraisemblable que ce soit un nouvel élément : il serait instable !

ÉMANATION, THORON, RADON, NITON...

- 1899: Pierre et Marie Curie signalèrent une « radioactivité induite »
 - une substance placée à proximité du radium devenait elle aussi radioactive
 - l'air lui-même semblait devenir radioactif
- 1900: Friedrich Dorn vérifia les résultats de Rutherford avec le thorium et annonça la présence similaire d'une **émanation** radioactive avec le radium, mais pas avec l'uranium ni le polonium
 - → émanation (Rutherford 1900)
 - → émanation *du radium* ≠ émanation du thorium (Rutherford 1904)
 - → exradio, radeon, radon
 - → niton (Ramsay 1915)
 - → radon 222 ($\frac{1}{2}$ vie 3,8 jours)
- Quelle était la nature de l'émanation
 - une «**vapeur**» de thorium, ou de radium
 - une «**activation**» d'un élément connu par l'énergie rayonnée (Curie 1903)
 - un **nouvel élément chimique** (Rutherford 1902)
 - → un gaz inerte de la famille des krypton, argon, xénon (Ramsay 1904)



Montage de Rutherford pour déterminer la nature de l'émanation

LA RADIOACTIVITÉ DE L'ÉMANATION

○ Montage simple mais astucieux

- Oxyde de thorium enveloppé dans du papier (laissant passer l'émanation mais pas le rayonnement α du thorium lui-même)
- L'émanation est aspirée par un tube dans une chambre d'ionisation, reliée à un électromètre à quadrants
- L'électromètre permet de mesurer la radioactivité de l'émanation

○ Procédure

- Aspirer l'air jusqu'à stabilisation du courant d'ionisation
- Arrêter l'aspiration
- Mesurer le courant d'ionisation pendant une dizaine de minutes
- **Recommencer**

○ Résultat

- $t = 0$ courant 100%
- $t = 62$ s courant 51%
- $t = 118$ s courant 23%
- $t = 210$ s courant 7%
- $t = 360$ s courant 2%

