

PETITE HISTOIRE  
DE LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE

6 – DE A À Z  
SODDY ET MOSELEY

Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule et Cosmologie

CNRS - Université Denis Diderot - CEA - Observatoire de Paris

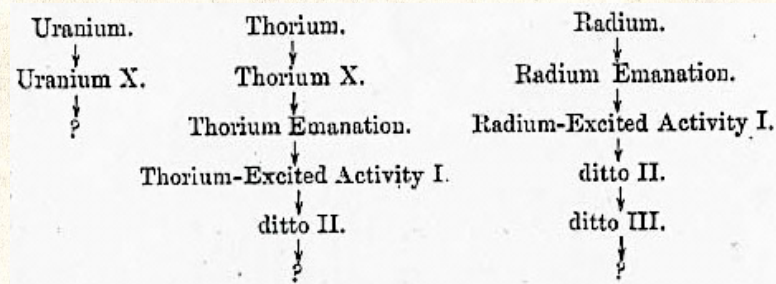


# EN PLEIN BROUILLARD



# LES SÉRIES RADIOACTIVES

- Rutherford et ses collaborateurs avaient esquissé 3 séries radioactives



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

- Soddy avait ensuite raccordé la série du radium à celle de l'uranium, et la série de l'actinium s'était ajoutée

○ Uranium I → uranium X1 → uranium X2 → uranium II → ionium → radium → émanation du radium → radium A → radium B → radium C [C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> et C'] → radium D → radium E → radium E'' → radium F = polonium → radium G

○ Thorium → mésothorium I → mésothorium II → radiothorium → thorium X → émanation du thorium → thorium A → thorium B → thorium C → thorium C' ou thorium C'' → thorium D

○ Actinium → radioactinium → actinium X → émanation de l'actinium → actinium A → actinium B → actinium C → actinium C' ou C''



# LA SITUATION FIN 1913


Tome onzième. 11<sup>e</sup> Année. — Fascicule 1. Janvier 1914.

## LE RADIUM

La Radioactivité, les Radiations, l'Ionisation

JOURNAL DE PHYSIQUE

THÉORIQUE ET EXPÉRIMENTALE

Valence 

Uranium 1. . . . .	$4,3 \cdot 10^{-18}$	$5,0 \cdot 10^8$ ans.	4	$\alpha$
Uranium Y . . . . .	$3,4 \cdot 10^{-6}$	1,3 jours.	2	$\beta$
Uranium X <sub>1</sub> . . . . .	$3,3 \cdot 10^{-7}$	24,6 jours.	4	$\beta$
Uranium X <sub>2</sub> . . . . .	0,0100	1,15 min.	2	$\beta$
Uranium 2. . . . .	$1 \cdot 10^{-14}$	$2 \cdot 10^8$ ans?	6	$\alpha$
Ionium. . . . .	$1 \cdot 10^{-15}$	$2 \cdot 10^8$ ans?	4	$\alpha$
Radium. . . . .	$1,20 \cdot 10^{-11}$	1-30 ans.	2	$\alpha, \beta$
Émanation du radium	$2,085 \cdot 10^{-6}$	3,85 jours.	0	$\alpha$
Radium A . . . . .	$3,85 \cdot 10^{-5}$	3,0 min.	2	$\alpha$
Radium B . . . . .	$4,33 \cdot 10^{-4}$	26,7 min.	2	$\beta$
Radium C <sub>1</sub> . . . . .	$5,93 \cdot 10^{-4}$	19,5 min.	3	$\alpha^2, \beta$
Radium C <sub>2</sub> } Radium-C	$8,3 \cdot 10^{-7}$	1,4 min.	2	$\beta$
Radium C' } Radium-C	$7 \cdot 10^{-7}$	$10^{-6}$ sec.?	2	$\alpha$
Radium D . . . . .	$7,3 \cdot 10^{-9}$	16,5 ans.	2	$\beta$
Radium E . . . . .	$1,6 \cdot 10^{-6}$	5,0 jours.	3	$\beta$
Radium F (= polonium)	$5,90 \cdot 10^{-8}$	136 jours.	2	$\alpha$

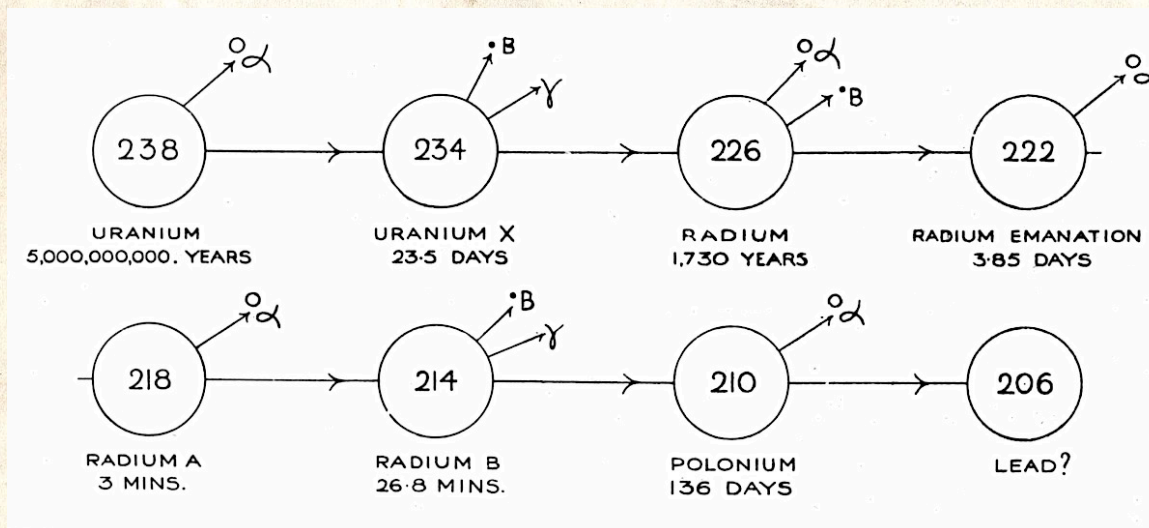
Actinium. . . . .			3	
Radioactinium. . . . .	$4,1 \cdot 10^{-7}$	19,0 jours.	1	$\alpha, \beta$
Actinium X. . . . .	$7,6 \cdot 10^{-7}$	11,4 jours.	2	$\alpha$
Émanation d actinium	0,18	10 sec.	0	$\alpha$
Actinium A. . . . .	3,00		2	$\alpha$
Actinium B. . . . .	$3 \cdot 2 \cdot 10^{-4}$	27,1 min.	2	$\beta$
Actinium C . . . . .	$3 \cdot 37 \cdot 10^{-5}$	2,10 min.	3	$\alpha$
Actinium D. . . . .	$2 \cdot 26 \cdot 10^{-5}$	4,71 min.	2	$\beta$
Thorium . . . . .	$1,2 \cdot 10^{-18}$	$1,8 \cdot 10^{10}$ ans.	4	$\alpha$
Mésothorium 1 . . . . .	$4,0 \cdot 10^{-9}$	3,3 ans.	2	
Mésothorium 2. . . . .	$3,1 \cdot 10^{-9}$	6,1 ans.	3	$\beta$
Radiothorium. . . . .	$1,09 \cdot 10^{-8}$		1	$\alpha$
Thorium X. . . . .	$2 \cdot 20 \cdot 10^{-6}$		2	$\alpha$
Émanation du thorium	0,0128		0	$\alpha$
Thorium A. . . . .	0,0		2	$\alpha$
Thorium B. . . . .	$1,8 \cdot 10^{-7}$		2	$\beta$
Thorium C <sub>1</sub> . . . . .		60 min.	3	$\alpha, \beta, \gamma$
Thorium D . . . . .	$3,7 \cdot 10^{-5}$	3,1 min.	2	$\beta$
Thorium C <sub>2</sub> . . . . .	$7 \cdot 10^{-10}$	$10^{-11}$ sec.?	2	$\alpha$

