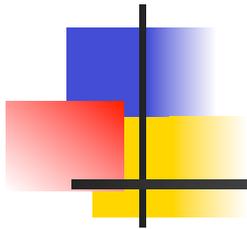


# CHAMPS & PARTICULES

## LE NOYAU

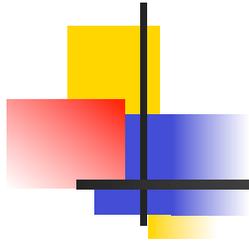


Alain Bouquet

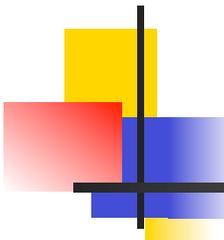
Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

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





# **ATOME A-TOME IN-SÉCABLE**



# Atomes et éléments chimiques

---

- Dalton (1766-1844)
  - matière formée d'atomes minuscules et inaltérables
  - identiques pour un même élément (carbone, oxygène...)
  - s'assemblent toujours dans les mêmes proportions
  - 1 atome de carbone  $\Leftrightarrow$  1 ou 2 atomes d'oxygène, jamais 3 ou 4 (et surtout pas 0,5 ou 1,3 !)
- Gay-Lussac: les gaz se combinent dans des proportions simples
- Avogadro (1811): le nombre d'atomes dans volume donné de gaz est le même, quel que soit le gaz
- Électricité
  - électrolyse de l'eau en hydrogène et oxygène
  - électrolyse de la soude et de la potasse  $\rightarrow$  sodium et potassium
- 1800: 30 éléments identifiés
- 1860: 60 éléments
  - propriétés chimiques (affinités)
  - propriétés physiques (poids atomique, solide-liquide-gaz...)
- Nombreux classements proposés
  - triades de Döbereiner (1817)
  - tétrades de Dumas (1859)
  - vis tellurique de Chancourtois (1862)
  - octaves de Newlands (1863)
  - tableau de Mendeleiev (1869)

# Tableau de Mendeleïev

- En classant les éléments **par masse atomique croissante**, les propriétés chimiques sont **périodiques**

ex: Li – Na – K – Rb – Cs – Tl  
**ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.**

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

			Ti = 50	Zr = 90	? = 180.	
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182.	
			Cr = 52	Mo = 96	W = 186.	
			Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,4.	
			Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198.	
		Ni = Co = 59	Pi = 106,6	Os = 199.		
		Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200.		
H = 1	Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112		
	B = 11	Al = 27,4	? = 68	U = 116	Au = 197?	
	C = 12	Si = 28	? = 70	Sn = 118		
	N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?	
	O = 16	S = 32	Se = 79,4	Te = 128?		
	F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	I = 127		
	Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204.
		Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207.	
		? = 45	Ce = 92			
		?Er = 56	La = 94			
		?Yl = 60	Di = 95			
		?In = 75,6	Th = 118?			

Д. Менделѣевъ

- Pour assurer la périodicité des propriétés chimiques, Mendeleïev avait dû

- laisser des trous (éléments inconnus ?)

- ⇒ *prédiction de la masse atomique et des propriétés chimiques*

- éka-bore → scandium (1879)

- éka-aluminium → gallium (1875)

- éka-silicium → germanium (1882)

- et **permuter** certains éléments

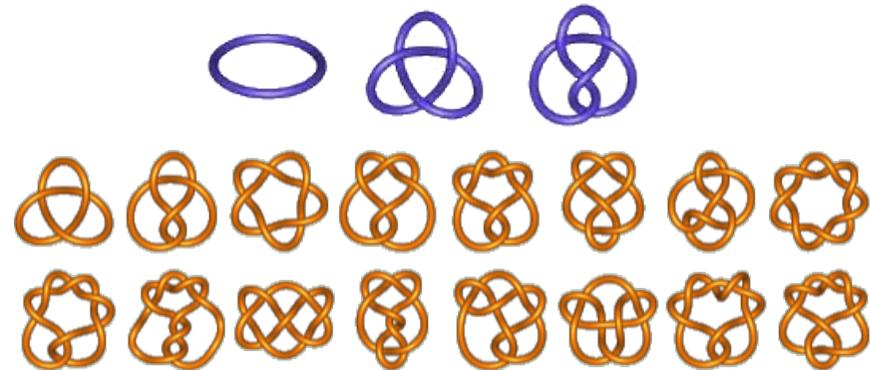
- cobalt (m=58,9) avant nickel (58,7)

- tellure (127,6) avant iode (126,9)

# L'hydrogène constituant universel ?

- La plupart des éléments ont une masse atomique *proche* d'un multiple **entier** de celle de l'hydrogène
- → l'hydrogène constituant universel (Proust 1794) ?
- Mais
  - en quoi alors un atome diffère-t-il d'une molécule?
  - des masses atomiques proches ont des propriétés très différentes (Al et Si par ex)
  - des masses atomiques très différentes ont des propriétés voisines (fluor, chlore, brome et iode par ex.)
  - pas d'éléments de masse 2 ni de masse 3 ni de masse 4 (jusqu'à la découverte de l'hélium)