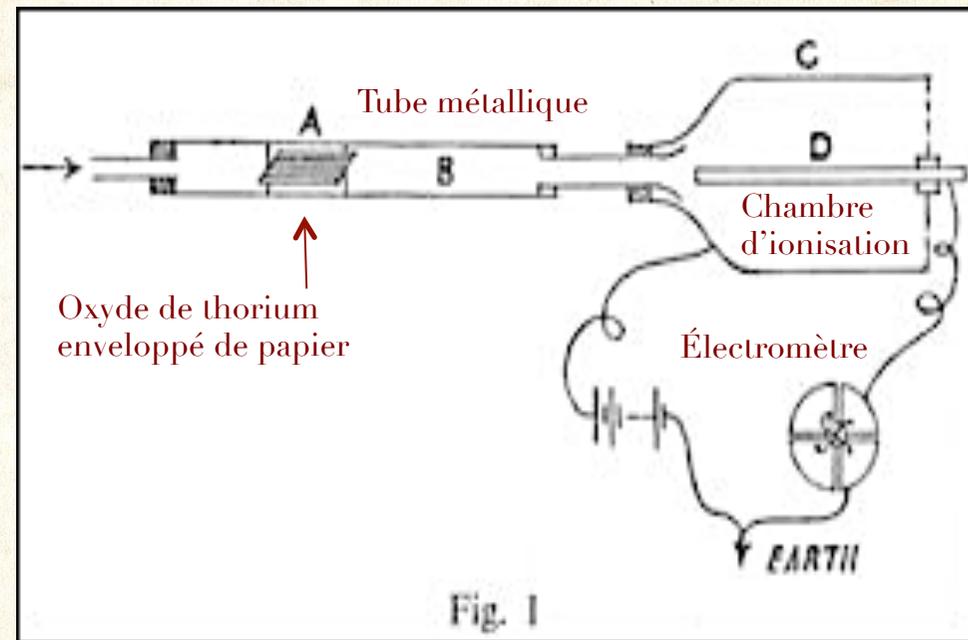
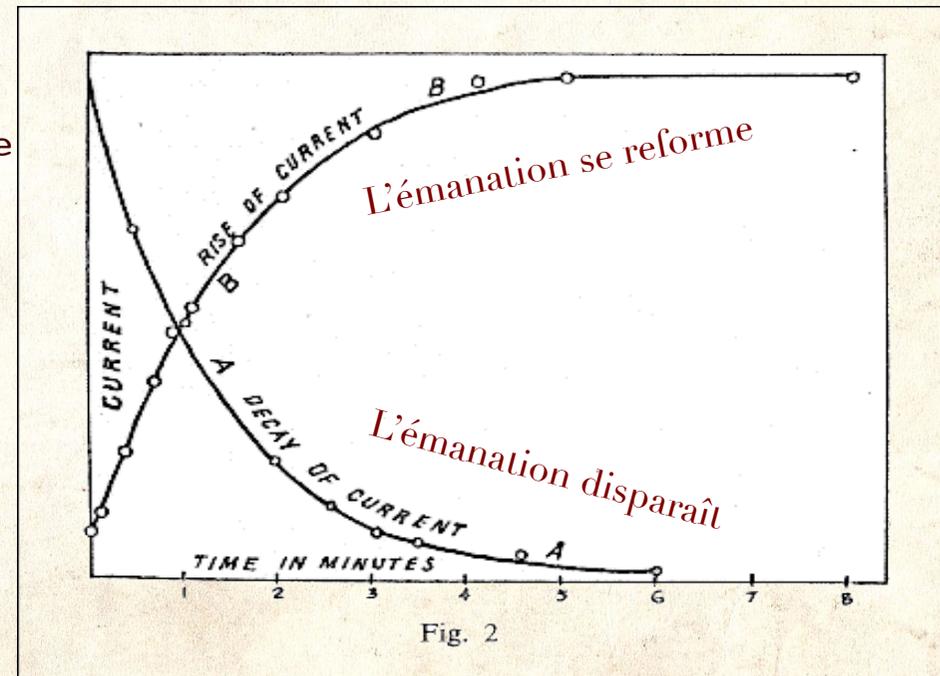


Fig. 1

Montage de Rutherford (septembre 1899)

RUTHERFORD VA PLUS LOIN

- Rutherford vérifia que l'émanation du thorium était un gaz, en intercalant des obstacles mécaniques (coton par exemple) et qu'il était chimiquement inerte (en lui faisant traverser divers réactifs chimiques)
- Il vérifia que la décroissance de l'activité ne dépendait pas de la chimie du thorium ni des conditions ambiantes (pression, température)
- Elle ne dépendait pas du voltage (il ne s'agissait donc pas d'une destruction de l'émanation par le champ électrique)
- Rutherford modifia ensuite légèrement son montage pour
 1. aspirer toute l'émanation
 2. et mesurer l'augmentation de radioactivité **au fur et à mesure qu'elle se reformait**



TRANSMUTATIONS !

FREDERICK SODDY (1877-1956)

- **Frederick Soddy** fut nommé en 1900 démonstrateur de chimie à McGill, où il resta 2 ans

