

CHAMPS & PARTICULES

LA RADIOACTIVITÉ

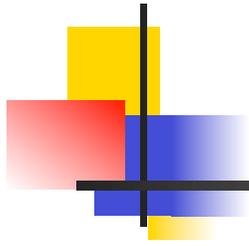


Alain Bouquet

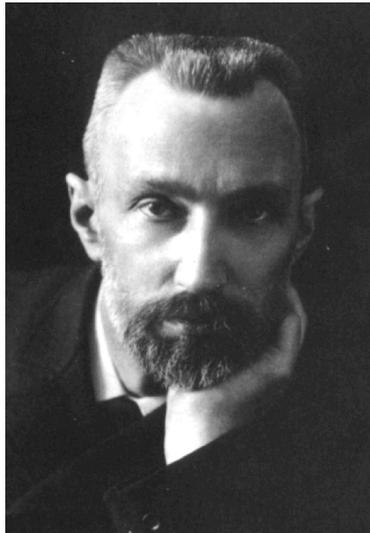
Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA



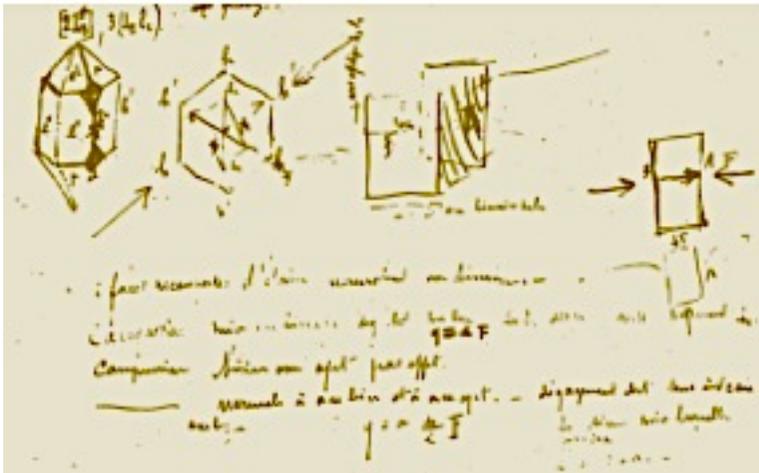


LES CURIE



Pierre Curie (1859-1906)

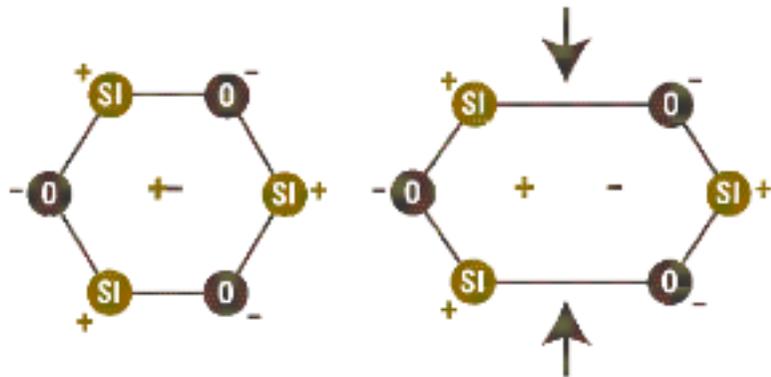
- Autodidacte → la voie royale (Sorbonne, Académie des Sciences...) lui est d'emblée fermée
- Découvre – et explique – la piézoélectricité en 1880 avec son frère Jacques



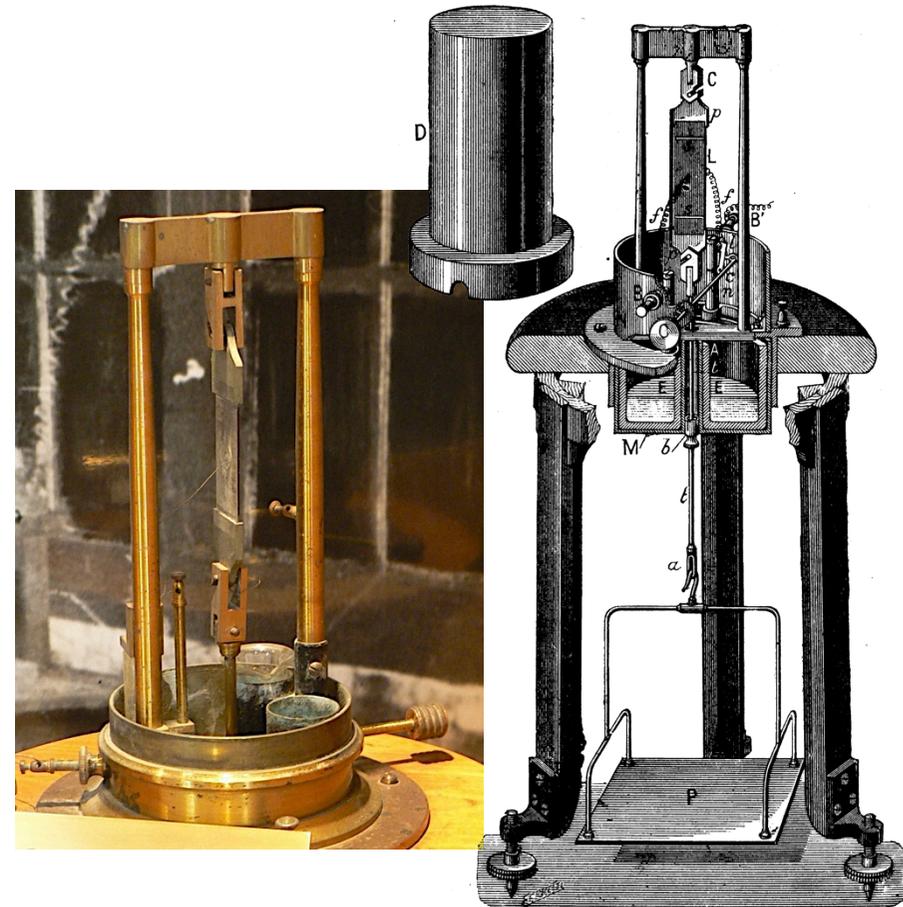
Pierre et Jacques Curie et leurs parents

La piézoélectricité

- Une pression sur un cristal de quartz déplace les charges électriques
- → champ électrique → courant
- inversement champ → pression
- ⇒ courant alternatif ↔ vibration du quartz

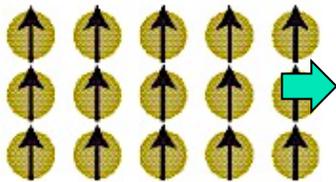


- Balance à quartz : le quartz sert de capteur de pression (ou de tension)

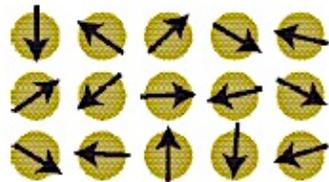


Magnétisme & instrumentation

- Travaux sur les effets de température sur les propriétés magnétiques (thèse en 1895)
 - au dessus de la température de Curie, le fer perd son aimantation ($T_C = 1043K$)



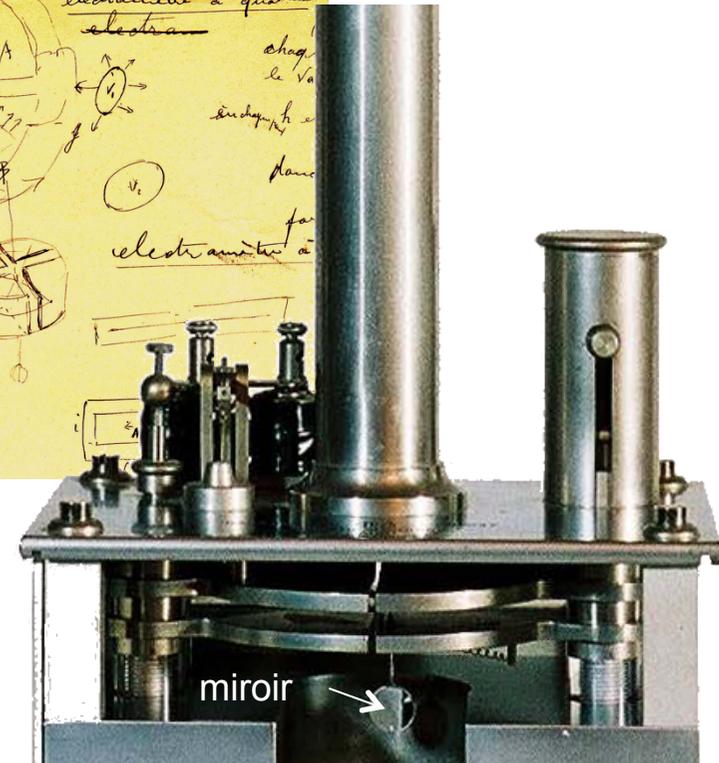
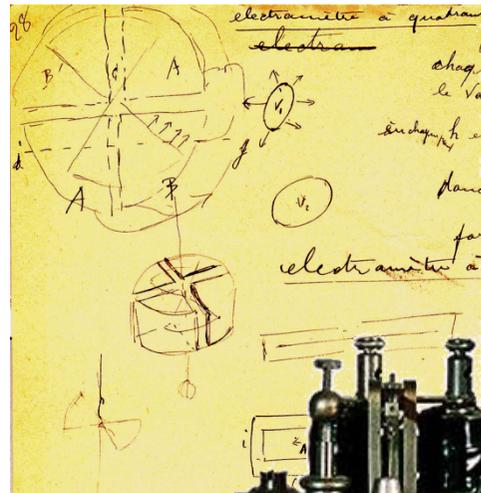
FERROMAGNÉTISME : le champ magnétique que les électrons exercent les uns sur les autres les aligne. Le matériau est un aimant permanent.



PARAMAGNÉTISME : les électrons s'orientent sous l'effet du champ magnétique d'un aimant.

- Travaux majeurs sur les principes de symétrie
 - → principe de Curie
- Professeur à l'École de Physique et Chimie Industrielles de la Ville de Paris (actuelle ESPCI) en 1882

- Instruments de précision
 - Électromètre à quadrants 1885
 - Balance à quartz 1890



Maria Skłodowska Curie (1867-1934)

- Cinquième enfant du professeur Skłodowski, Maria devint, après son baccalauréat à 16 ans, préceptrice dans la famille Żorawski pour aider sa sœur Bronisława à faire ses études de médecine à Paris
- Elle l'y rejoignit en 1891
- Études à la Sorbonne (licence de physique en 1893, de mathématiques en 1894)
- Bourse en 1894 pour l'étude des propriétés magnétiques des métaux
- ☞ elle est mise en contact avec un bon spécialiste du sujet : Pierre Curie



Maria, Bronisława et Helena autour de leur père

Pierre et Marie – à la vie, à la mort...