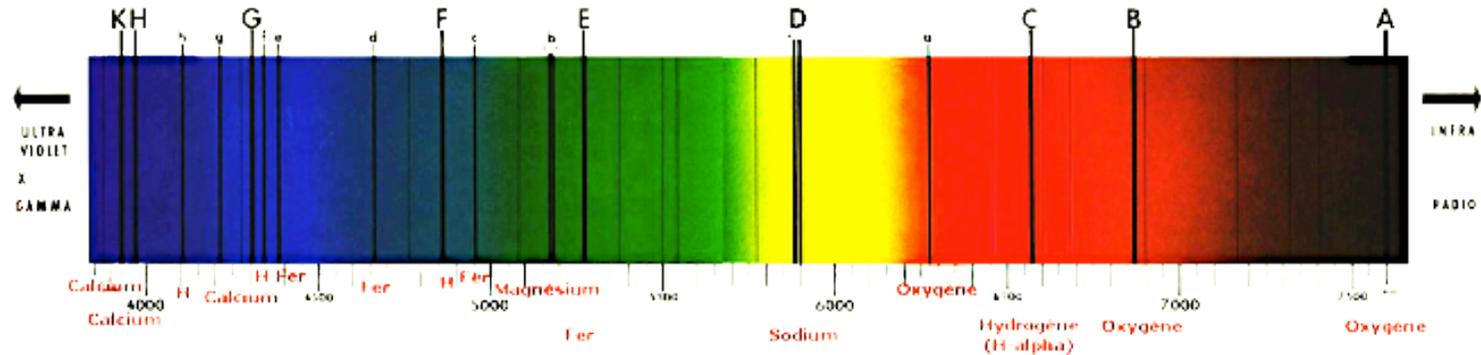
- **Stabilité des atomes** (permanence dans les réactions chimiques)
- Helmholtz 1858: théorie de la stabilité des tourbillons (vortex)
- Kelvin 1867: les atomes sont des tourbillons de l'éther (= champ électromagnétique)
- → nœuds (Kelvin et Tait)



# Atome et lumière



J. Fraunhofer



## ■ Raies spectrales

- Melvill: raies brillantes (1752)
- Fraunhofer: raies sombres (1819)
- Foucault: correspondance des raies (1849)
- Ångström: raies de l'hydrogène (1853)
- Kirchhoff et Bunsen: étude systématique (1855-1863)
- → découverte du césium, de l'hélium (Lockyer 1869) et d'une quinzaine d'éléments

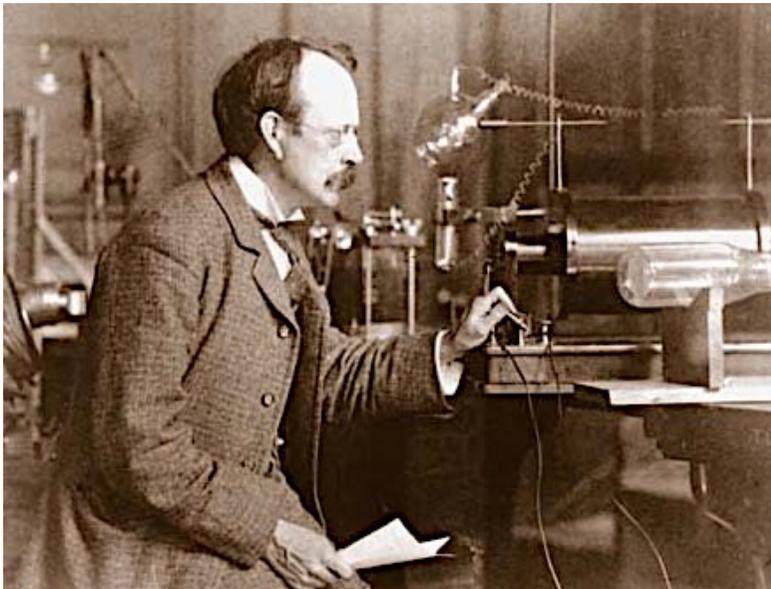
## ■ lien avec la structure atomique ?

- Stokes (1852), Maxwell (1875): les fréquences des raies correspondent sans doute à des **fréquences de vibration des constituants des atomes**
- Régularités: Balmer (1885), Rydberg (1888)

# Atome, lumière et électricité

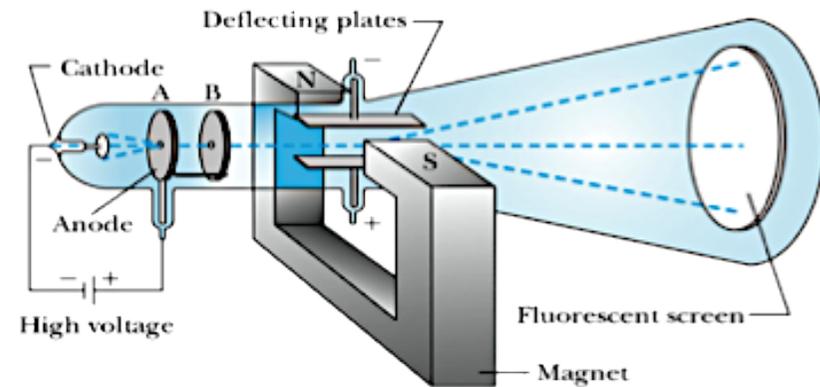
## ■ Rayons cathodiques

- École allemande : un rayonnement électromagnétique (Hertz, Lenard)
- École britannique : un flux de corpuscules (Stoney, Crookes, Thomson)