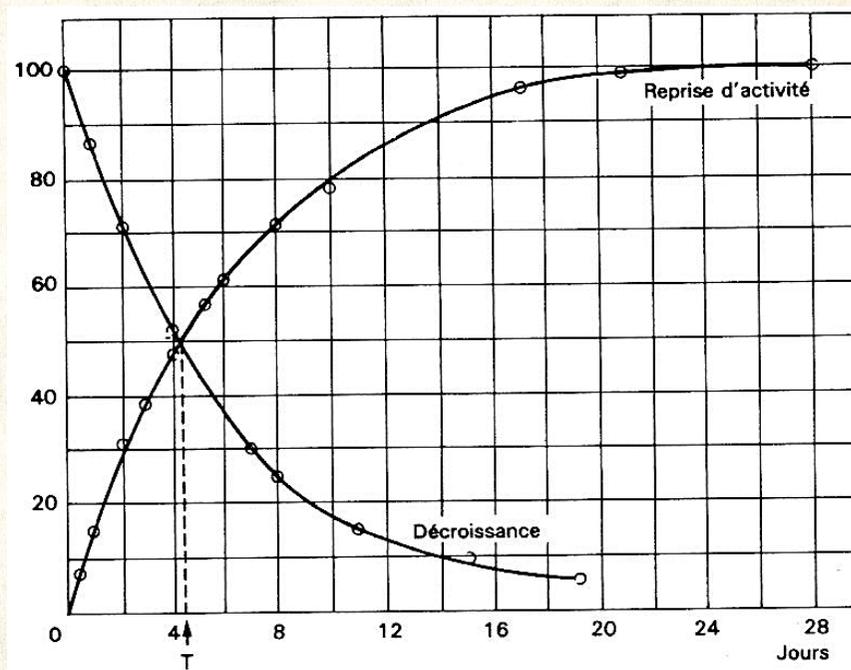


- → collaboration très fructueuse avec Rutherford, d'abord sur l'émanation, puis sur les **transmutations** radioactives

- Soddy retourna à Londres en 1903, où il collabora avec William Ramsay sur les gaz inertes – dont le radon
- Nommé professeur à Glasgow en 1904, il y démêla l'écheveau des filiations radioactives (montrant que le radium provenait de l'uranium)
- **Il y conçut également la notion d'isotope**
- Professeur à Aberdeen en 1914, puis à Oxford en 1919, il reçut le prix Nobel de chimie en 1921 pour ses travaux sur les isotopes
- Il proposa ensuite – sans succès – une réforme de l'économie (anticipant J.M. Keynes)

THORIUM OU THORIUM X ?

- Rutherford voulut vérifier si le thorium était bien à l'origine de l'émanation
- Au cours du printemps 1901, Soddy isola du thorium très pur... et constata que l'émanation provenait de ce qu'il avait éliminé !
- \rightarrow il y avait un autre élément, intercalé entre le thorium et l'émanation, et à l'origine sur celle-ci
- \rightarrow ils le baptisèrent thorium X
- Puis ils se rendirent compte, début 1902, que le thorium X était lui aussi instable
- \rightarrow sa demi-vie était ~ 4 jours
- Par contre, le thorium purifié voyait son activité augmenter régulièrement \rightarrow il produisait du thorium X



Décroissance de la radioactivité du thorium X et reprise d'activité du thorium purifié (Rutherford & Soddy 1902)

TRANSMUTATIONS (RUTHERFORD & SODDY 1904)

- «La radioactivité de chacune de ces substances est liée, non pas à la transformation par laquelle elle a été produite, mais à la transformation au cours de laquelle elle produit à son tour le nouveau type suivant.»
- «Parmi tous les éléments, les radioéléments sont ceux qui possèdent le poids atomique le plus élevé. C'est de fait leur unique caractéristique chimique commune.»
- «La désintégration de l'atome et l'expulsion de particules lourdes chargées (...) conduisent à un nouveau système, plus léger, dont les propriétés physiques et chimiques sont totalement différentes de celles de l'élément originel.»