- 26-07-1895 : mariage



- 1895-1896 : agrégation de physique

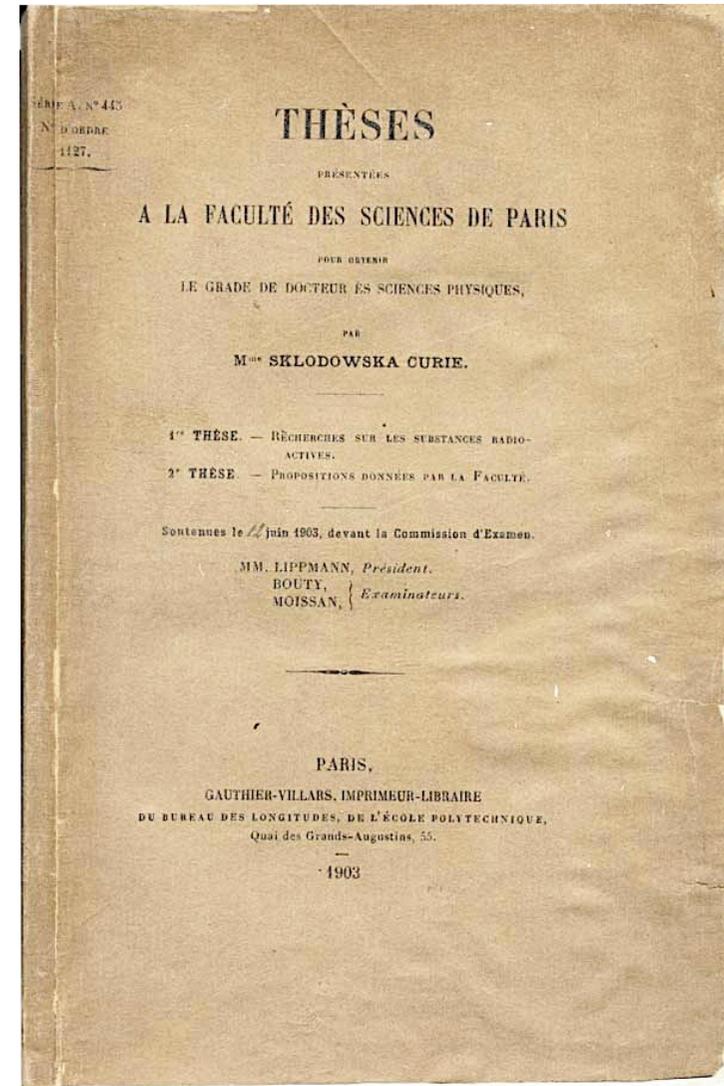
- Voyage de noces



- 12-09-1897 : naissance d'Irène
- 6-12-1904 : naissance d'Eve

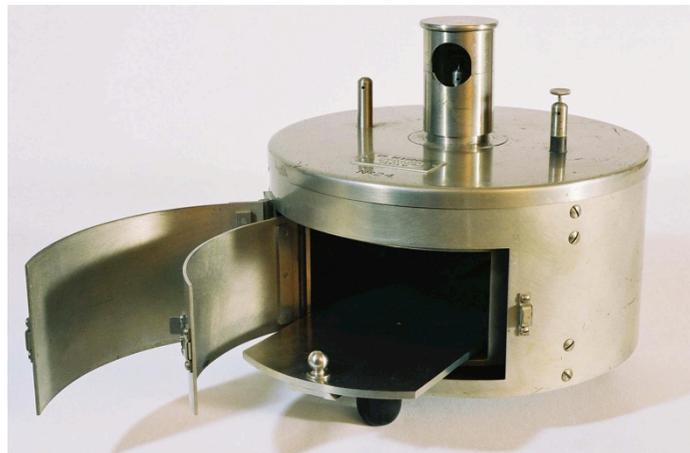
Une thèse

- Reçue première à l'agrégation, Marie Curie préféra se lancer dans une thèse de doctorat
- Pierre suggéra à Marie fin 1897 de reprendre pour sa thèse l'étude des rayons « uraniques » abandonnée par Becquerel
- Elle soutint le 25 juin 1903 sa thèse « *Recherches sur les substances radio-actives* »
- Entretemps, elle avait découvert avec Pierre
 - le polonium
 - le radium
- et ils reçurent ensemble cette année là le prix Nobel de physique pour ces travaux



Chambre d'ionisation et électromètre

- Becquerel avait remarqué que le rayonnement de l'uranium rendait l'air conducteur (il ionisait l'air)
- D'où l'idée de Pierre Curie de mesurer l'intensité du rayonnement via l'intensité du courant traversant une chambre d'ionisation

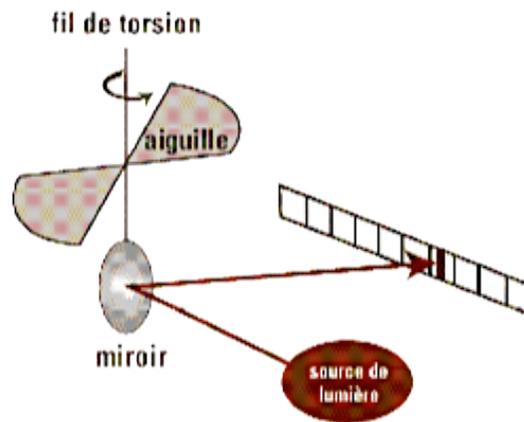


- Montage très délicat, mais très sensible grâce à l'électromètre à quadrants inventé en 1872 par Kelvin, et amélioré par Pierre



Principe de mesure de la radioactivité

- On place un échantillon dans la chambre d'ionisation
- s'il est radioactif, il ionise l'air
- un courant passe et il fait tourner l'aiguille de l'électromètre
- la vitesse de déplacement du spot mesure l'intensité i du courant



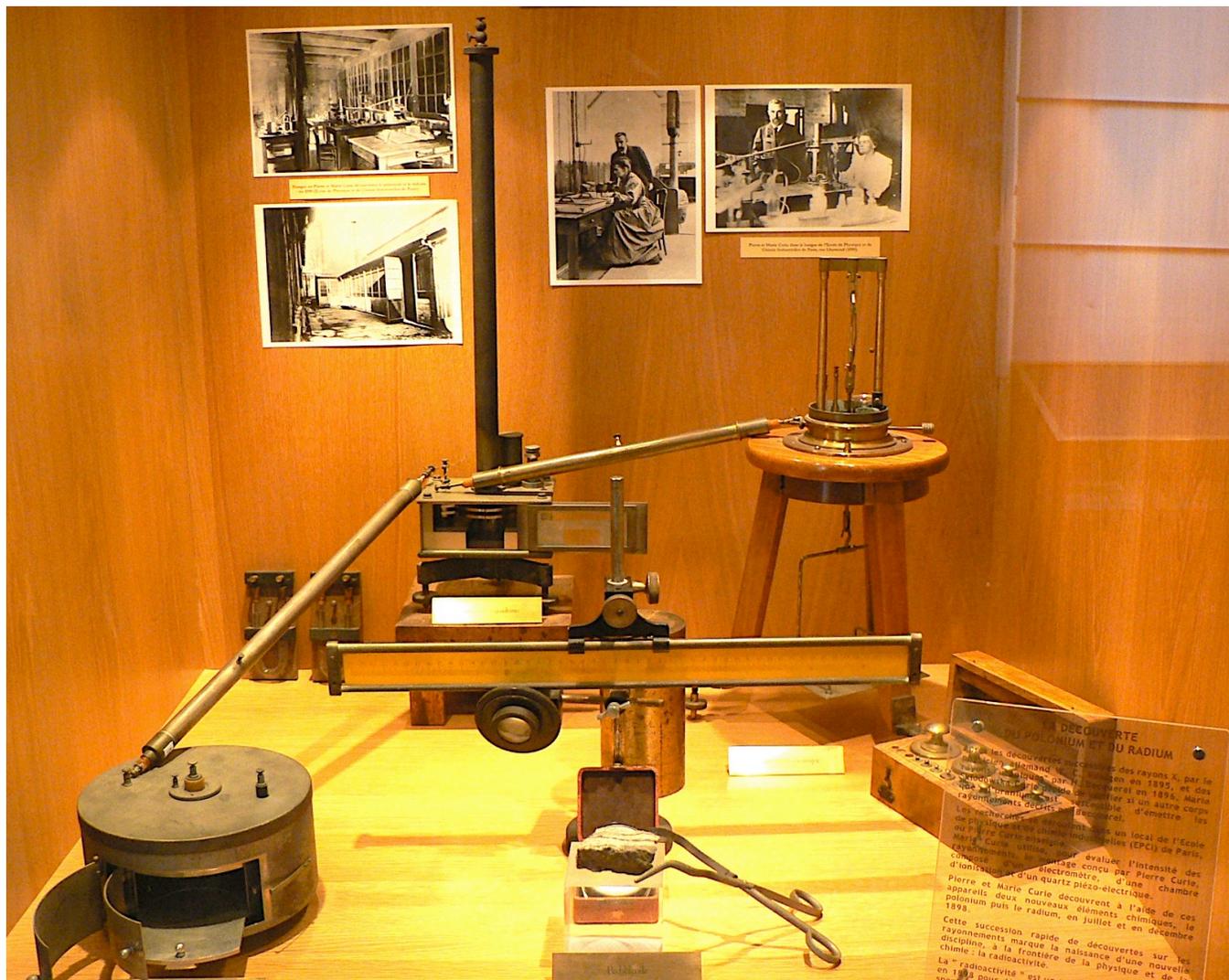
- l'intensité du courant est d'autant plus élevée que l'échantillon est radioactif

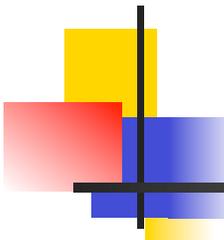
■ Raffinement de Pierre Curie : méthode différentielle

- on ajoute la balance à quartz au montage
- le poids génère une charge électrique Q
- et on mesure le temps t nécessaire au courant de la chambre d'ionisation pour équilibrer la charge $Q \rightarrow i = Q/t$
- en pratique, c'est *très* fastidieux !
- (méthode utilisée jusque dans les années 1950)

☞ chronomètre en main !