## ■ Découverte de l'électron

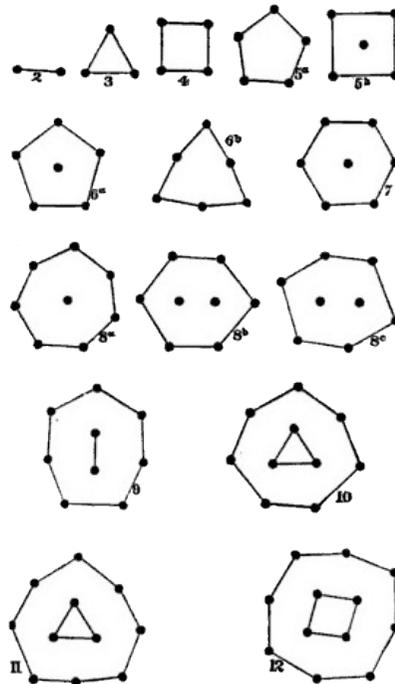
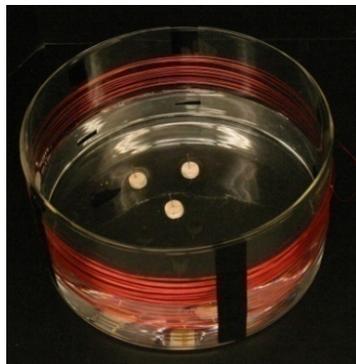
- J.J. Thomson (1897)
- déviation des rayons cathodiques (→ corpuscules) par un champ électrique et un champ magnétique



- ⇒ rapport  $q/m$  (charge/masse)
- $q/m \sim 2000$  fois ion hydrogène  $H^+$
- ⇒ corpuscules  $\sim 2000$  fois plus légers
- ⇒ hydrogène = 2000 électrons ?

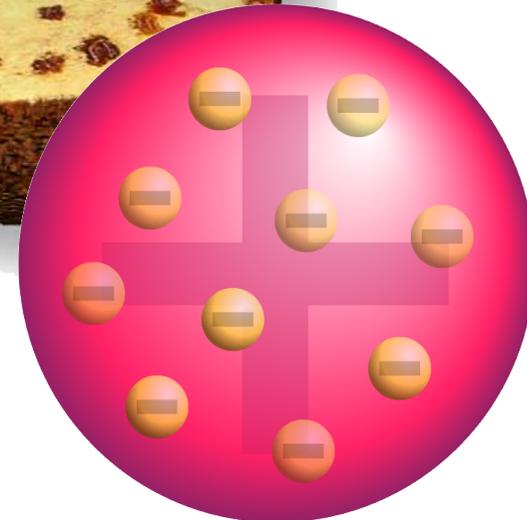
# L'atome selon J.J. Thomson

- Alfred Mayer (1878): figures d'équilibre d'aimants flottants



- Les électrons se répartissent-ils sur des coquilles → **fréquences caractéristiques** ?

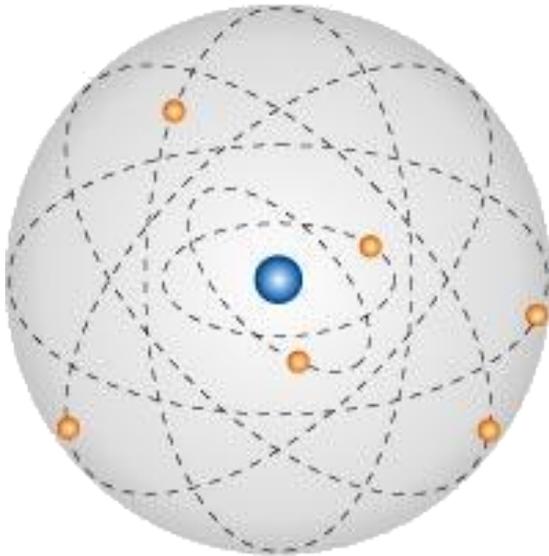
- Plum-pudding



- Distribution continue de la charge positive → pas d'**instabilité radiative** ?

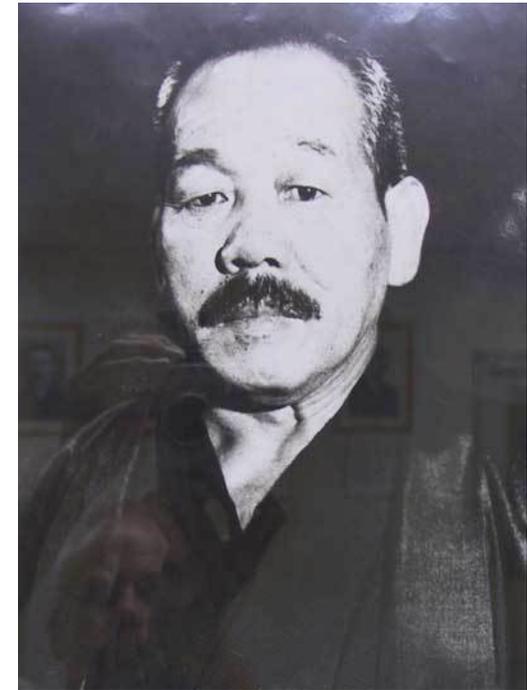
# Nagaoka : un modèle saturnien (1904)

- Les anneaux de Saturne sont en équilibre
  - Saturne a une masse bien plus grande que ses anneaux
  - attraction gravitationnelle en  $1/r^2$
- → idée de Nagaoka Hantaro
  - masse centrale lourde de charge positive
  - entourée d'électrons légers de charge négative
  - → attraction électrostatique en  $1/r^2$

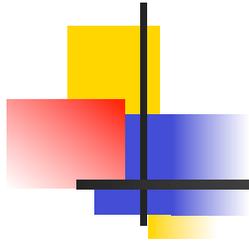


## Difficultés

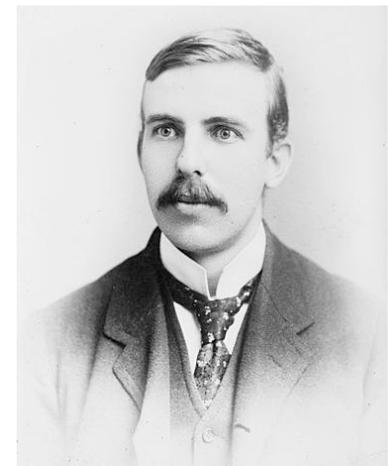
- *répulsion des électrons*
- *instabilité radiative*
- *raies spectrales*