Demi-vie  Mode de transmutation 



# UNE SITUATION CONFUSE

- Les physiciens et les chimistes se retrouvaient devant une foule de corps radioactifs
  - leur enchaînement se précisait peu à peu



## 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

- ils étaient physiquement distincts (transmutations et 1/2 vies très différentes)
- mais leur identité chimique n'était pas très claire



# UNE SITUATION DE PLUS EN PLUS CONFUSE

- Masses atomiques
  - alpha = hélium  $\Rightarrow$  perte de 4 unités de masse atomique par émission alpha
  - bêta = électron, de masse négligeable  $\Rightarrow$  pas de perte de masse par émission bêta
  - ni par émission gamma
- $\Rightarrow$  tous les éléments d'une même série ont des masses variant de 4 en 4 unités
  - $\Rightarrow$  existence de 4 séries distinctes: uranium, thorium, actinium **et ?**
- Les séries radioactives connues contenaient près d'une *quarantaine* d'éléments, tous apparemment situés entre l'uranium et le plomb
- Mais de l'uranium (élément 92) au plomb (élément 82), il n'y a que 11 places dans le tableau de Mendeleiev
  - + les éléments 85 et 87 n'étaient pas connus
- Travaux minutieux  $\Rightarrow$  identité chimique -mais non physique- de plusieurs éléments
  - radiothorium et thorium [Otto Hahn 1905]
  - mésothorium I et radium [Otto Hahn et Lise Meitner 1908?]
  - mésothorium II et actinium
  - radioactinium et thorium
  - radium D, radium G et plomb [George de Hevesy 1912]



# OTTO HAHN & LISE MEITNER

## ○ **Otto Hahn (1879–1968)**

- Radiothorium [Th 228] (1905)  
que Hahn ne put séparer chimiquement du thorium [Th232]
- mésothorium I (1907) [Ra228]
- mésothorium II (1907) [Ac228]
- ionium (1907) [Th230] le prédécesseur du radium
- protactinium (1917) avec Lise Meitner
- Directeur du département de radioactivité du KWI-C en 1912
- **fission de l'uranium** (1938) avec Lise Meitner et Fritz Strassmann
- prix Nobel de chimie 1944

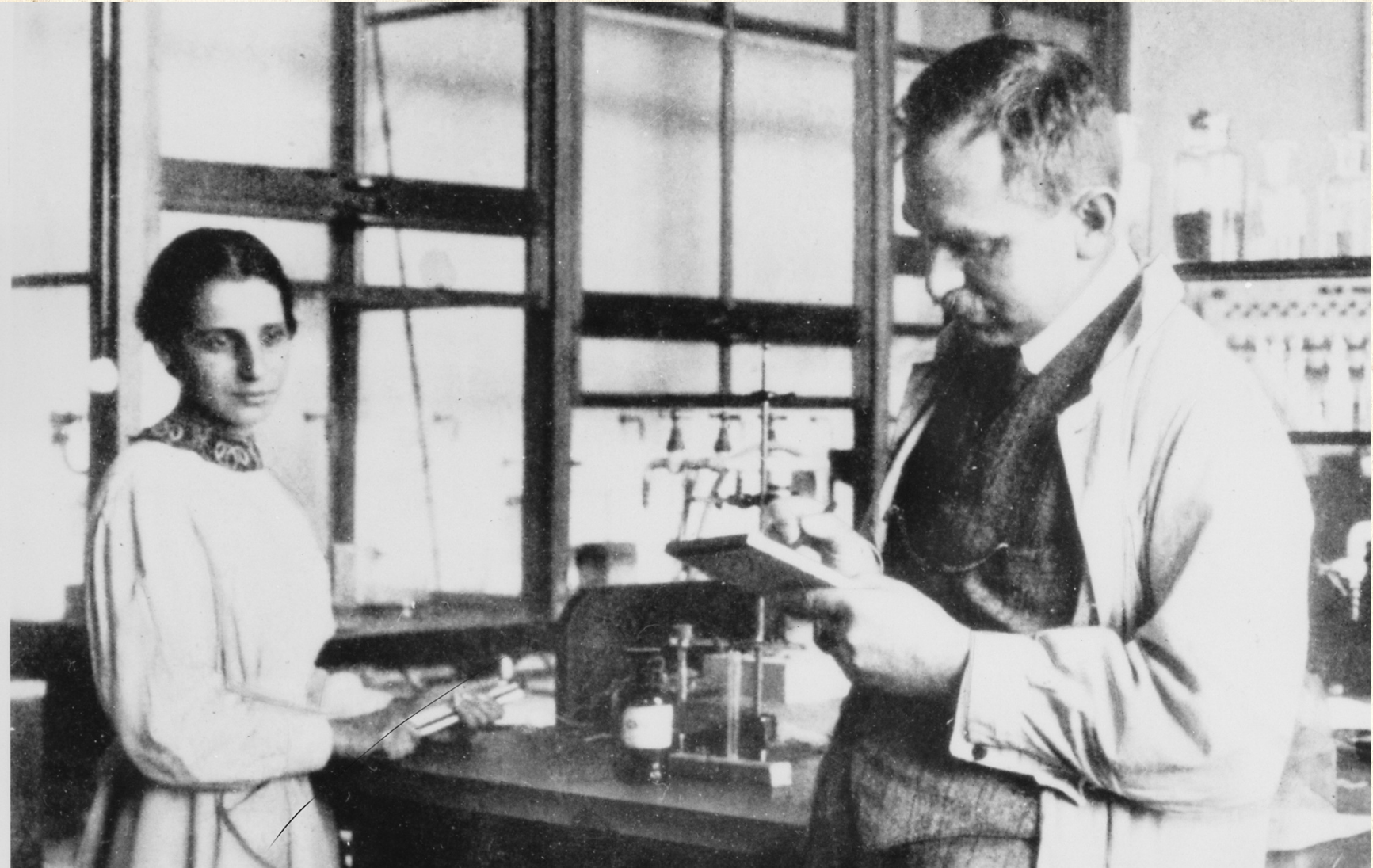
## ○ **Lise Meitner (1878–1968)**

- une des premières femmes à obtenir un doctorat en physique (1906)
- collabora 30 ans avec Hahn
- directrice du département de physique du KWI-C en 1917
- rivalité avec Marie Curie, puis Irène Curie
- s'exila en Suède en 1938
- **y élucida la fission**





# LISE MEITNER & OTTO HAHN





# FREDERICK SODDY



# FREDERICK SODDY

- Après sa découverte avec Rutherford des transmutations radioactives, Soddy était retourné en 1903 à Londres, collaborant avec Ramsay sur les gaz inertes