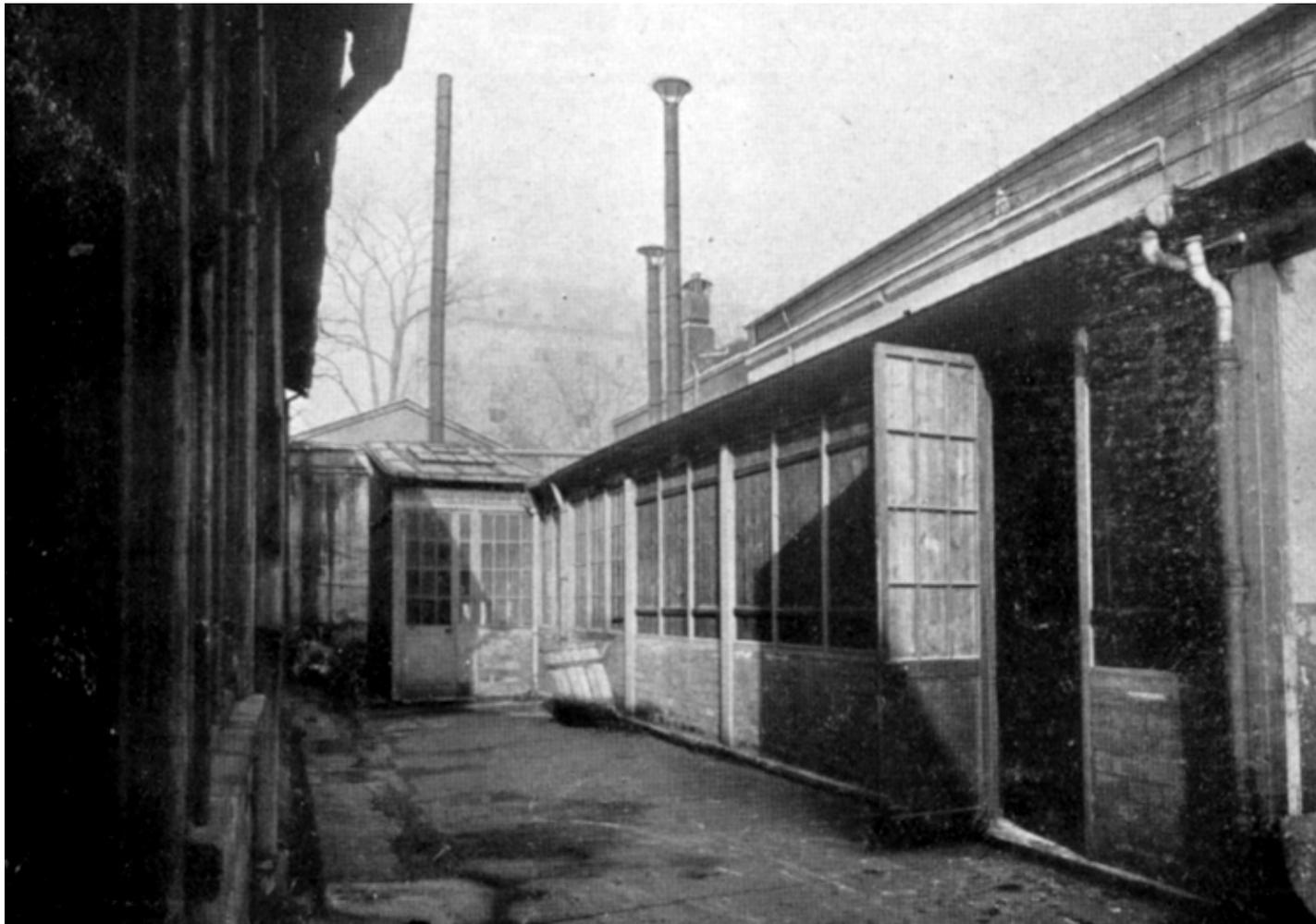
Le « montage Curie »