Nagaoka Hantaro (1865-1950)



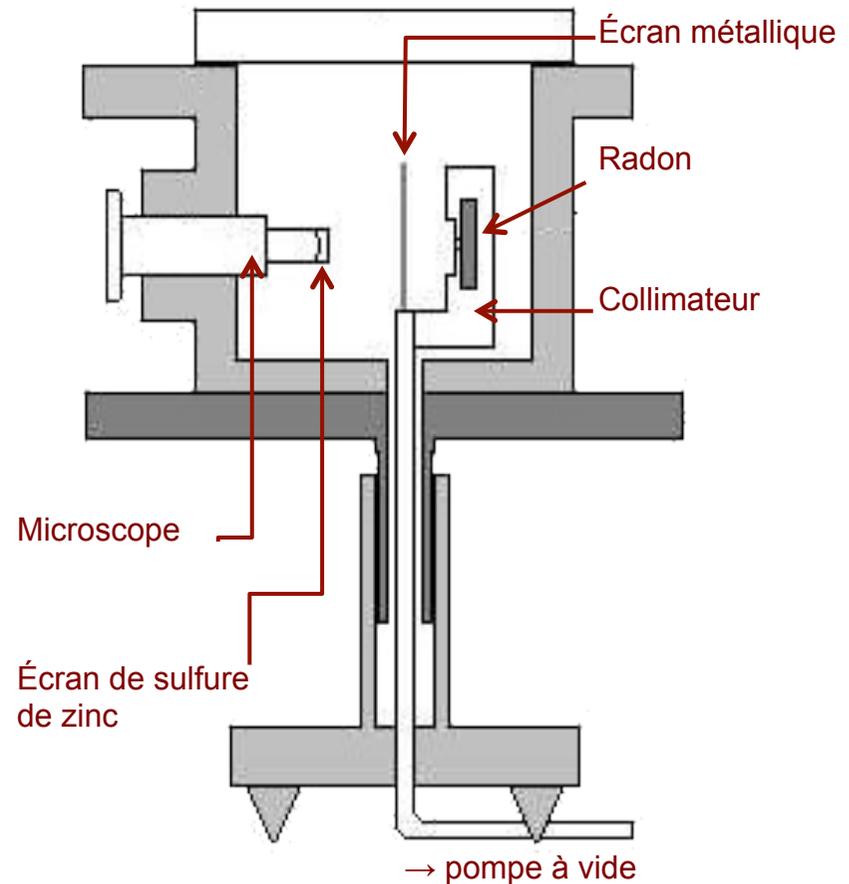
# C'EST BIZARRE...