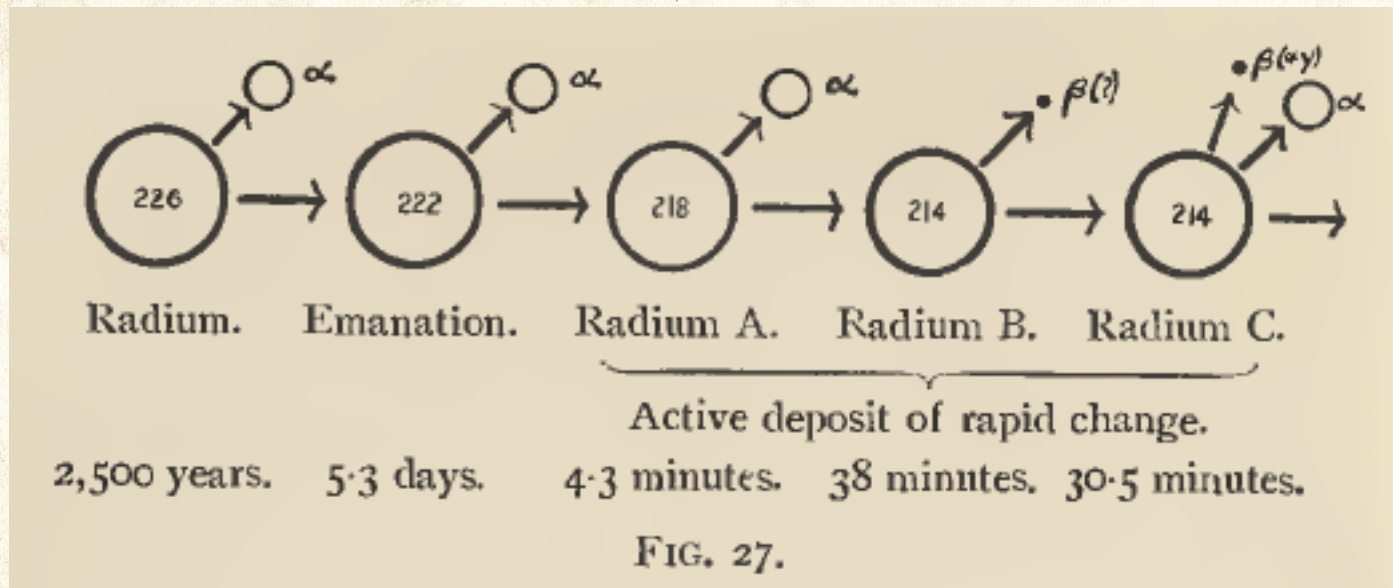


- Professeur à Glasgow en 1904, il s'attacha à améliorer les techniques de séparation chimique des radioéléments
- À partir de 1910, il analysa de plus près avec Alexander Fleck les chaînes radioactives
- → règles de déplacement
  - 1911 pour les alpha
  - 1913 pour les bêta
- Professeur à Aberdeen, puis à Oxford après 1919
- Il n'y créa pas d'école de radiochimie rivalisant avec l'école de radiophysique de Cambridge



# LA RÈGLE DE DÉPLACEMENT POUR LES ALPHAS

- Soddy montra en 1911 qu'une transmutation alpha diminuait la masse atomique de 4 unités et **diminuait de deux rangs** la position de l'élément dans le tableau périodique ( $Z \rightarrow Z-2$ )
  - le radium 226 ( $Z=88$ ) donne de l'émanation (=radon 222,  $Z=86$ )
  - celle-ci donne du radium A (=polonium 218,  $Z=84$ ), puis du radium B (=plomb 214,  $Z=82$ )

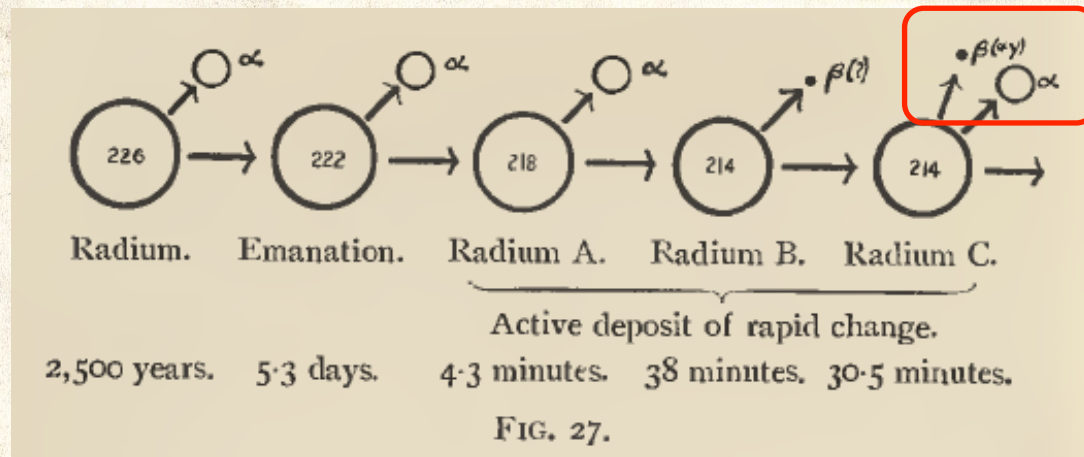


*F. Soddy « Interpretation of radium », Putnam 1909*



# LA RÈGLE DE DÉPLACEMENT POUR LES BÊTAS

- Une transmutation bêta ne modifiait pas la masse atomique mais **augmentait d'un rang** la position de l'élément ( $Z \rightarrow Z+1$ )
- Le radium B (plomb 214,  $Z=82$ ) donne du radium C (bismuth 214,  $Z=83$ )



*F. Soddy « Interpretation of radium », Putnam 1909*

- Mais le radium C donne du radium D (plomb 210,  $Z=82$ ) **Problème?**
- **Non** car le radium C donne d'abord par transmutation **bêta** du radium C' (polonium 214) qui donne ensuite [en  $160 \mu\text{s}$ ] du radium D par transmutation **alpha**



# LA NOTION D'ISOTOPE

- Plusieurs équipes avaient indiqué l'identité *chimique*, mais non *physique*, de plusieurs des nombreux éléments des séries radioactives (y compris entre séries différentes)
- Soddy arriva en décembre 1913 à la conclusion que cela impliquait la coexistence de plusieurs éléments dans la même case du tableau périodique

même endroit = *iso topos* en grec → isotopes

- Ils avaient ainsi le même comportement chimique, tout en ayant un comportement radioactif différent (transmutations et 1/2 vies différentes) ainsi que des masses atomiques différentes
  - Uranium X1 = thorium 234                      Thorium = thorium 232
  - Ionium = thorium 230                              Radiothorium = thorium 228
  - Radioactinium = thorium 227
- La notion d'isotope n'expliquait pas *pourquoi* des éléments chimiquement identiques (inséparables) avaient des comportements physiques (masse, durée de vie et transmutation) si différents