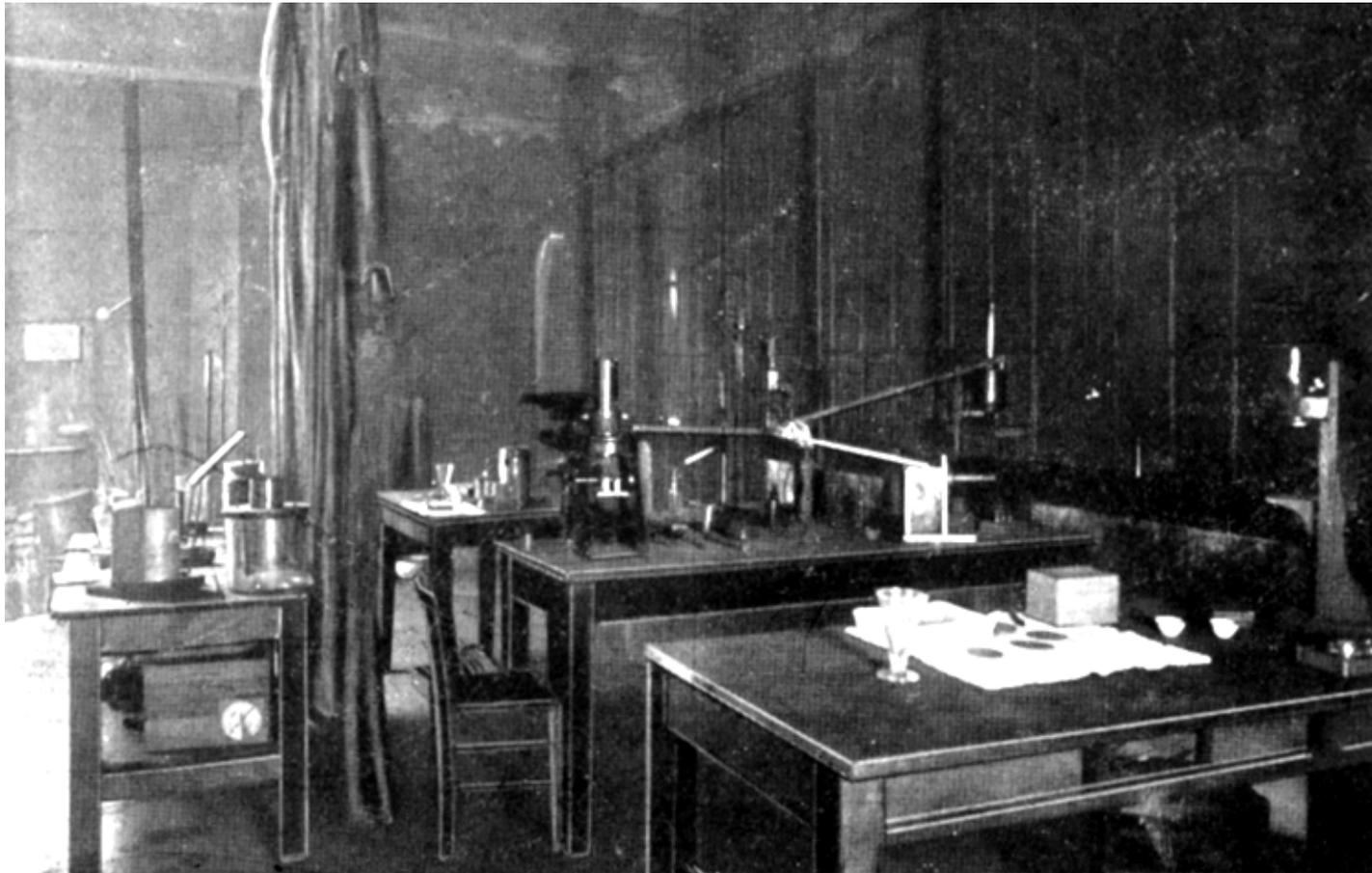
Laboratoire des Curie à l'EPCI de Paris

- Extérieur



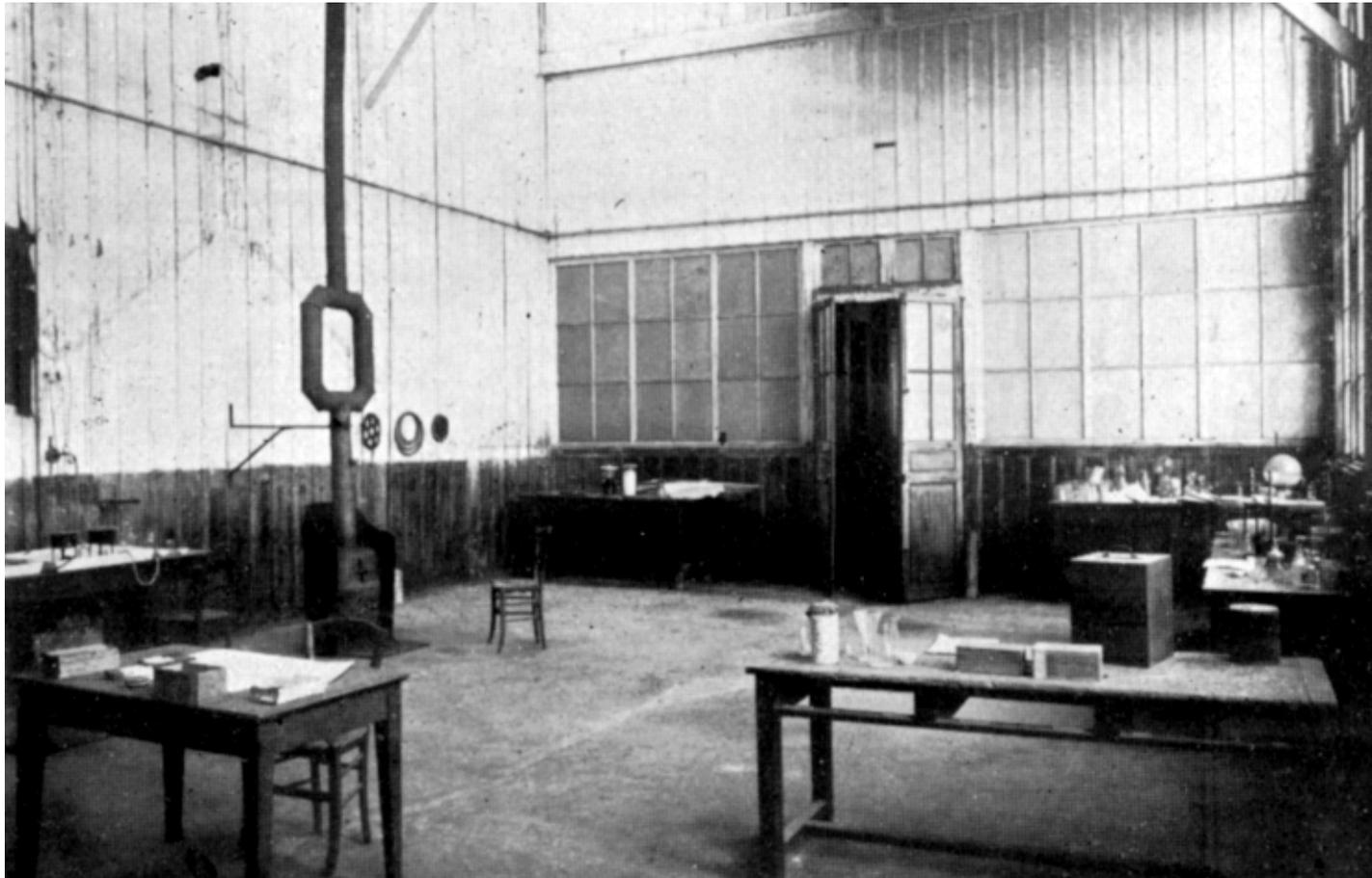
Laboratoire des Curie à l'EPCI de Paris

- Le laboratoire de physique

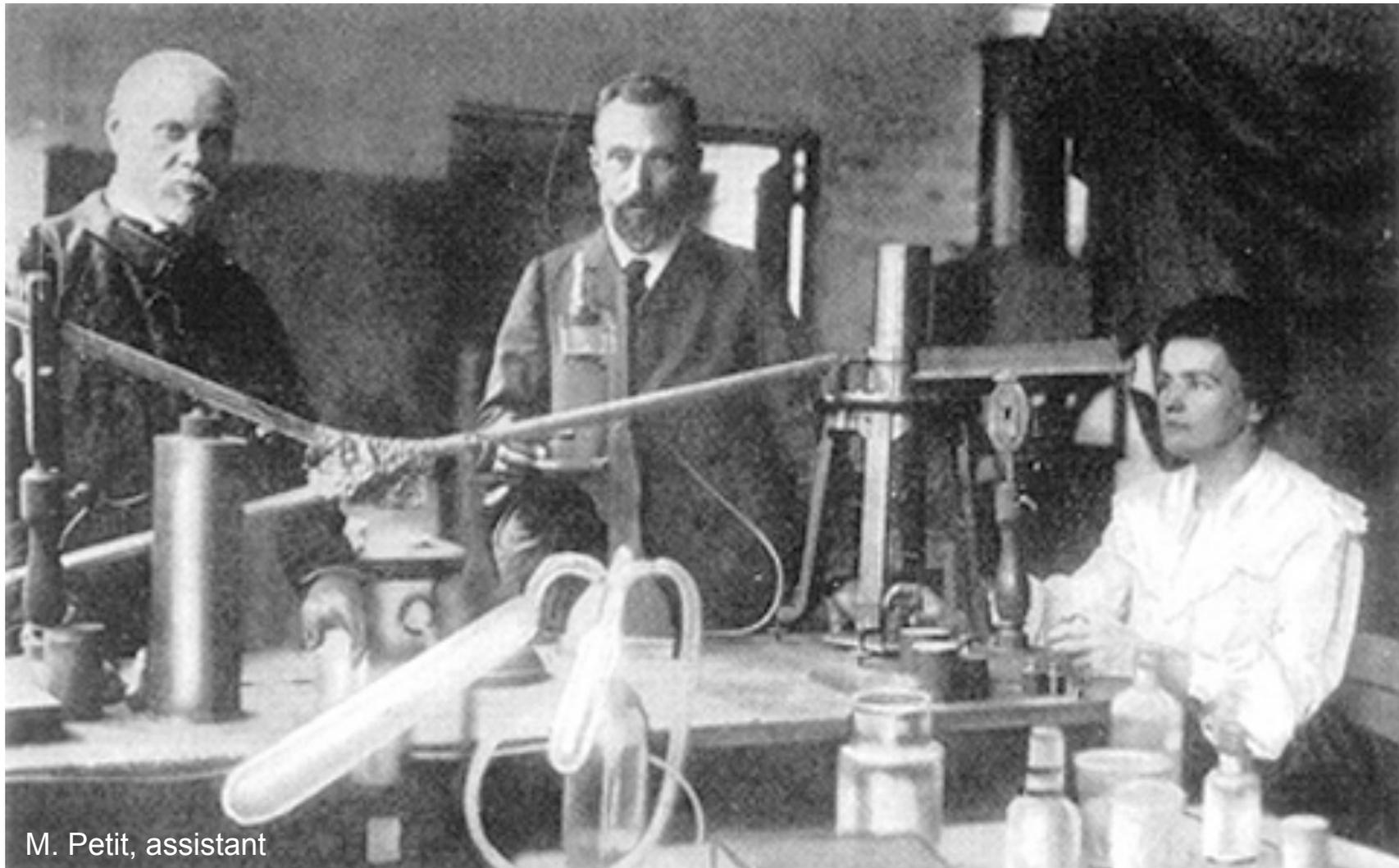


Laboratoire des Curie à l'EPCI de Paris

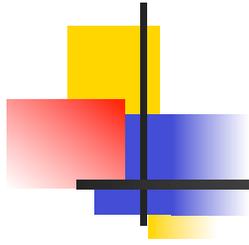
- Le laboratoire de chimie



Pierre et Marie Curie au travail (1898)



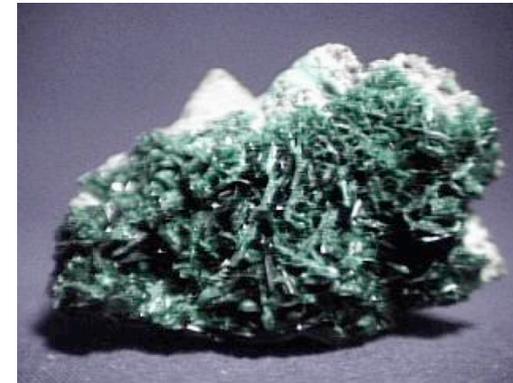
M. Petit, assistant



POLONIUM ET RADIUM

Une bizarrerie de la pechblende

- Marie Curie découvrit le 24 février 1898 que le thorium ($Z=90$) émettait des rayonnements ionisants comme l'uranium ($Z=92$). Mais Gerhardt Schmidt l'avait annoncé dès le 14 février !
- Elle avait constaté avec surprise le 17 février 1898 que la pechblende et la chalcocite, deux minerais d'uranium, étaient plus actives que l'uranium contenu

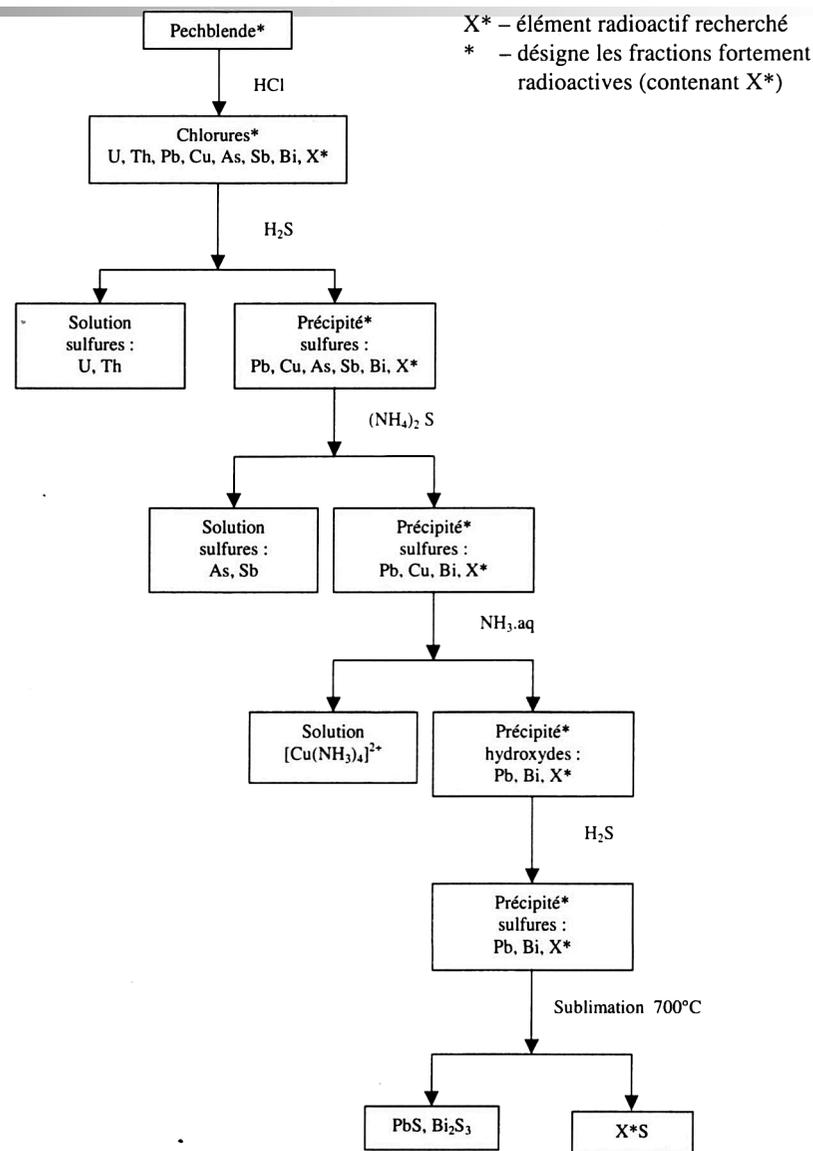


Deux minéraux d'uranium : la pechblende (oxyde d'urane) et la chalcocite (phosphate de cuivre et d'uranyle) sont beaucoup plus actifs que l'uranium lui-même. Ce fait est très remarquable et porte à croire que ces minéraux peuvent contenir un élément beaucoup plus actif que l'uranium. J'ai reproduit la chalcocite par le procédé de Debray avec des produits purs; cette chalcocite artificielle n'est pas plus active qu'un autre sel d'uranium.

Note du 12
avril 1898

Un nouvel élément ?

- Marie Curie avait déjà exploré tous les éléments chimiques sur lesquels elle avait pu mettre la main: seuls l'uranium et le thorium était actifs
- Marie Curie inventa à cette occasion le terme de **radioactivité**
- Il s'agissait donc d'un **nouvel élément**
 - donc en quantité infinitésimale
 - donc extrêmement radioactif
- Pierre Curie la rejoignit dans ses recherches
- Ils isolèrent le nouvel élément en suivant la radioactivité
- Puis ils le séparèrent du bismuth (chimiquement très voisin) par cristallisation fractionnée



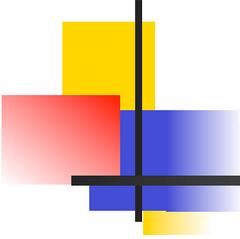
Un travail long et pénible

- La substance nouvelle était 400 fois plus active que l'uranium. Les Curie décidèrent de l'appeler **polonium** ($Z=84$) en l'honneur de la patrie de Marie
- Note du 13 juillet 1898: « *Sur une substance nouvelle radio-active, contenue dans la pechblende* »

Les Curie avaient en réalité isolé du sulfure de bismuth avec des **traces** de polonium (moins d'une partie par million). Le Po_{210} est 10 *milliards* de fois plus radioactif que l'uranium

Le célèbre « hangar » où se faisait la mesure de radioactivité à chaque étape de la séparation du polonium