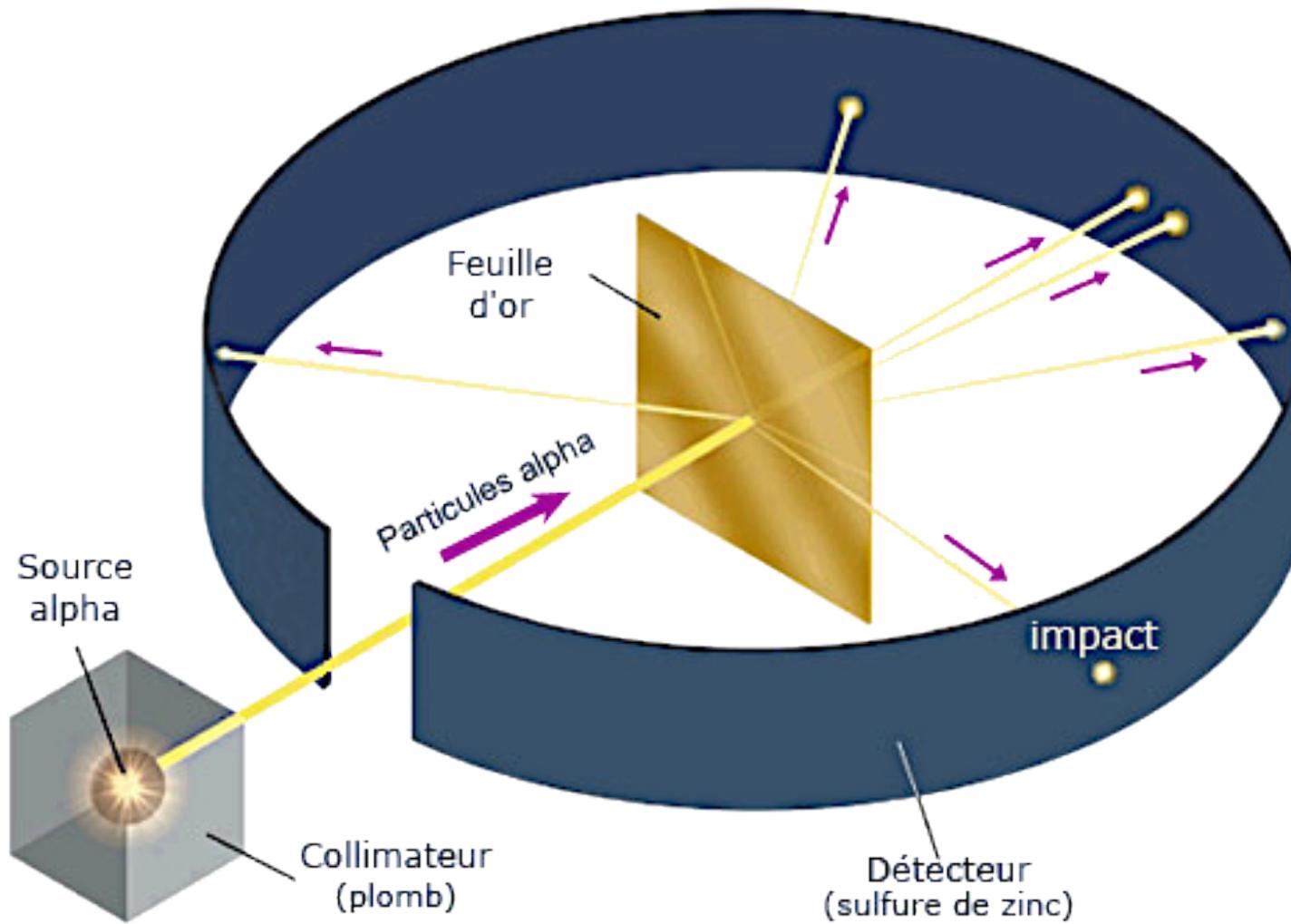
# Rutherford, Geiger et Marsden

- Rutherford avait observé la déviation de particules alpha (par des chocs ?) dès 1906
  - les images photographiques des impacts des  $\alpha$  déviés par un champ électromagnétique étaient légèrement floues
  - idem pour l'image d'une petite ouverture (collimateur)
- Nommé professeur à Manchester en 1907, Rutherford lança une étude systématique de ces déviations parasites
- Il la confia à
  - Hans Geiger (post-doc)
  - assisté après 1909 par Ernest Marsden (thésard)

## ■ Montage simple



# Une expérience simple



# Premières observations

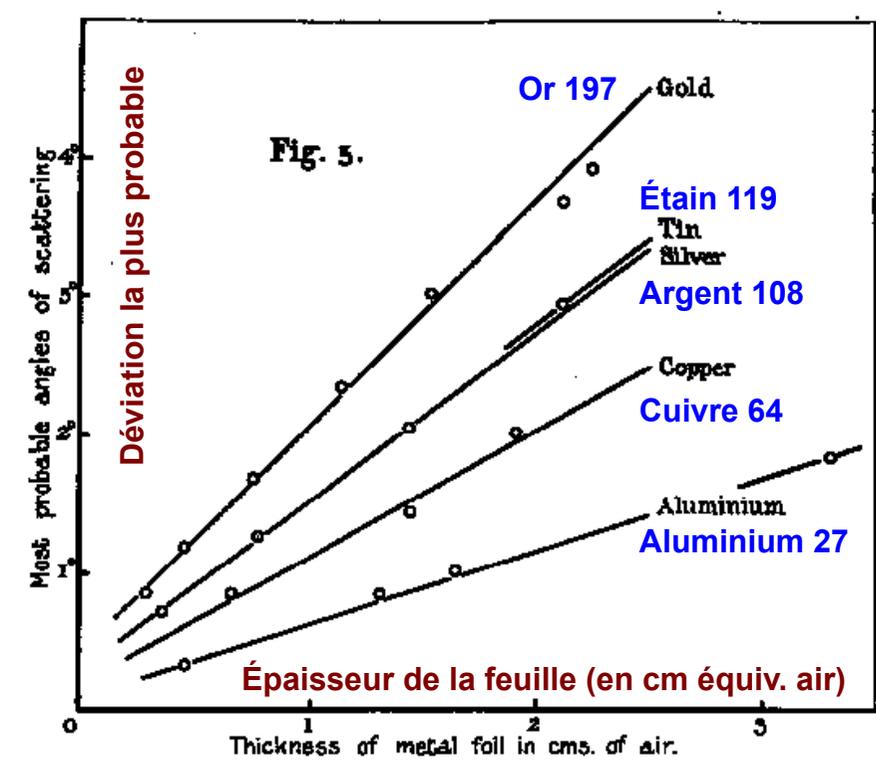
- Diffusion de particules  $\alpha$  par des feuilles très minces [épaisseur 0,1  $\mu\text{m}$  à 1  $\mu\text{m}$ ] d'aluminium, de cuivre, d'argent, d'étain, d'or ou de platine
- $\Rightarrow$  faible déviation (rarement plus de  $1^\circ$ ) du jet de particules  $\alpha$

- Quantitativement:

- déviation  $\propto \sqrt{\text{épaisseur}}$
- déviation  $\propto \sqrt{\text{masse atomique}}$

- $\Rightarrow$  intérêt des feuilles d'or

- très minces (0,1  $\mu\text{m}$ )
- de poids atomique élevé



H. Geiger *The Scattering of the  $\alpha$ -Particles by Matter* 1910

# Déviation d'une charge ponctuelle par une autre

- Déviation  $2 \tan \theta / 2 \approx \theta \approx E_{\text{potentielle}} / E_{\text{cinétique}} \Rightarrow \theta \cong \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{b} \frac{2}{M_\alpha V^2}$