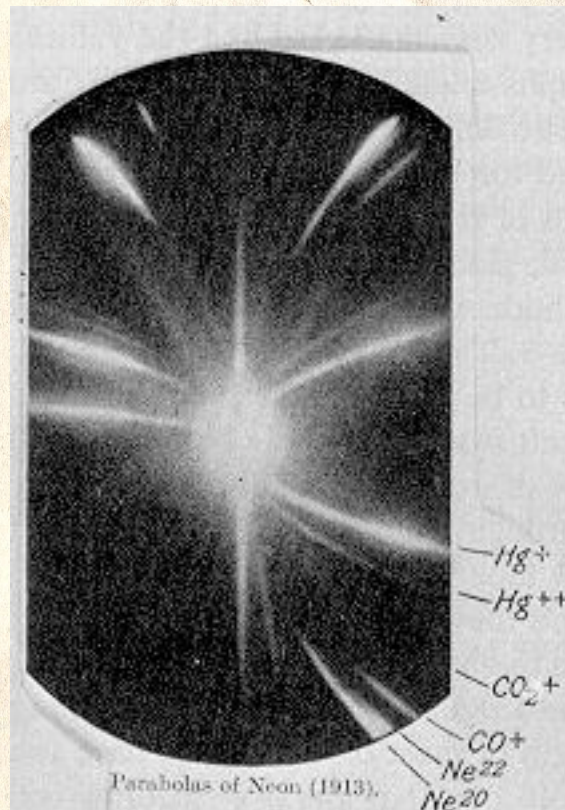






# LE VIEUX LION EST TOUJOURS DEBOUT

- En 1913, J.J. Thomson poursuivait au Cavendish ses études des « rayons canaux », les ions positifs des tubes à décharge



- Déviation des ions par champs électrique et magnétique → impact sur la plaque photographique dépendant de leur rapport  $e/m$
- **Deux** taches pour le néon (masse atomique 20,18) → deux masses différentes → deux isotopes: néon 20 (91%) et néon 22 (9%)
- ⇒ **l'isotopie n'est pas une propriété limitée aux corps radioactifs**
- ⇒ étude systématique menée au Cavendish par Francis Aston (inventeur du spectrographe de masse)



# RETOUR AUX RAYONS X



# FLUORESCENCE X

## ○ Émission X indirecte

- les métaux frappés par des rayons X en émettent à leur tour (Georges Sagnac, 1896)
- pénétration différente  $\Leftrightarrow$  énergie différente  $\Leftrightarrow$  fluorescence X ?
- émission associée d'électrons (Sagnac & Curie 1900)

## ○ Charles Barkla (1877-1944)



## ○ Rayons X diffusés

- propriétés identiques aux X incidents
- indépendantes du matériau
- nombre d'électrons associés  $\uparrow$  masse atomique du diffuseur
- $\Rightarrow Z \propto A ?$

## ○ Rayons X émis

- propriétés indépendantes du rayonnement X incident
- **caractéristiques du matériau** (rayonnement plus «dur» pour les éléments lourds)
- mais pas de sa chimie, sa densité, ou sa température
- $\rightarrow$  analogue à la fluorescence
- $\rightarrow X = \text{électromagnétique} ?$

## ○ Deux types de rayonnement X émis

- très pénétrant  $\rightarrow$  type A
- moins pénétrant  $\rightarrow$  type B
- nomenclature A, B  $\rightarrow$  K, L (pour laisser de la place)
- $\rightarrow$  prix Nobel de physique 1917



# MAX VON LAUE (1879-1960)

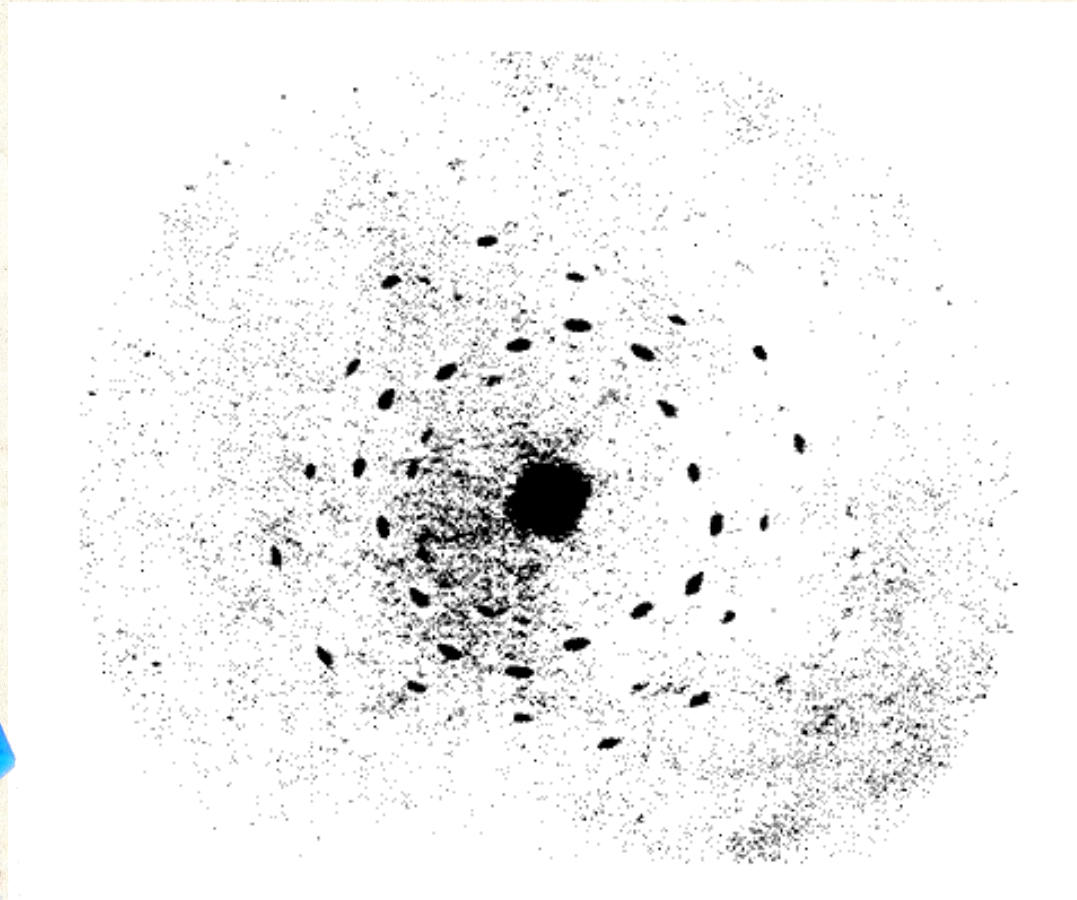
- La lumière est-elle une onde ou une particule?
  - + interférences, diffraction
  - + électrodynamique de Maxwell
  - – *émission thermique (Planck 1900)*
  - – *effet photoélectrique (Einstein 1905)*
- Et les rayons X ?
  - polarisation (Barkla 1904)
- Sommerfeld 1912: peuvent-ils interférer ou être diffractés?
- Cristaux = arrangement régulier d'atomes (Bravais 1850)
  1. comment le démontrer?
  2. quelles sont les structures régulières et leurs tailles?
- Max von Laue eut en février 1912 l'idée de résoudre les 2 problèmes en même temps
  - diffracter des rayons X sur des cristaux pour en étudier les structures
- → prix Nobel de physique 1914





# SPECTACULAIRE !

- Figure de diffraction obtenue par von Laue en 1912 avec un cristal de sulfate de cuivre ( $\text{CuSO}_4$ )