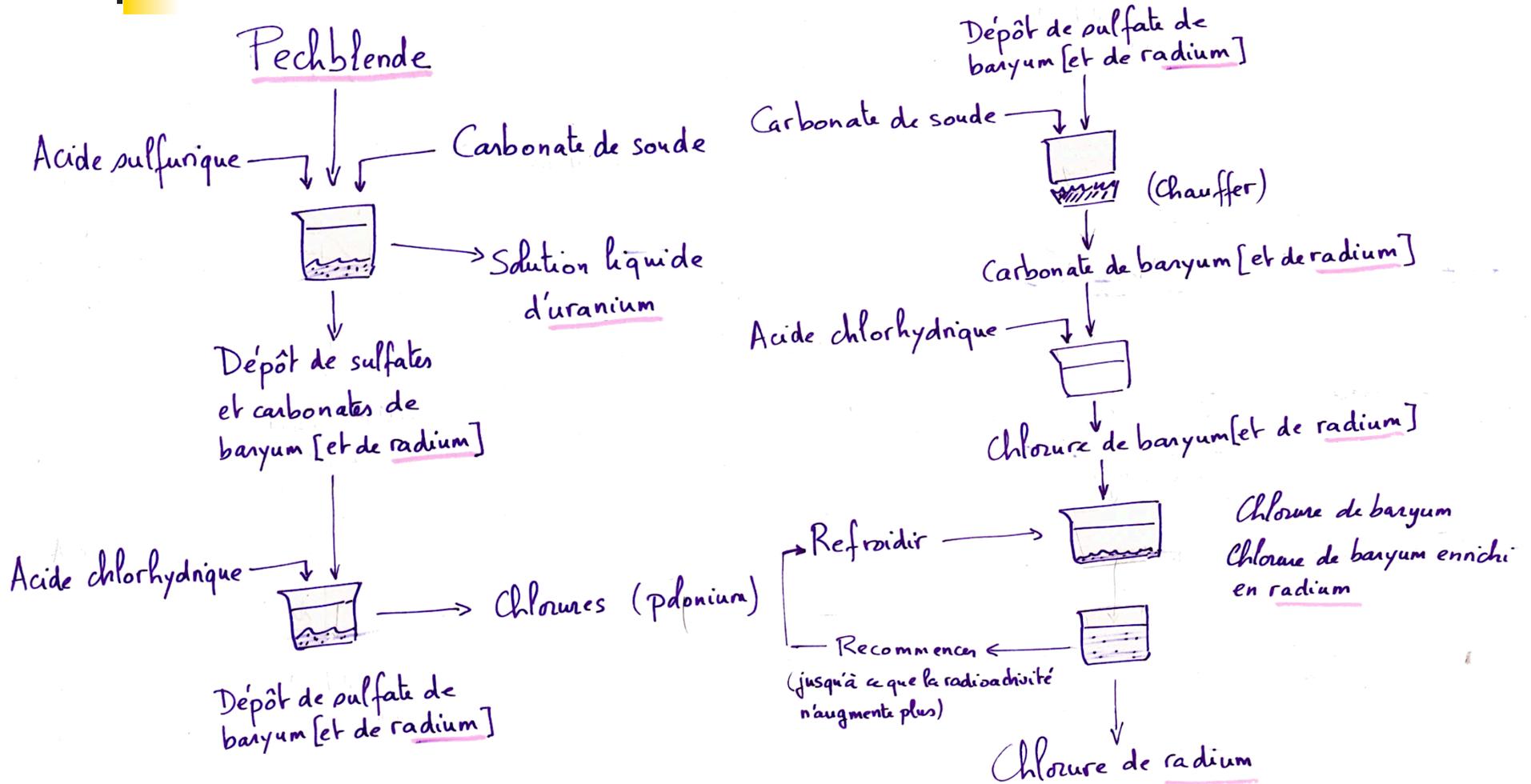


Radium

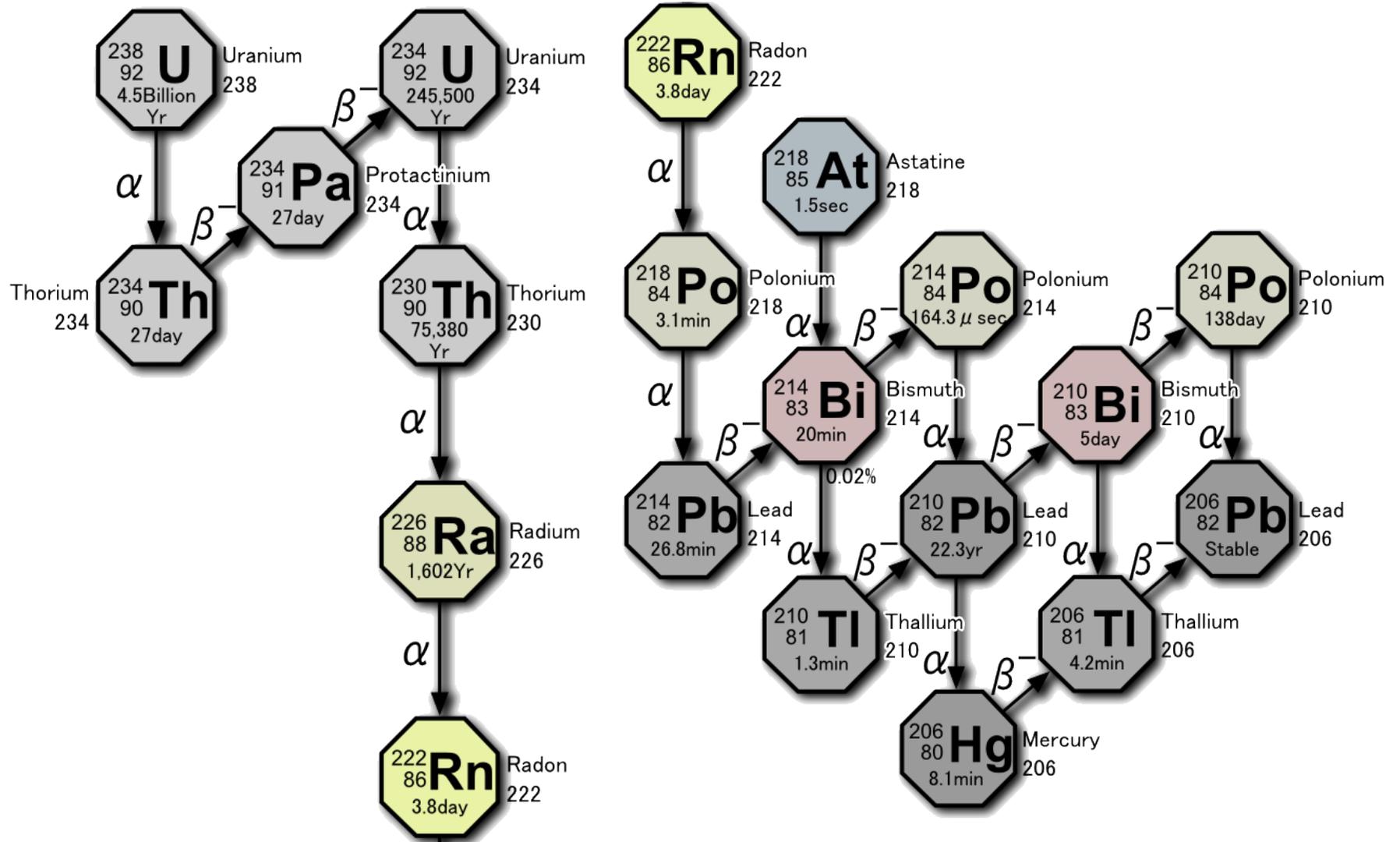
- En isolant le polonium, les Curie avaient repéré la présence d'une **autre** substance radioactive, au comportement chimique complètement différent
- Après livraison de 5 kg de pechblende, ils reprirent en novembre 1898 leurs séparations chimiques
- La deuxième substance était chimiquement analogue au baryum, et 1000 fois plus radioactive que l'uranium
- Les Curie annoncèrent le 26 décembre cette nouvelle substance, baptisée **radium** (Z=88)
- En 1902, Marie parvient à isoler 0,1 g de chlorure de radium, lui permettant d'estimer à 225 ± 1 sa masse atomique

Ici encore, les Curie avaient en réalité isolé du sulfure de baryum contenant moins de 0,1% de radium, qui est 3 *millions* de fois plus radioactif que l'uranium

La recette du radium



Uranium, Radium, Polonium et les autres

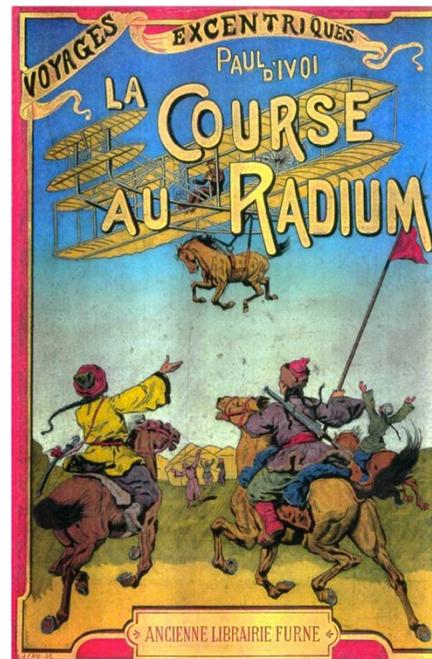
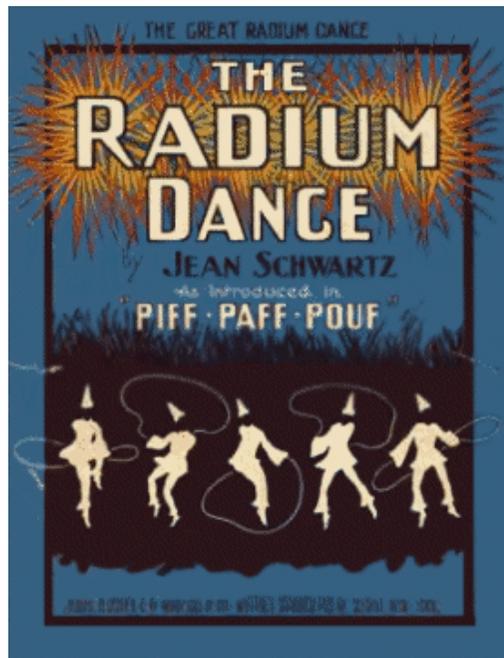


Radium



- Tout le monde se passionna pour le radium
 - Les physiciens, de Paris à Londres, Cambridge, Berlin, Heidelberg, Halle, Vienne...
 - Les romanciers, journalistes, dramaturges, danseurs, hommes politiques...
- Becquerel s'y remit

Crookes inventa le spinthariscopes



Du radium partout

- Dans le laboratoire

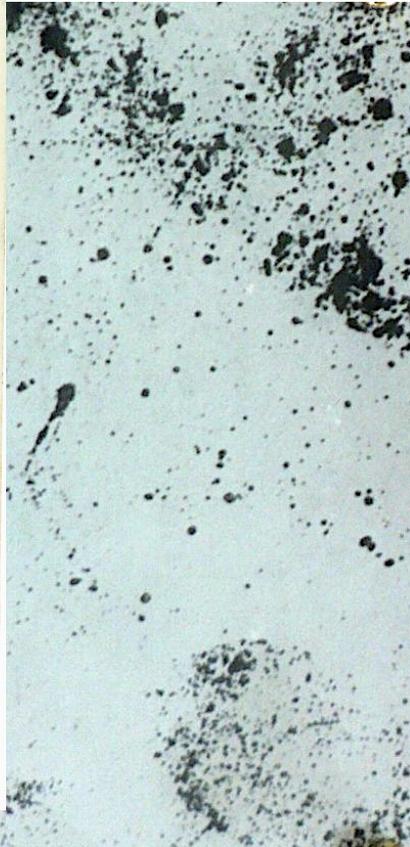
27 avril

$Or + Cauro = 14,748,05$
 $id + Ra d^c = 14,857,3$ $Ra d^c = 9109,25$
 $Creusid sidre = 10,314,65$ $Ag d = 9106,99$
 $Ca + Ag d^c = 10,421,12$

7.39270	0.10925	0.599
7.02723	0.02630	0.29
2.41993	Ra 0.08295	0.2723
2.91882		
2.41993		
0.49889		

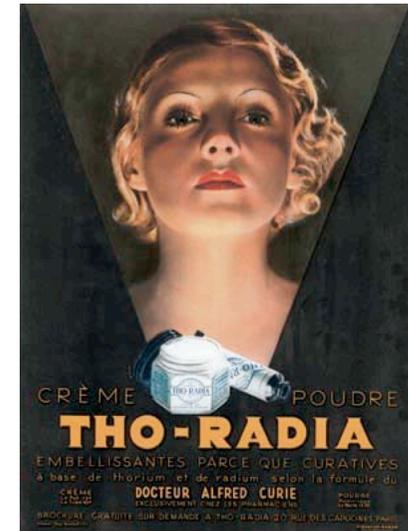
$\frac{Ra}{Cr} = 3.154$ $\frac{1.85203}{0.49889}$
 2.34892
 $Ra = 223.3$

Répété redit avec les et HCl, dans
 le creuset, poids
 $Creusid + argent = 10.3942$
 10.31465
 $Ra = 0.07955$
 $id = 0.02130$
 $Ra d = 0.10564$
 Différence avec Ag d trouvé précédemment
 0.00893 m
 y a-t-il en un peu de Ag non adhérent au creuset?