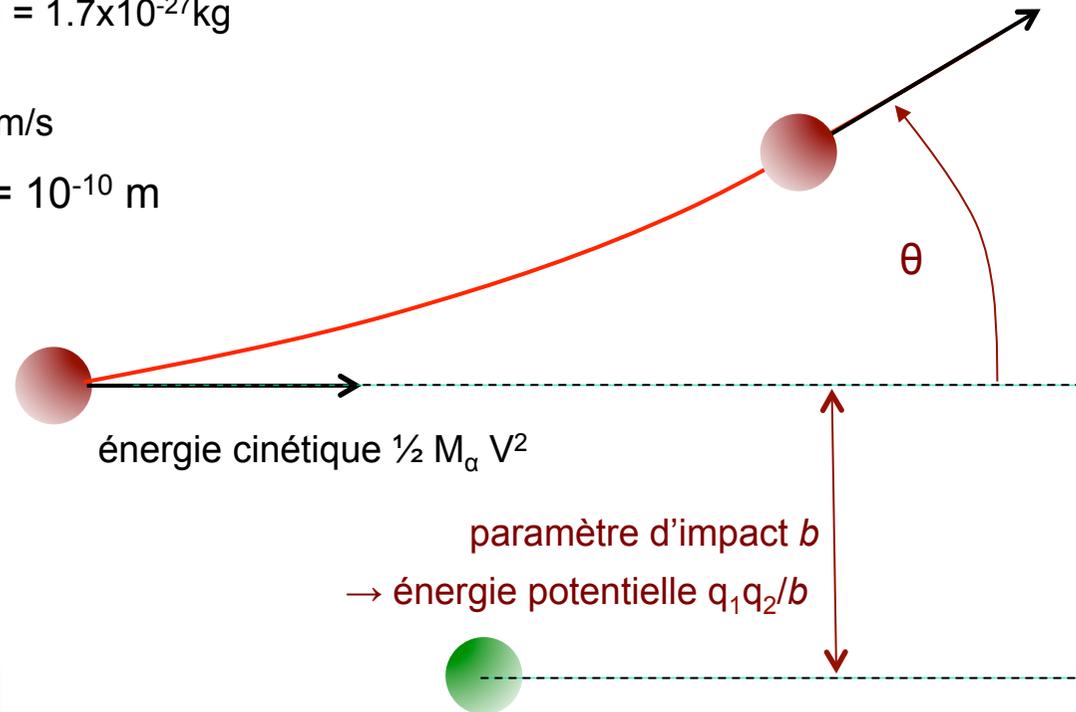
- charge élémentaire  $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{C}$
- ( $q_1 = 2e$  et  $q_2 = 79e$  pour l'or)
- unité de masse atomique  $m = 1,7 \times 10^{-27} \text{kg}$
- $M_\alpha = 4m$
- vitesse des alphas  $V \sim 10^7 \text{ m/s}$

- Paramètre d'impact  $b = 1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$

- $\Rightarrow$  Déviation

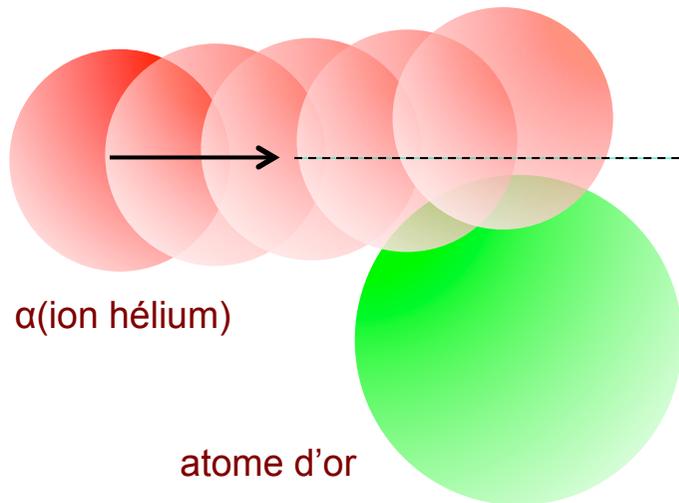
- $\theta \sim 10^{-3} \text{ radian} = 0,06^\circ$