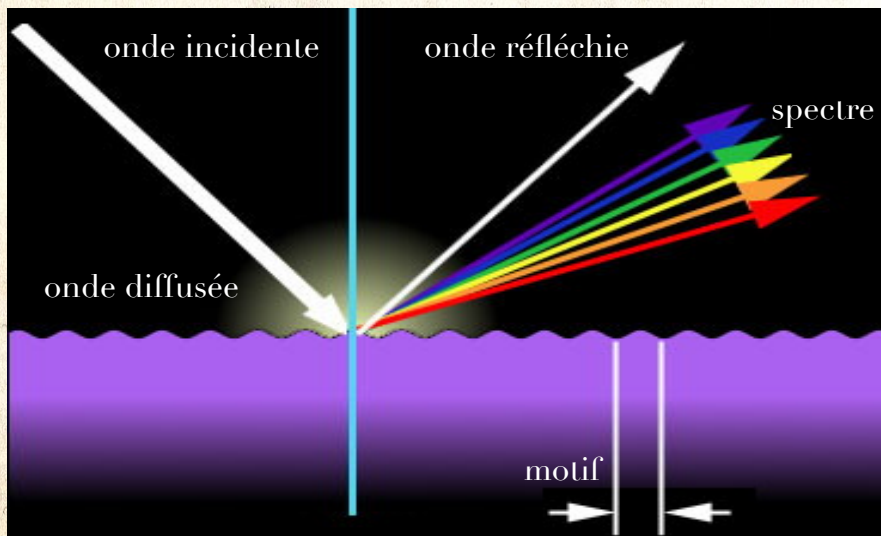


# DIFFRACTION (ET INTERFÉRENCE) DES RAYONS X

## ○ Onde sur une surface rugueuse

1. réflexion « spéculaire »
2. diffusion ~ isotrope
3. si la rugosité est un motif répétitif de taille voisine de la longueur d'onde incidente → diffraction

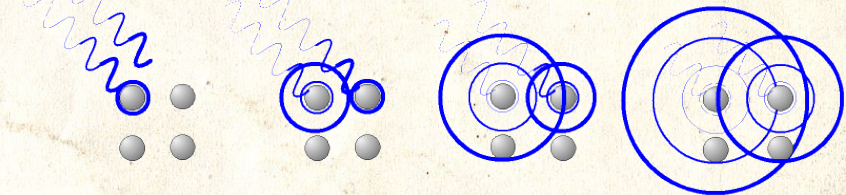
○ dont l'angle dépend de la longueur d'onde et de la taille du motif



## ○ Rayons X et cristaux

- toute onde électromagnétique déforme le nuage électronique des atomes
- → réémission d'une onde (de même fréquence) par chaque atome

○ → interférences entre ces ondes



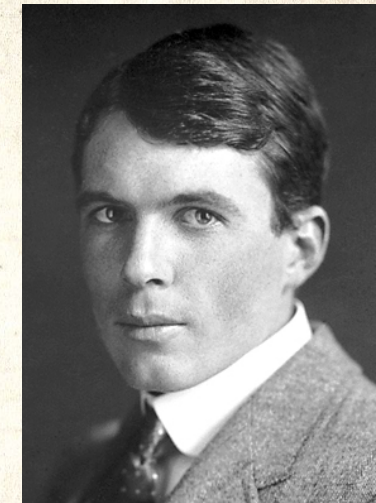
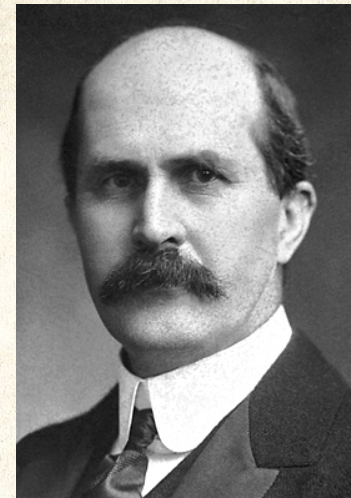
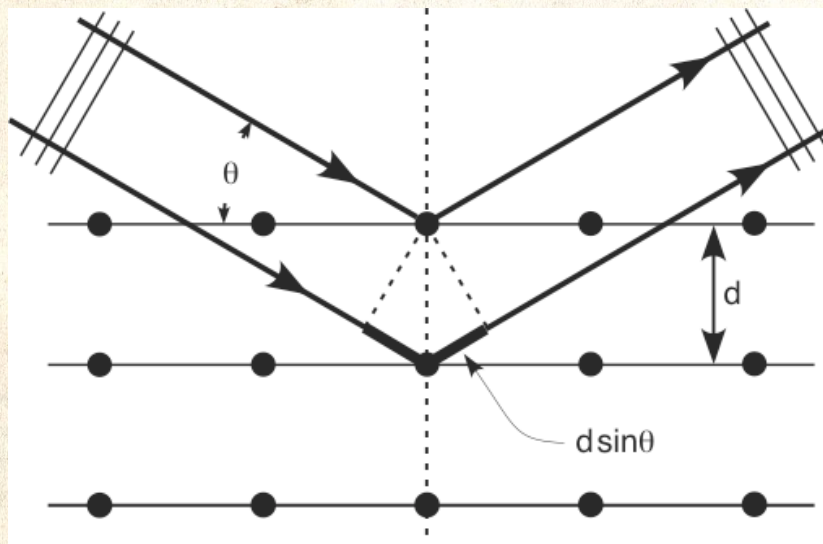
- → angles  $\theta$  d'émission maximale et minimale dépendant des distances interatomiques  $d$  **et** de la longueur d'onde  $\lambda$  du rayonnement X

○ ⇒ loi de Bragg  $n\lambda = 2d \sin\theta$



# BRAGG & BRAGG, ASSOCIÉS

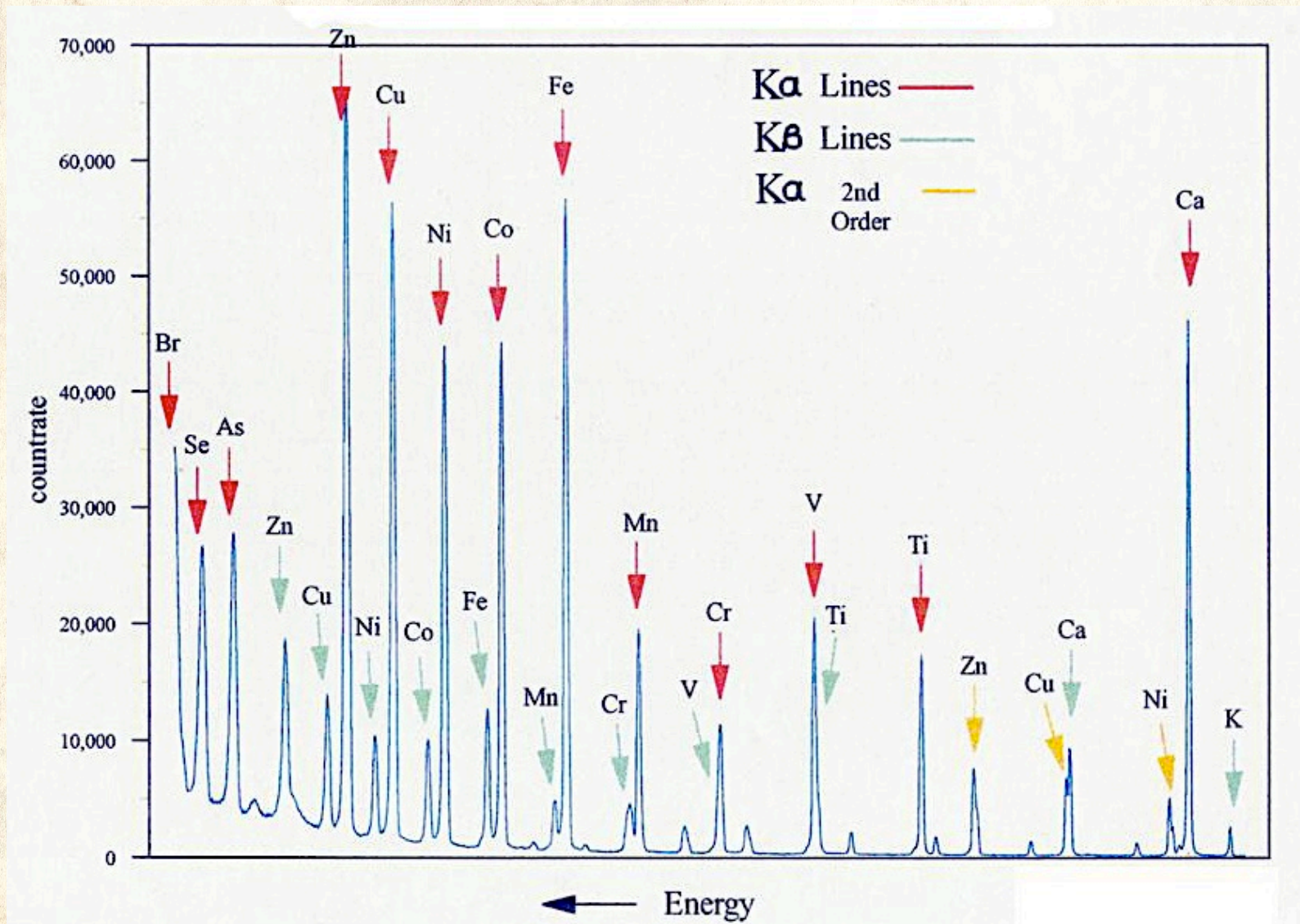
- William Henry Bragg (1862-1942)
  - professeur à Adelaide (Australie) de 1885 à 1908
  - travaux sur la radioactivité à partir de 1904 (sous l'impulsion de Rutherford)
  - professeur à Leeds en 1909