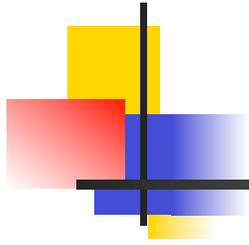
Fiche de calcul rendue radioactive par les dépôts (le négatif est noirci par la radioactivité)

- Dans toute la société



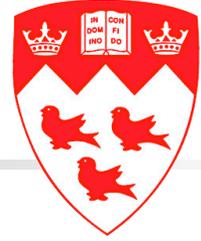
Vêtements, produits de beauté, aliments pour animaux, fontaines à eau enrichie en radium, le radium est partout promesse de santé et de jeunesse...



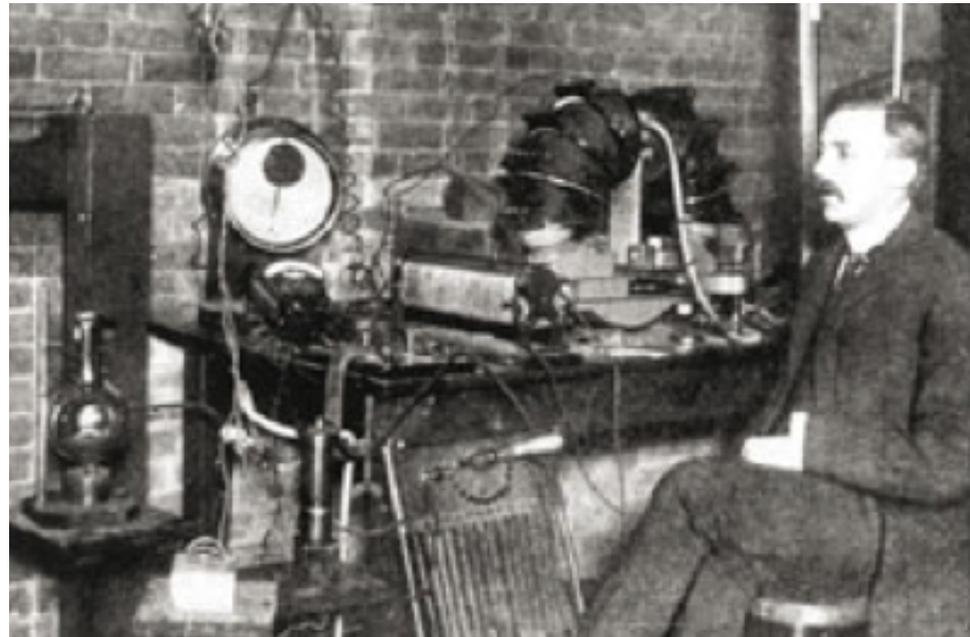


RUTHERFORD

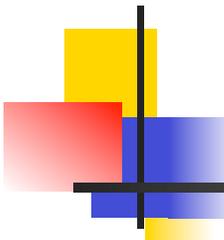




- Université anglophone de Montréal depuis 1821
- Département (et chaire) de physique créés en 1891 par scission du département de mathématiques et sciences naturelles, grâce à un don du philanthrope (et magnat du tabac quoique non-fumeur) William MacDonald
- Création d'une seconde chaire en 1893, avec un laboratoire très bien équipé pour l'époque
- Nomination de Rutherford comme professeur de physique à l'automne 1898
 - inconvénient majeur: Montréal était 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, et [Frederick Soddy](#) !



Ernest Rutherford en 1905 à McGill



Moi j'ai dit bizarre ? Comme c'est bizarre...

- À McGill, Rutherford se focalisa à partir de 1899 sur 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
- 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 [$t_{1/2} = \tau \ln 2$]
-  il parut invraisemblable que ce soit un nouvel élément : il serait **instable** !

La radioactivité de l'émanation

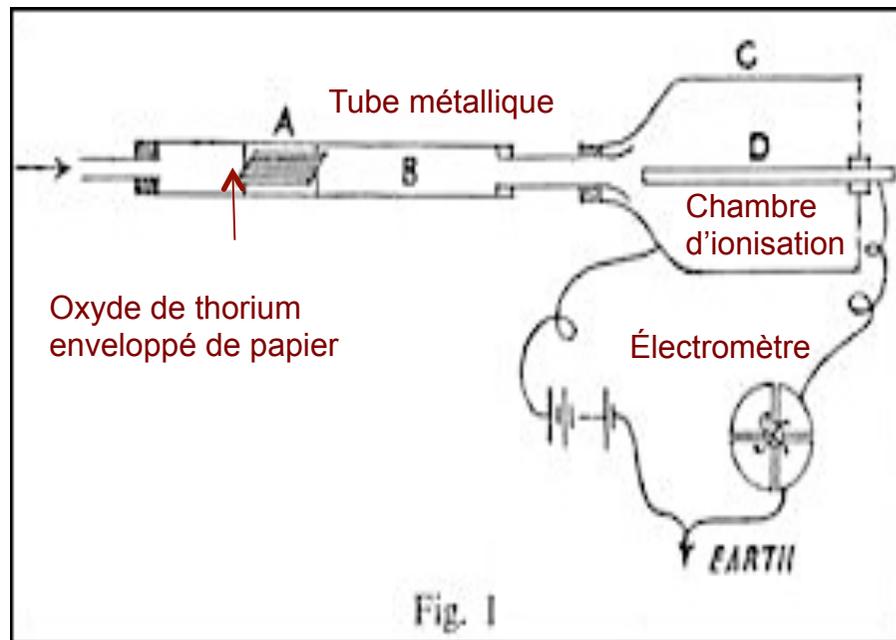
- Montage simple mais astucieux
 - oxyde de thorium enveloppé dans du papier (laissant passer l'émanation mais pas le rayonnement α du thorium lui-même)
 - Émanation aspirée par un tube dans une chambre d'ionisation, reliée à un électromètre mesurant la radioactivité de l'émanation

■ 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

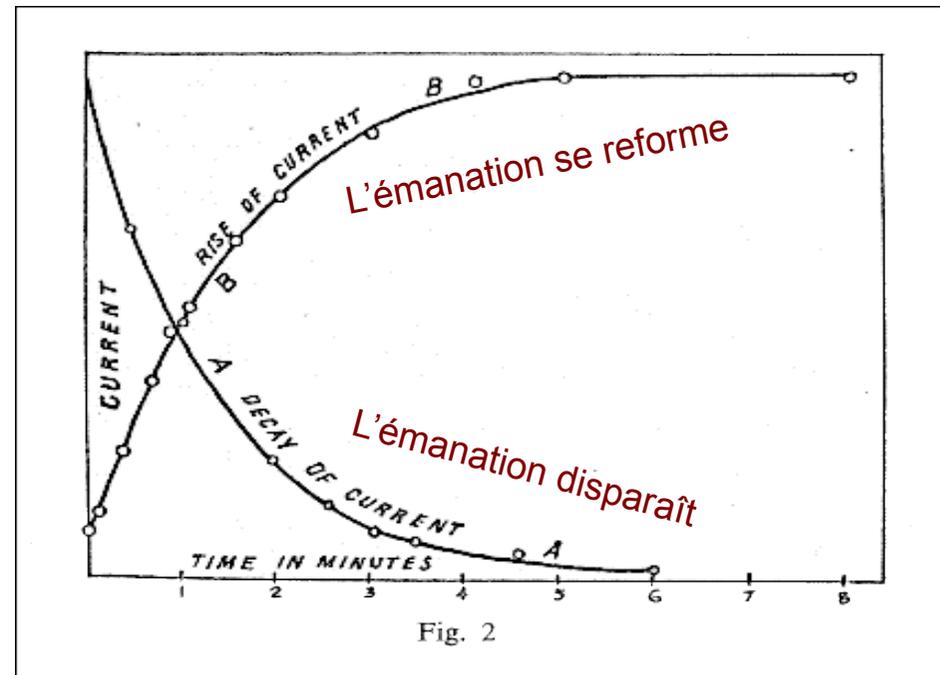
- $t = 0$ courant 100%
- $t = 62$ s courant 51%
- $t = 118$ s courant 23%
- $t = 210$ s courant 7%
- $t = 360$ s courant 2%



Montage de Rutherford (septembre 1899)

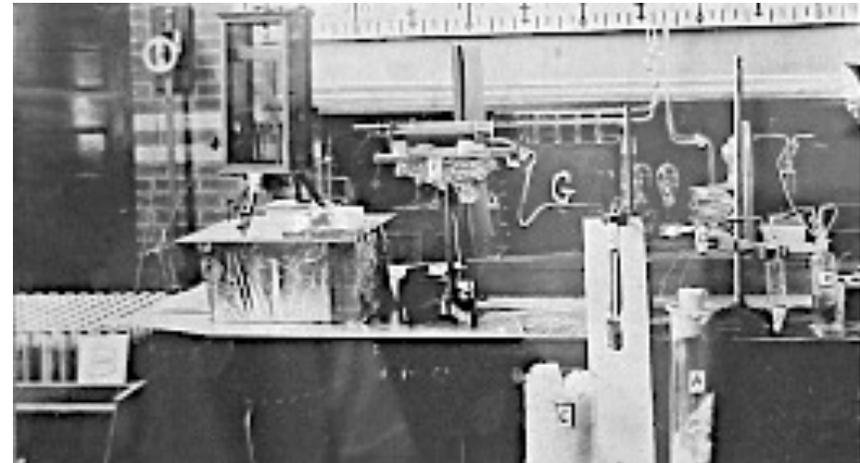
Rutherford alla plus loin

- Rutherford vérifia que l'émanation du thorium était
 - un gaz, en intercalant des obstacles mécaniques (coton par exemple)
 - 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
 - aspirer toute l'émanation
 - et mesurer l'augmentation de radioactivité au fur et à mesure qu'elle se reformait

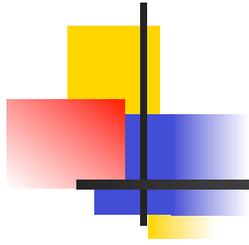


Émanation, thoron, radon, niton...

- 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)
 - → émanation → émanation du thorium → thoron → **radon 220** ($\frac{1}{2}$ vie 56 s)
- 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



TRANSMUTATIONS

Frederick Soddy (1877-1956)

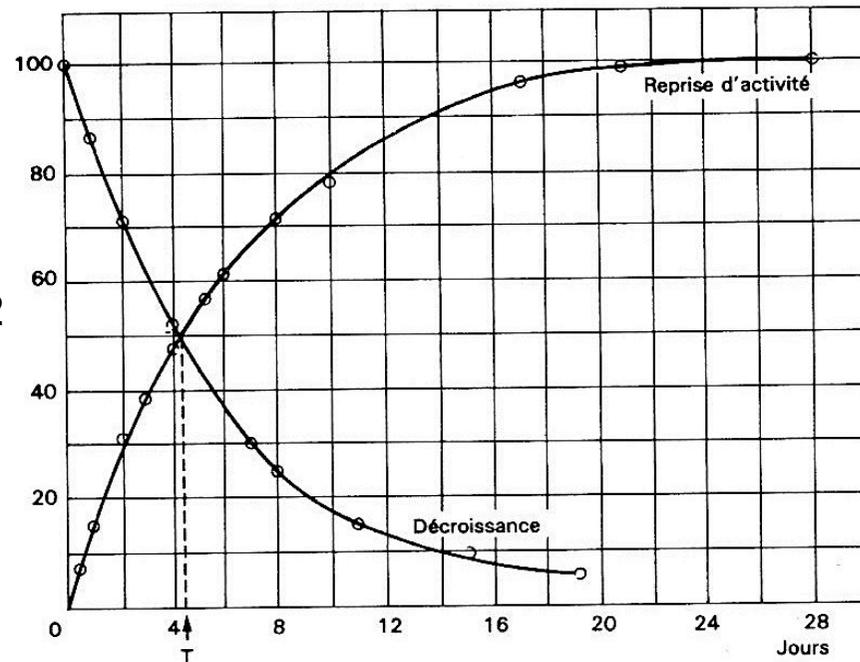
- Frederick Soddy fut nommé en 1900 démonstrateur de chimie à McGill, où il resta 2 ans



- 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 ?