- l'émission d'une particule alpha ou bêta n'accompagne pas la transformation, elle **est** la transformation



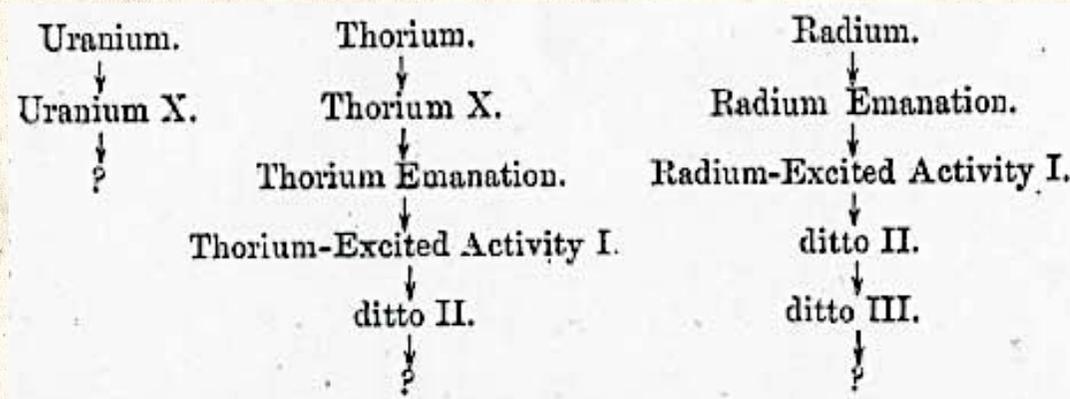
Soddy : «C'est une transmutation!»

Rutherford : «Pour l'amour du ciel, Soddy, ne prononcez pas ce mot. On va vouloir nos têtes en nous traitant d'alchimistes»

THORIUM, MÉSOETHORIUMS, THORIUM X, A, B, C...

- Rutherford et ses collaborateurs esquissèrent 3 *familles radioactives*

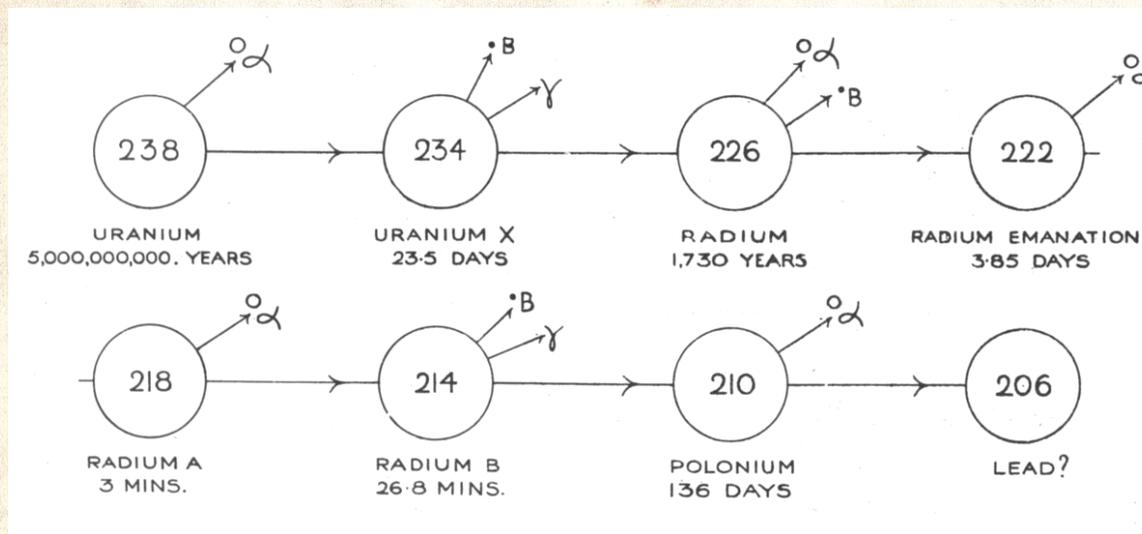
- celle de l'uranium
- celle du thorium
- celle du radium