- William Lawrence Bragg (1890-1971)
  - loi de Bragg  $n\lambda = 2d \sin\theta$
  - $\Rightarrow$  si  $\lambda$  est connu  $\rightarrow d$
  - $\Rightarrow$  si  $d$  est connu  $\rightarrow \lambda$
  - $\Rightarrow$  spectroscopie des rayons X
- $\rightarrow$  père et fils reçoivent ensemble le prix Nobel de physique en 1915



# ANALYSE PAR FLUORESCENCE DE RAYONS X





# HENRY MOSELEY



# HENRY MOSELEY (1887-1915)

- Diplômé d'Eton et d'Oxford, Moseley devint en septembre 1910 l'un des assistants de **Rutherford** à Manchester (avec Niels Bohr, Hans Geiger, Georges de Hevesy, James Chadwick, Kazimierz Fajans)
- Pendant 2 ans, Rutherford lui confia des tâches qu'il jugea «ennuyeuses»
- Juillet 1912: Moseley découvrit les travaux de **Laue** et parvint (en décembre) à convaincre Rutherford d'équiper le laboratoire de sources X
- Printemps 1913: Moseley et Charles Galton Darwin retrouvèrent les résultats des **Bragg**
- Juillet 1913: spectres X du platine
- Octobre 1913: raies  $K_\alpha$  and  $K_\beta$  du cuivre, nickel, cobalt, fer, manganèse, chrome, vanadium, titane et calcium

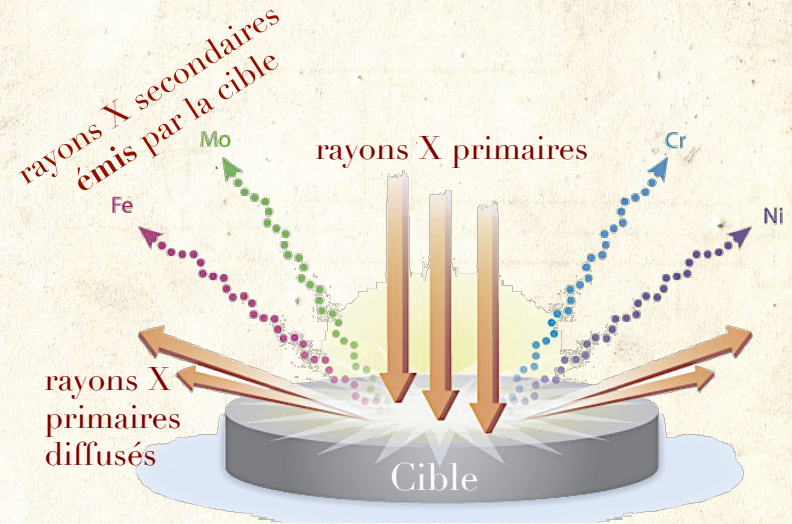


Henry Moseley à *Trinity College*, Oxford 1910



# SPECTROSCOPIE PAR DIFFRACTION DE RAYONS X

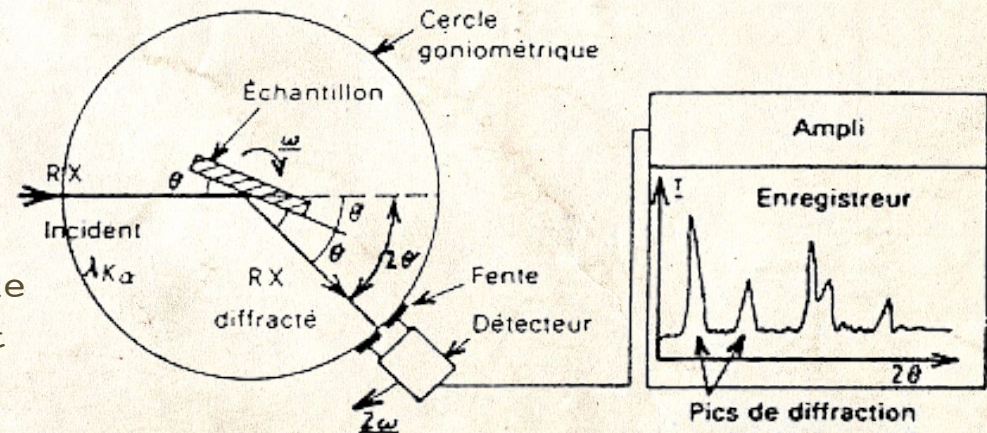
- Méthode : diffraction des rayons X
  - Émission de rayons X par une source
  - Bombardement d'une cible par ces rayons → rayons X secondaires
  - Diffraction des X secondaires par un cristal (connu !)
  - Angle de diffraction  $\Leftrightarrow$  longueur d'onde  $\lambda$  des X émis par la cible