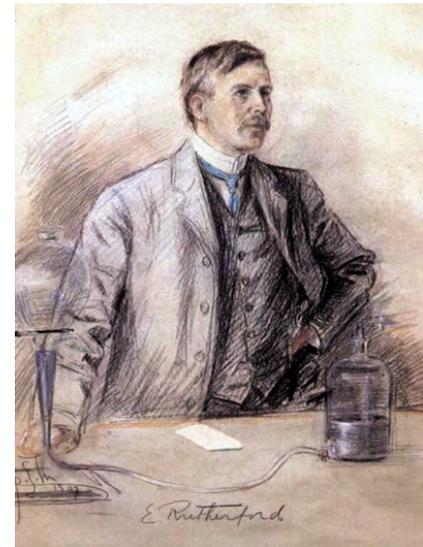
- Rutherford voulut vérifier si le thorium était bien à l'origine de l'émanation
- Au cours du printemps 1901, Soddy isola du thorium très pur... et constata que l'émanation provenait de ce qu'il avait éliminé !
- ☞ il y avait un autre élément, intercalé entre le thorium et l'émanation, et à l'origine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



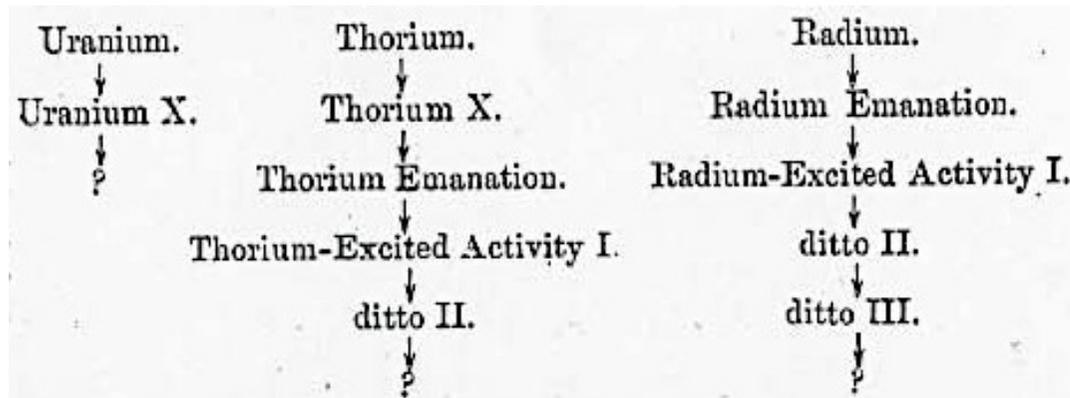
Soddy : «C'est une transmutation!»

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

Thorium, mésothoriums, thorium X, A, B, C...

- Rutherford et ses collaborateurs esquissèrent 3 familles radioactives

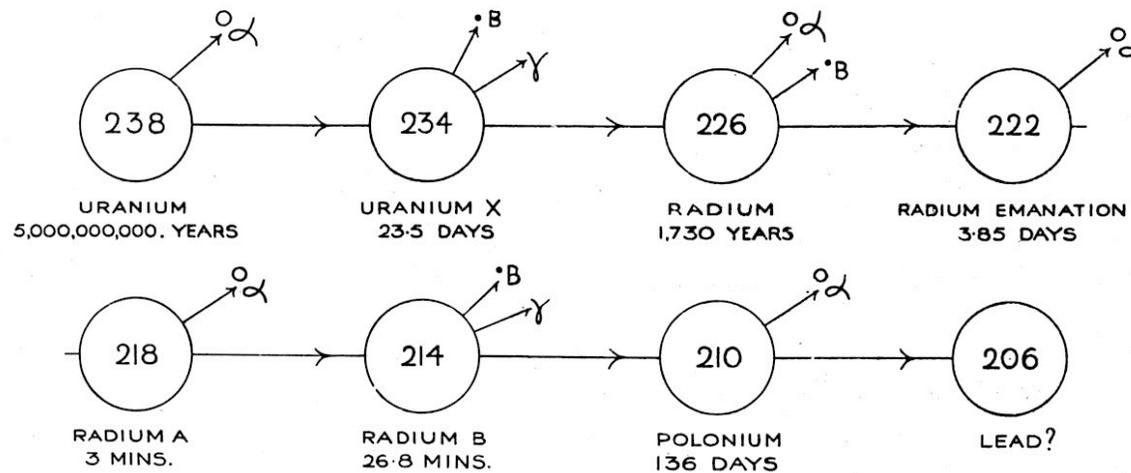
- celle de l'uranium
- celle du thorium
- celle du radium



- Otto Hahn découvrit chez Ramsay en 1905 qu'un **radiothorium** s'intercalait entre le thorium et le thorium X. Il vint travailler avec Rutherford à McGill, puis découvrit en 1906-1907 à Berlin qu'un **mésothorium I** et un **mésothorium 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)

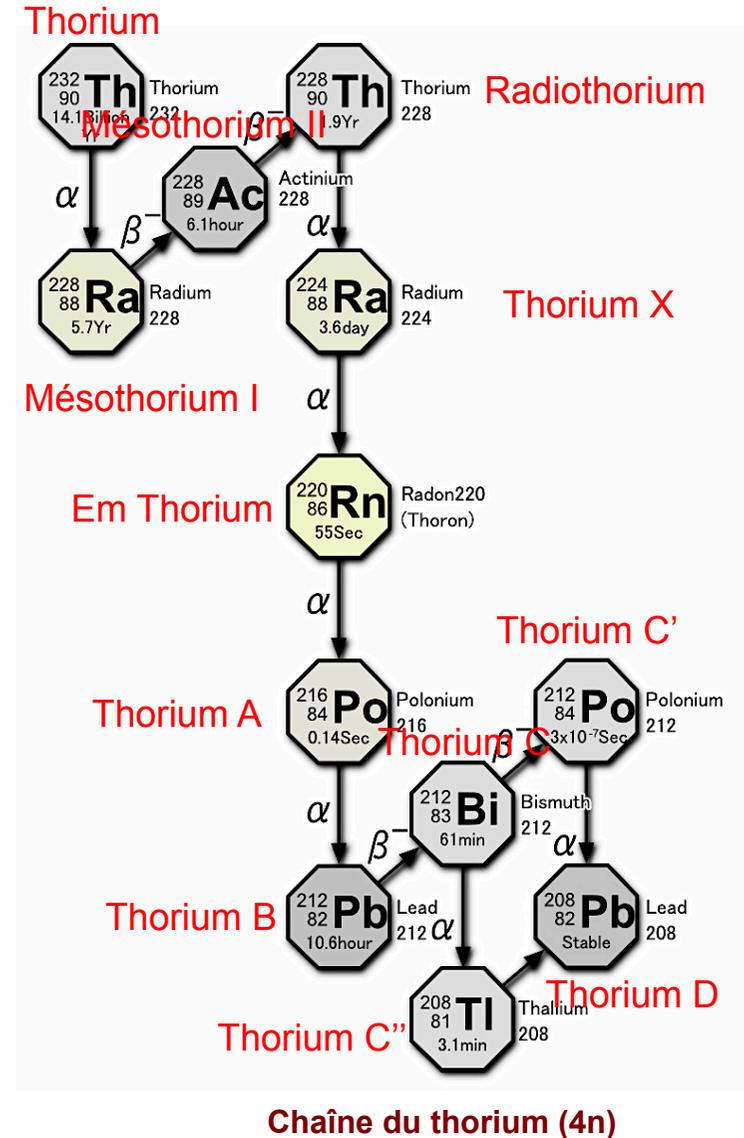


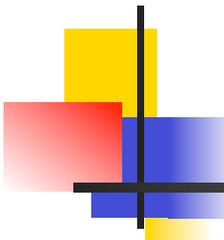
Radium em.	222Rn
Radium A	218Po
Radium B	214Pb
Radium C	214Bi
Radium C'	214Po
Radium C''	210Tl
Radium D	210Pb
Radium E	210Bi
Radium F	210Po

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

Chaînes de transmutations radioactives

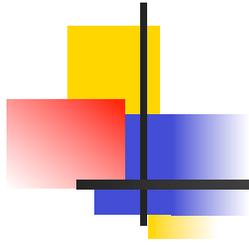
- Chaque élément d'une chaîne fabrique à un rythme constant l'élément suivant
- Et disparaît ce faisant, avec une demi-vie qui lui est propre et ne dépend pas des conditions physiques ni chimiques
- Tous les éléments de la chaîne partant du thorium (de masse atomique 232) ont une masse atomique de la forme $4n$
 - $232 \rightarrow 228 \rightarrow 224 \rightarrow 220 \rightarrow 216 \rightarrow 212 \rightarrow 208$
- L'uranium 238 possède une chaîne analogue (chaîne $4n+2$) à celle du thorium, chaîne qui passe par le radium 226 des Curie
- L'actinium 227 est lui aussi à l'origine d'un chaîne (chaîne $4n+3$), partant en réalité de l'uranium 235
- Il fallut des années pour démêler cet écheveau