Probabilité  $P(\theta) \propto 1/\theta^4$

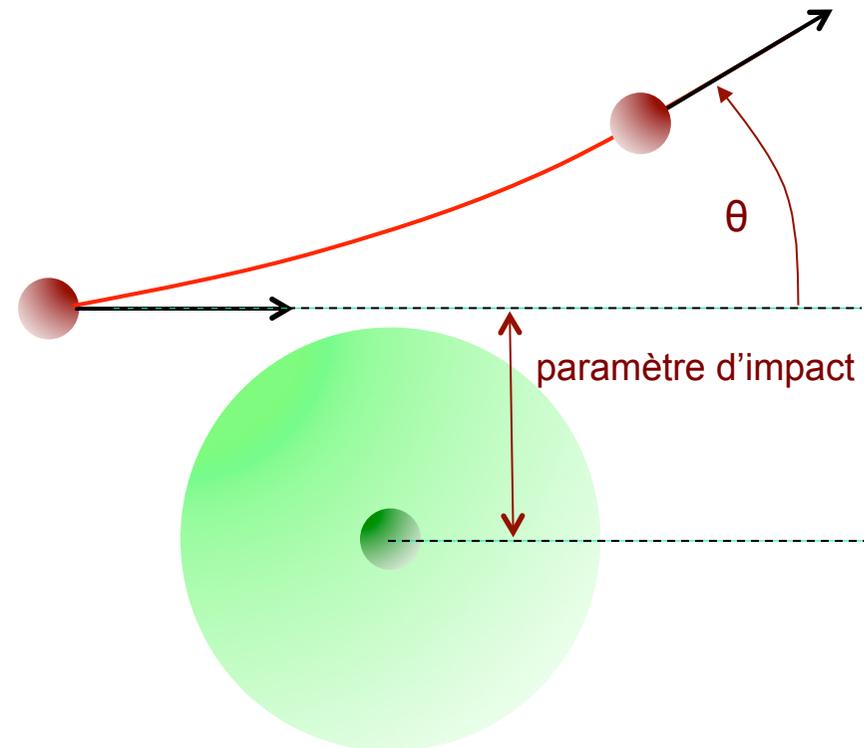


# Diffusion d'un alpha par un atome de Thomson

- « gelée » positive de rayon  $\sim 1 \text{ \AA}$
- passage près de la surface



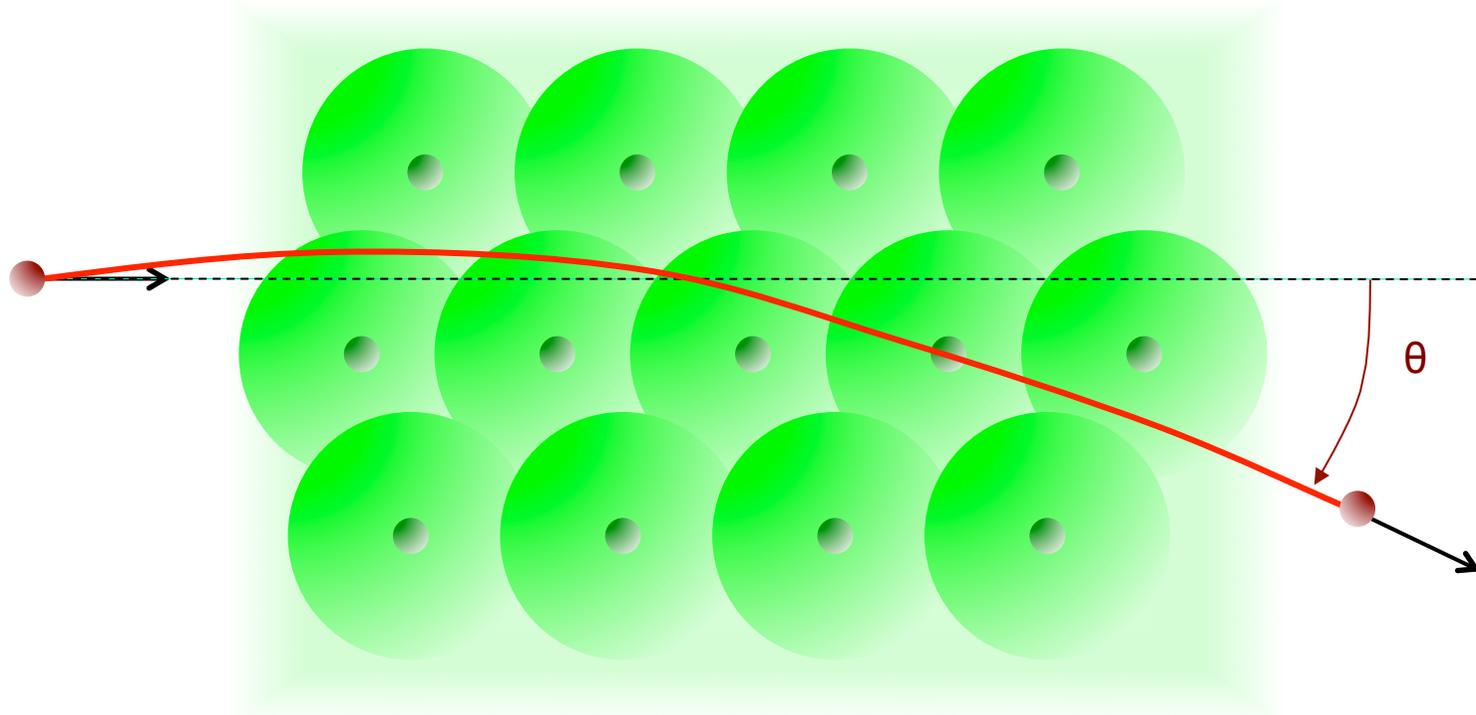
- Param\u00e8tre d'impact  $r \sim 1 \text{ \AA}$
- $\Rightarrow$  d\u00e9viation  $\theta \sim 10^{-3} \text{ rd}$

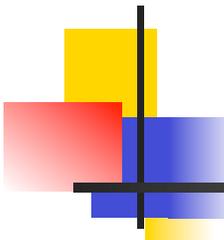


- Tout se passe comme si les charges \u00e9taient ponctuelles
  - charge  $2e$  pour l'alpha
  - charge  $Ze$  pour l'atome-cible

## Diffusion par une feuille d'or

- Diffusion successives par plusieurs atomes
- Épaisseur de la feuille d'or de  $0.2 \mu\text{m}$   
→  $\sim 1000$  atomes traversés
- Déviation  $\theta \sim \sqrt{(1000)} \times 1/10^\circ$
- Soit quelques degrés au plus





## Une bizarrerie : la diffusion à grand angle

---

- En 1910, Marsden observa qu'une collision sur 10 000 environ conduisait à une déviation de plus de  $90^\circ$
- Rutherford pensa d'abord à plusieurs collisions successives
- *Possible si 1000 collisions déviaient toutes l'alpha de  $1/10^\circ$  dans la même direction*
- Mais probabilité de 1000 collisions toutes dans le même sens  $\sim (1/2)^{1000} \sim 1/10^{300} \ll 1/10\ 000$
- **Début 1911, Rutherford finit par conclure que la charge positive de l'atome était extrêmement concentrée**
  - $\Rightarrow$  une collision sur 10 000 heurte directement cette concentration de charge et l'alpha est violemment dévié de  $90^\circ$  ou plus
  - $\Rightarrow$  la concentration de charge est une cible 10 000 fois plus petite que l'atome



A la découverte  
du noyau de l'atome

Une mouche  
dans une cathédrale

# L'interprétation de Rutherford



- Déviation **unique** par une charge **ponctuelle**
- L'angle de déviation  $\theta$  est inversement proportionnel au paramètre d'impact  $b$

$$2 \tan \theta / 2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{b} \frac{2}{M_\alpha V^2}$$

- $b \sim 1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} \rightarrow$  déviation  $\theta \sim 10^{-3}$  radian
- $\Rightarrow \theta \sim 1 \text{ radian } (\sim 57^\circ) \rightarrow b \sim 10^{-3} \text{ \AA} = 10^{-13} \text{ m}$
- Rutherford en conclut que la charge positive de l'atome
  - est concentrée
  - dans un rayon inférieur à  $10^{-14} \text{ m}$  [1/10 000 du rayon atomique]
- $\Rightarrow$  **noyau !**
- intérêt poli des autres physiciens, **jusqu'au modèle de Bohr**

*Theory of structure of atom*

Suppose atom consist of + charge  $Ne$  at centre + - charge  $e$  distributed throughout sphere of radius  $a$ .