- Moseley montra que

$$\lambda = \lambda_0 / n^2$$

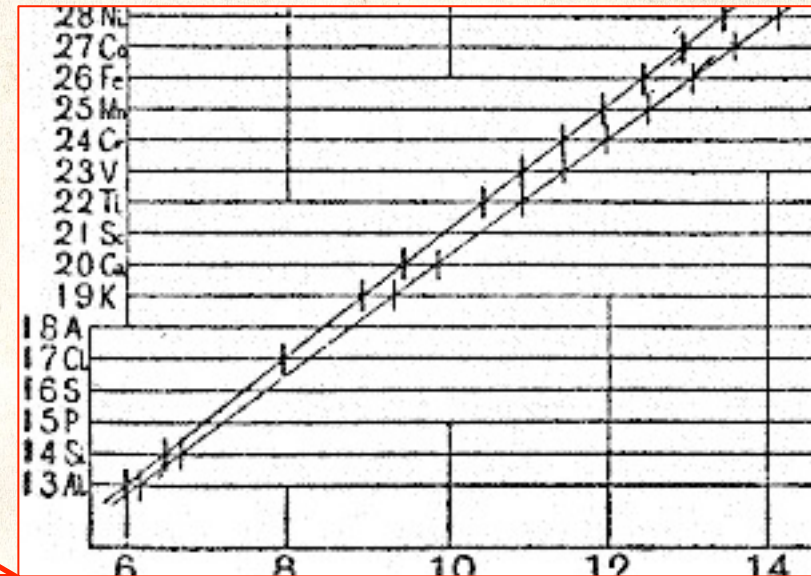
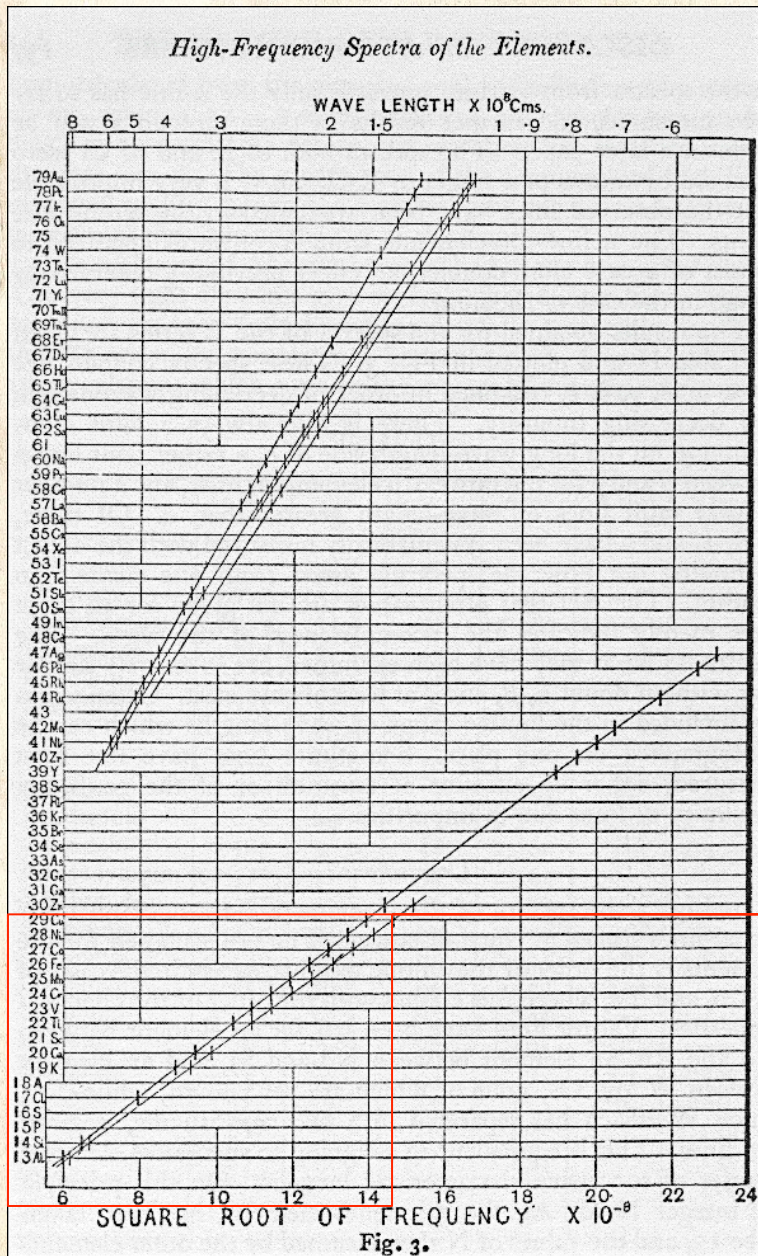
- n était (à un décalage près) le numéro atomique **Z** de l'élément cible)
- Relation prévue par le modèle de Bohr, ainsi validé









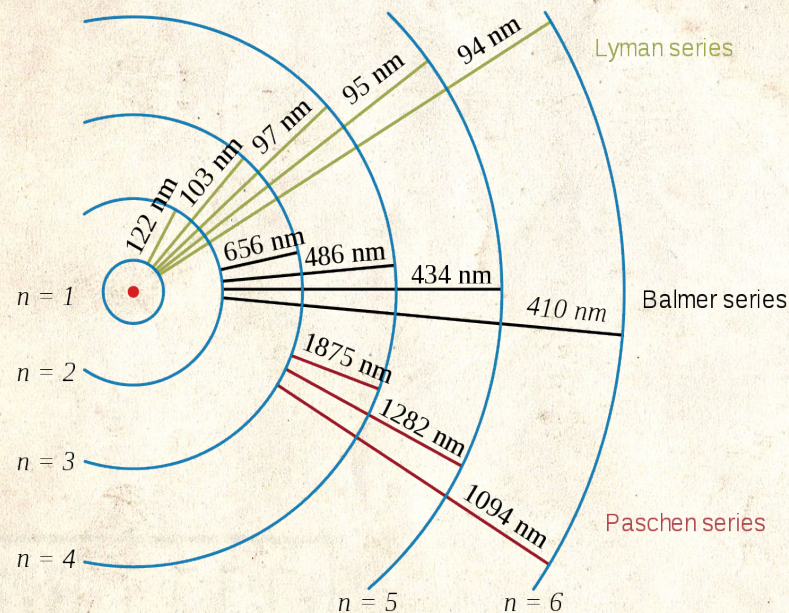
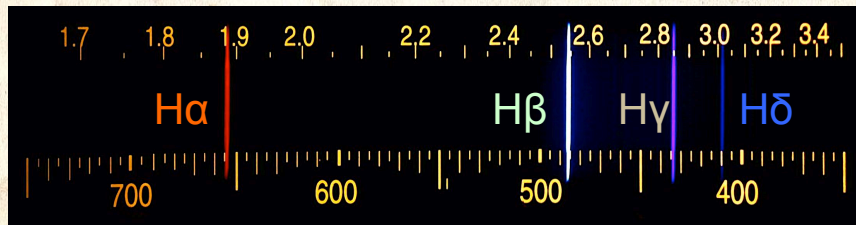


H. Moseley, *Phil. Mag.* (1914)



# LIEN AVEC LE MODÈLE DE BOHR DE L'ATOME

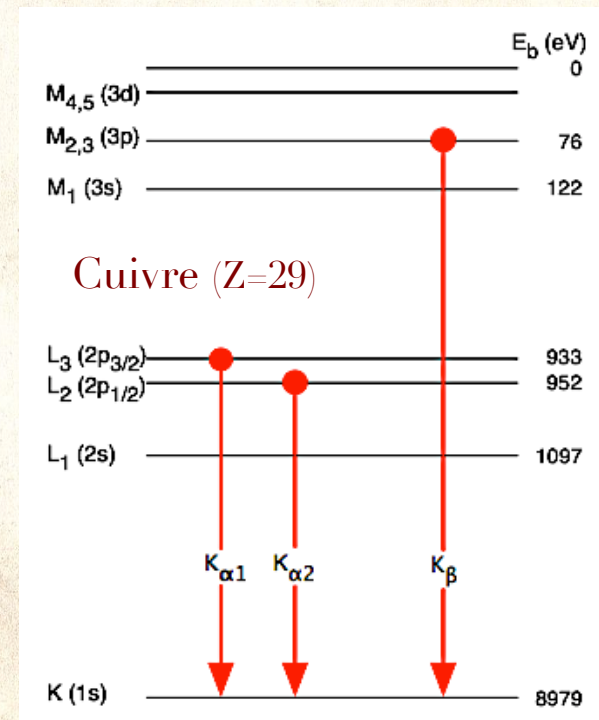
○ Atome d'hydrogène selon Bohr



K  $\Leftrightarrow$  n=1, L  $\Leftrightarrow$  n=2, M  $\Leftrightarrow$  n=3

○  $\Rightarrow$  la raie K $_{\alpha}$  est l'équivalent de la raie Lyman  $\alpha$  de l'hydrogène