Énergie et défaut de masse

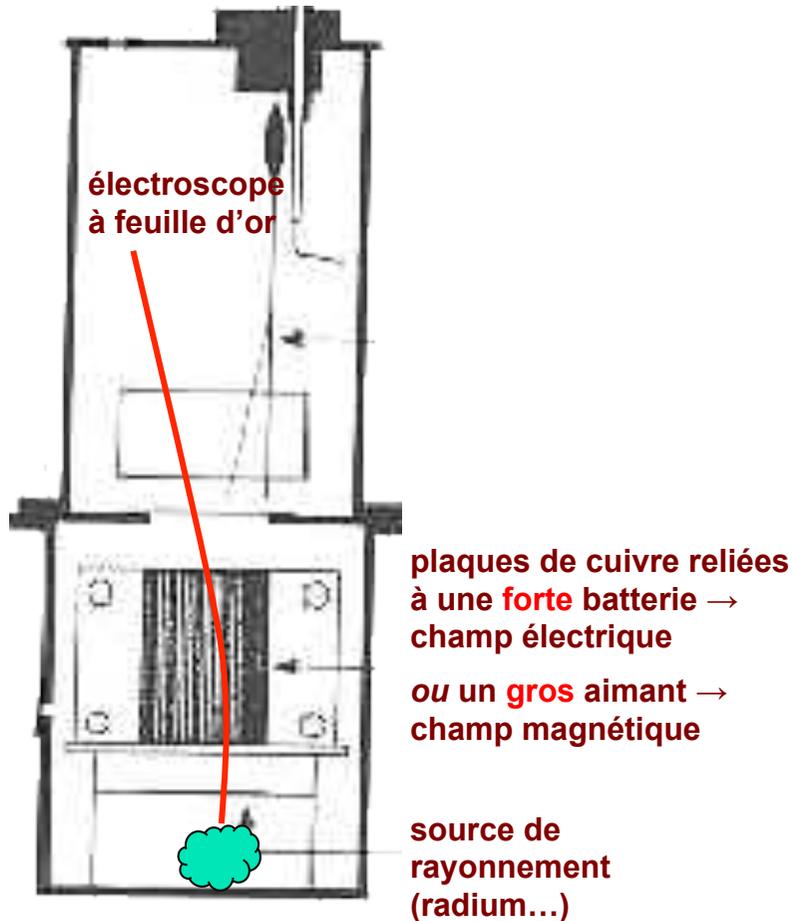
- Rutherford et Soddy mesurèrent aussi l'énergie dégagée par les transmutations
- Ils la trouvèrent 10^4 à 10^5 fois supérieure à celle d'une réaction chimique
- ☞ confirmation des travaux de Pierre Curie
- Rutherford suggéra en 1904 qu'une telle énergie pourrait expliquer
 - la température très élevée au centre de la Terre
 - l'énergie rayonnée par le Soleil
- Kelvin et Helmholtz avaient proposé une contraction gravitationnelle comme source d'énergie pour le Soleil
→ 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 (indétectable) de 1 millionième de la masse d'un corps radioactif suffisait 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



LA NATURE DES ALPHAS

La nature des alphas

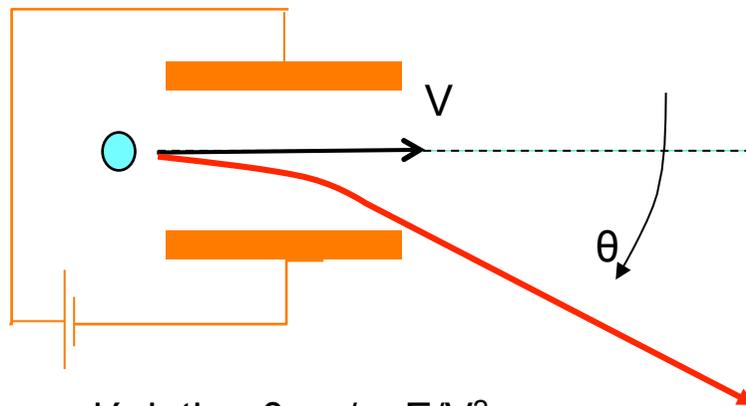
- Un montage simple (Rutherford 1903)



- Les rayons alpha sont déviés par un très fort champ électrique ou magnétique → particules chargées
- Sens de la déviation → charge positive
- Faible amplitude de la déviation → particules beaucoup plus lourdes qu'un électron → probablement des ions
- Mais de quel élément ?

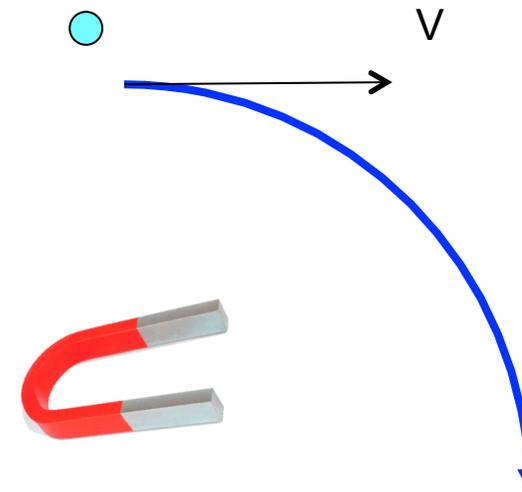
Déviations d'une charge électrique q

- Champ électrique E
- Force de Coulomb $F_{\text{Coulomb}} = qE$
- \rightarrow accélération $\gamma = q/m E$
orthogonale à la vitesse initiale



- \rightarrow déviation $\theta \sim q/m E/V^2$

- Champ magnétique B
- Force de Lorentz $F_{\text{Lorentz}} = q \mathbf{V} \times \mathbf{B}$
- \rightarrow accélération $\gamma = q/m \mathbf{V} \cdot \mathbf{B}$
orthogonale à la vitesse

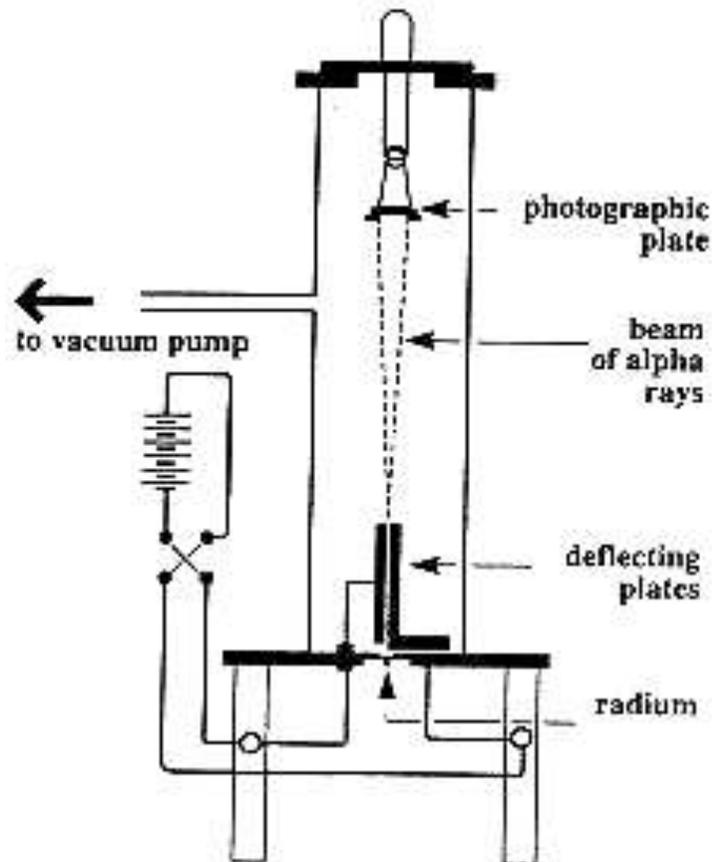


- \rightarrow trajectoire circulaire de rayon $r = m/q V/B$

Comparaison des déviations électrique et magnétique \rightarrow q/m et V *séparément*

La nature des alphas (suite)

- Rutherford mesura en 1906 les déviations des alphas dans un champ électrique, puis dans un champ magnétique

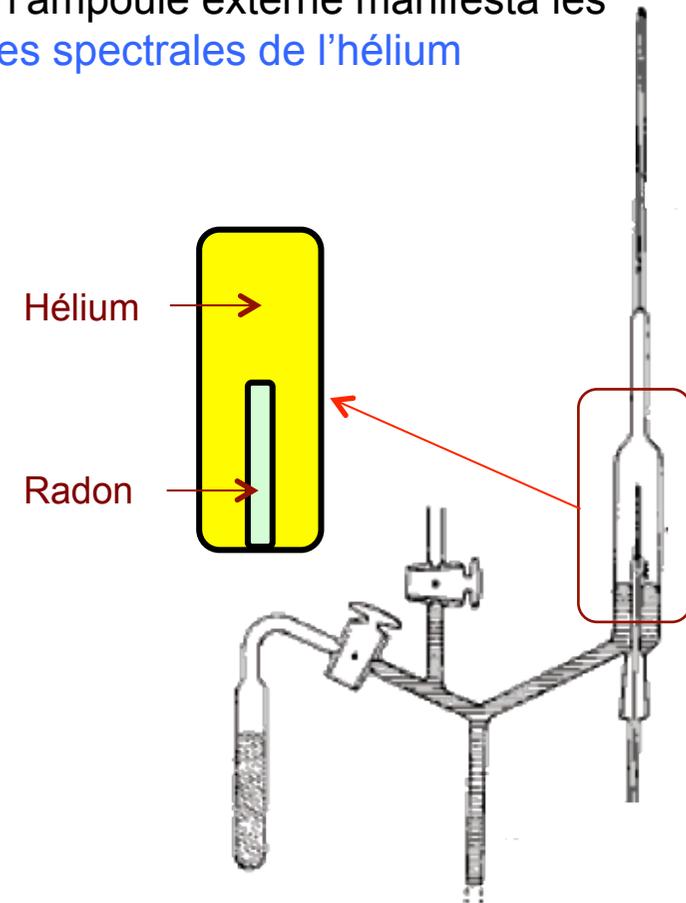


- Il démontra que les alphas étaient les mêmes *quelle que soit la source*
 - radium
 - radium A (Po 218)
 - radium F (Po 210)
 - actinium
 - thorium
- Champ électrique $\rightarrow mV^2/q$
- Champ magnétique $\rightarrow mV/q$
- $\rightarrow m/q \sim 2 * \text{ion hydrogène } H^+$
- \Rightarrow plusieurs identités possibles, (n fois la charge et $2n$ fois la masse de H^+)
dont l'ion hélium He^{++}
- et vitesses $V \sim 10\,000 \text{ km/s}$
(\Leftrightarrow énergie $\sim 2 \text{ MeV}$)

Les alphas sont bien des ions hélium

- Rutherford pensait que les α étaient des ions hélium (expliquant la présence observée d'hélium dans les minerais d'uranium et de thorium)
- Mais il demeurait possible que les α soient seulement émis *en même temps* que des atomes d'hélium
- Nommé professeur à Manchester en 1907, il décida de régler la question
- Il monta en 1908 avec Thomas Royds l'expérience suivante:
 - des α étaient produits par transmutation du radon
 - dans une ampoule interne étanche aux atomes d'hélium mais pas aux α
 - qui étaient collectés dans une ampoule externe où le vide était fait

- Au bout de quelques jours, le contenu de l'ampoule externe manifesta les raies spectrales de l'hélium

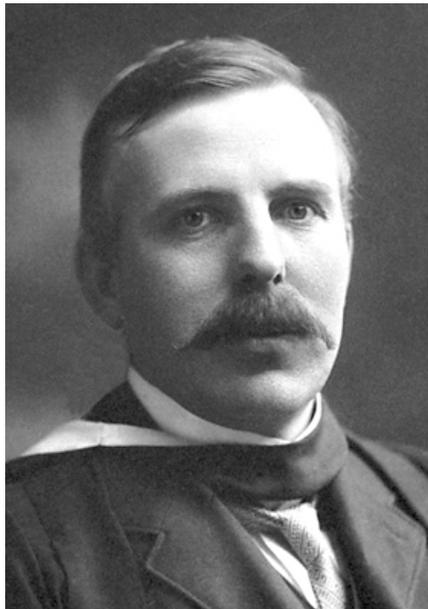


Nobel !

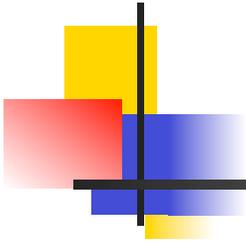
« All science is either physics or stamp collecting »

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*»



Merci de votre attention !