- Otto Hahn découvrit chez Ramsay en 1905 qu'un *radiothorium* s'intercalait entre le thorium et le thorium X. Il vint travailler avec Rutherford, puis découvrit en 1906-1907 à Berlin qu'un *mésorthorium* I et un *mésorthorium* II s'intercalaient à leur tour entre thorium et radiothorium
- L'émanation rendait radioactifs les éléments qu'elle touchait → dépôt d'un autre élément encore, baptisé thorium A
- Il s'avéra vite que ce thorium A était instable et donnait du thorium B, également instable et donnant du thorium C, puis du thorium D, qui lui était stable
- **Aucun** de ces éléments n'est – du point de vue chimique – du thorium (sauf le radiothorium)

SITUATION AUSSI COMPLIQUÉE POUR L'URANIUM

- Les physiciens et les chimistes se retrouvèrent bientôt devant une foule de corps radioactifs dont ni l'enchaînement ni l'identité chimique n'étaient très clairs
- D'où un vocabulaire évoquant uranium, uranium X, radiums A, B, C, D, où s'intercalèrent ensuite des radiums C' ou C'' (dont aucun d'ailleurs n'était du radium)



ISOTOPES !

Radium em.	222Rn
Radium A	218Po
Radium B	214Pb
Radium C	214Bi
Radium C'	214Po
Radium C''	210Tl
Radium D	210Pb
Radium E	210Bi
Radium F	210Po

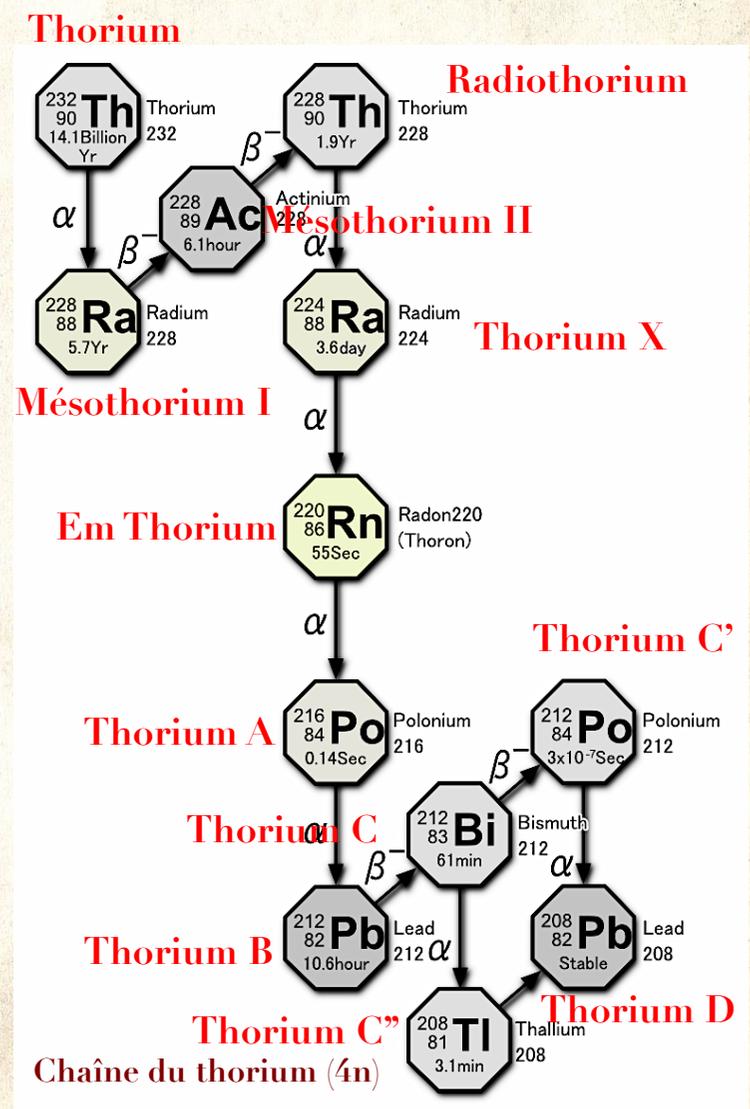
- Il apparut aussi que les chaînes de transmutations radioactives pouvaient se ramifier