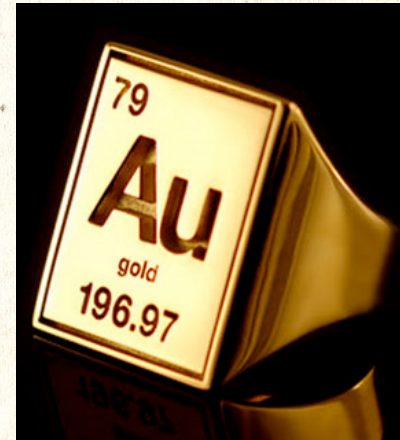
- énergie =  $h\nu = 10,2 \text{ eV} (Z-1)^2$
- notation de Barkla (K, L, M, N) modifiée par Mannes Siegbahn (K $_{\alpha}$ , K $_{\beta}$ ...)





# MASSE ATOMIQUE A

- Mesurés par les chimistes, les différents éléments avaient des masses atomiques A proches de multiples de la masse de l'hydrogène
  - Carbone  $\rightarrow 12,01$
  - Fer  $\rightarrow 55,85$
  - Or  $\rightarrow 196,97$
  - Uranium  $\rightarrow 238,03$
- Mais pas toujours
  - Chlore  $\rightarrow 35,45$
- Isotopes  $\Rightarrow$  écarts dus à la superposition ?
  - $\frac{1}{2}$  chlore 35 +  $\frac{1}{2}$  chlore 36  $\rightarrow 35,5$  ?
  - (en fait  $\frac{3}{4}$  chlore 35 et  $\frac{1}{4}$  chlore 37)
- $\Rightarrow$  A serait-il un nombre entier?
  - Peut-être le nombre d'atomes d'hydrogène constituants?
  - Pas vraiment, mais il y a de ça





# LE NUMÉRO ATOMIQUE Z

- Numéro atomique  $Z = \text{rang}$  (=nombre entier) dans le tableau de Mendeleïev quand les atomes sont classés par masse atomique croissante
  - Exige des permutations pour s'accorder aux propriétés chimiques
  - Exige de laisser des trous pour des éléments inconnus, mais combien?
- Apparemment proche du nombre d'électrons de l'atome (et proche de la moitié de la masse atomique)
- La découverte de Moseley identifia le **numéro atomique Z au nombre exact d'électrons** (et donc à la charge  $+Ze$  du noyau)
  - Moseley plaça ainsi l'argon ( $Z=18, m=39,9$ ) avant le potassium ( $Z=19, m=39,1$ ) en meilleur accord avec leurs propriétés chimiques (gaz inerte et métal alcalin)
  - Il confirma la permutation du cobalt et du nickel
  - Il confirma que des **éléments 43, 61, 72, 75, 85 et 87 devaient exister** (découverts de 1923 à 1940)
  - Mais **aucun autre élément ne manquait** entre l'hydrogène et l'uranium
  - Il indiqua qu'il y avait exactement 15 lanthanides ( $Z=57$  à  $71$ )



# TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	O
----	-----	------	-----	----	-----	-------	------	----	-----	------	-----	----	-----	------	---

1 H																2 He			
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne		
11 Na	12 Mg						Technétium (1937)							13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	Hafnium (1923)				Rhénium (1925)				29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr		
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 (43)	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe		
55 Cs	56 Ba	57-71 Ln	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 (85)	86 Rn		



(87)	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	(93)	(94)	(95)	(96)	(97)	(98)	(99)
------	----------	----------	----------	----------	---------	------	------	------	------	------	------	------

Francium (1939)

Neptunium (1940) Plutonium (1940)

Astate (1940)

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 (61)	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
----------	----------	----------	----------	------------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

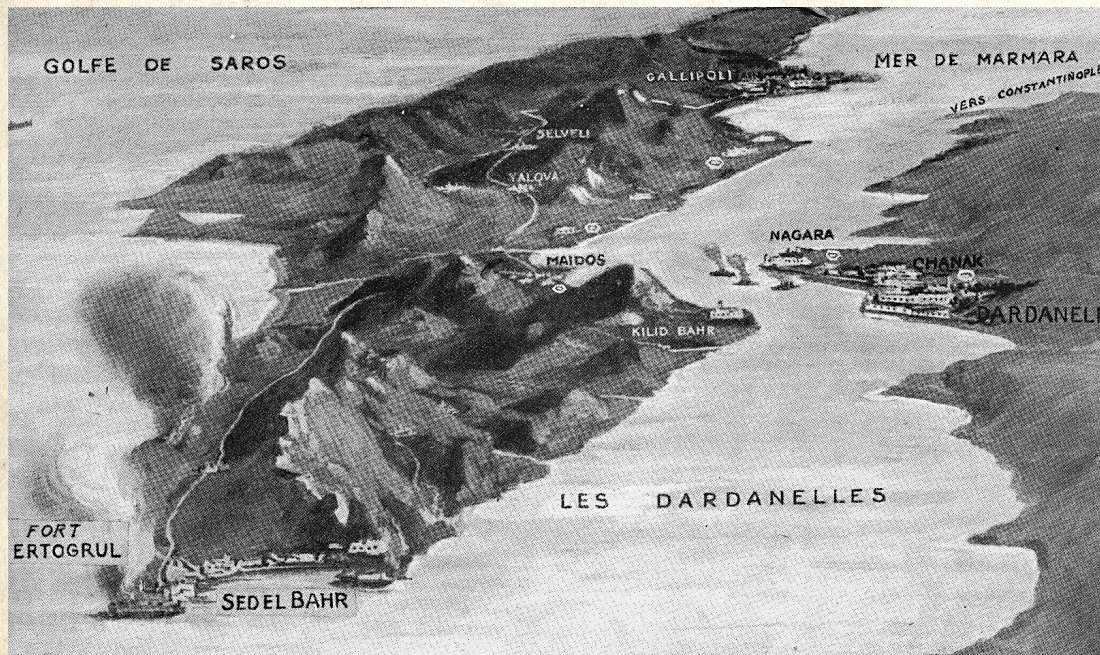
Prométhium (1945)

Tableau périodique dans les années 1920-1930, suite aux travaux d'Henry Moseley



# TUÉ AU COMBAT LE 10 AOÛT 1915

- Nommé professeur à Oxford à 26 ans, Moseley démissionna en août 1914 pour s'engager dans l'armée
- Lieutenant du génie (transmissions)
- Campagne des Dardanelles



*« Le plus brillant de tous les hommes avec qui j'ai pu collaborer »*  
Ernest Rutherford

*« Si l'on songe à ce que Moseley aurait pu encore accomplir, sa mort a peut-être été la mort la plus coûteuse de l'histoire des guerres de l'humanité. »*  
Isaac Asimov



À SUIVRE !



Mais c'est tout pour aujourd'hui!