CHAÎNES DE TRANSMUTATIONS RADIOACTIVES

- Chaque élément d'une chaîne fabriquant à un rythme constant l'élément suivant
- Et disparaissait ce faisant, avec une demi-vie qui lui était propre et ne dépendait pas des conditions physiques ni chimiques
- Tous les éléments de la chaîne partant du thorium (de masse atomique 232) avaient une masse atomique de la forme $4n$

$$232 \rightarrow 228 \rightarrow 224 \rightarrow 220 \rightarrow 216 \rightarrow 212 \rightarrow 208$$

- L'uranium 238 possédait une chaîne analogue (chaîne $4n+2$) à celle du thorium, chaîne qui passait par le radium 226 des Curie
- L'actinium 227 était lui aussi à l'origine d'un chaîne (chaîne $4n+3$)
 - (partant en réalité de l'uranium 235)
- *Il fallut des années pour démêler l'écheveau*



ÉNERGIE ET DÉFAUT DE MASSE

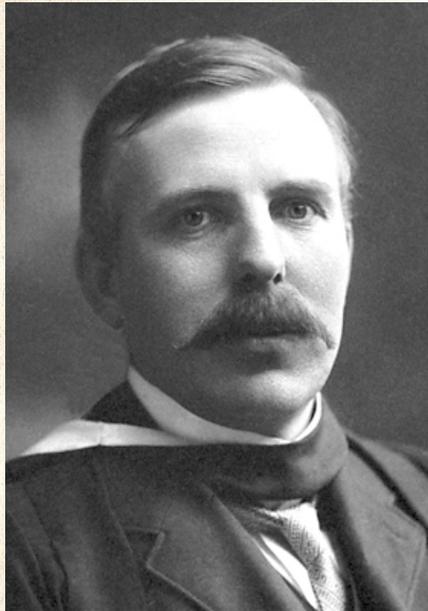
- Rutherford et Soddy mesurèrent aussi l'énergie dégagée par les transmutations
- Ils la trouvèrent 10^4 à 10^5 fois supérieure à celle d'une réaction chimique
- ☞ confirmation des travaux de Pierre Curie
- Rutherford suggéra en 1904 qu'une telle énergie pourrait expliquer
 - la température très élevée au centre de la Terre
 - l'énergie rayonnée par le Soleil
- Kelvin et Helmholtz avaient proposé comme source d'énergie pour le Soleil un mécanisme de **contraction gravitationnelle** → âge < 30 millions d'années
- 1905 : équivalence masse-énergie d'Einstein
 - $E = mc^2 \Rightarrow 1 \text{ gramme} \Leftrightarrow 10^{14} \text{ J}$
 - ☞ une variation (*indéetectable*) de 1 millionième de la masse d'un corps radioactif suffirait à expliquer l'origine de l'énergie rayonnée
 - (combustion 1 g pétrole $\Leftrightarrow 4 \times 10^4 \text{ J}$)
 - **Bertram Boltwood** établit que le plomb était l'élément terminal des chaînes de transmutation
 - En 1907, il utilisa le **rapport plomb/uranium** des roches pour les dater (suivant une suggestion de Rutherford)
 - \Rightarrow âges de 400 millions à 2 milliards d'années

NOBEL !

« All science is either physics or stamp collecting »

Rutherford

- Ernest Rutherford reçut le prix Nobel de **chimie** en 1908 « pour ses recherches sur la transmutation des éléments et la chimie des substances radioactives »
- Ce n'était que le *début* de sa carrière scientifique



- Sa conférence Nobel (11 décembre 1908) porta sur «*La nature chimique des particules alpha*»

À SUIVRE !



Mais c'est tout pour aujourd'hui!