Free at  $P$   $\Rightarrow$  deflection =  $Ne^2 \left\{ \frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2} \right\}$

$= Ne^2 \left\{ \frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2} \right\} = \theta$

Suppose charged particles  $e$  massive moves through atom so that deflection is small but  $\theta$  distance from centre =  $a$

deflecting force is direct from centre  $P$

$= Ne^2 \left\{ \frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2} \right\} \cos \theta$

and  $\theta$  small  $\Rightarrow$   $\cos \theta = 1$

Work is equal to change in KE of particle

$W = \int dd \cdot di = Ne^2 \int \cos \theta \cdot \frac{ds}{r^2}$

$= \frac{Ne^2}{mV} \int \left( \frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2} \right) \frac{ds}{r^2}$

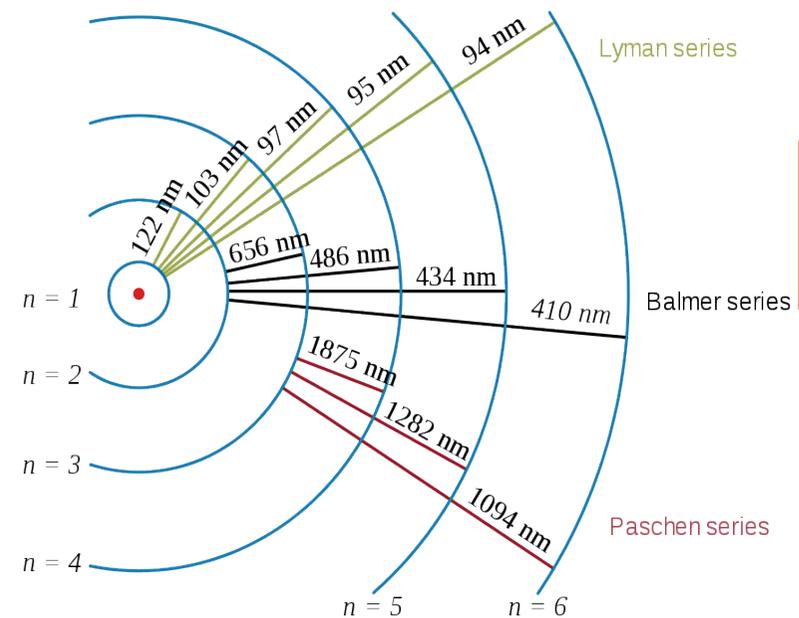
$= \frac{2Ne^2}{mV} \int \frac{ds}{r^2} \cos \theta$

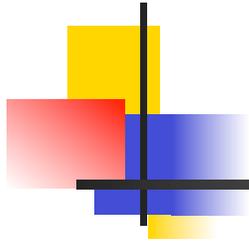
$= \frac{2Ne^2}{mV} \int \frac{ds}{r^2} \cos \theta = \frac{2e^2}{mV} \int \frac{ds}{r^2} \cos \theta$

# Le modèle atomique de Bohr



- En mars 1912, Niels Bohr vint passer quelques mois près de Rutherford
- Il parvint à reproduire le spectre de l'hydrogène (séries de Lyman, Balmer et Paschen) en partant du modèle d'atome de Rutherford
- Mais à condition que
  - l'électron ne suive que certaines orbites (celles de moment orbital  $L = nh/2\pi$ )
  - ne rayonne pas sur ces orbites
  - émette en changeant d'orbite un photon de fréquence  $\nu = (E_1 - E_2)/h$
- Le modèle de Bohr n'est pas très efficace pour les autres atomes car il n'explique pas la plupart des raies observées



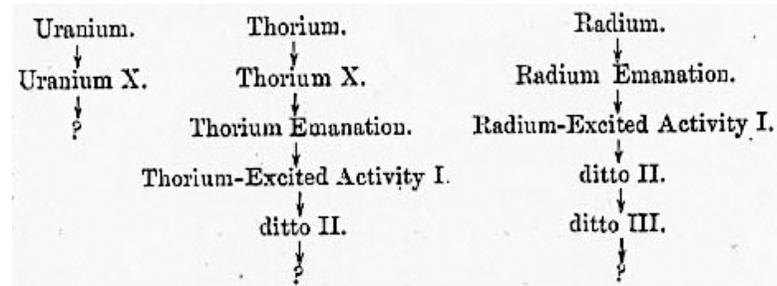


# EN PLEIN BROUILLARD

# 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, puis 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

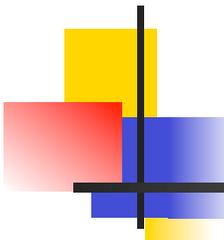
Uranium 1. . . . .	$4,3 \cdot 10^{-18}$	$5,0 \cdot 10^8$ ans.	4	$\alpha$
Uranium Y . . . . .	$3,4 \cdot 10^{-6}$	1,0 jours.	2	$\beta$
Uranium X <sub>1</sub> . . . . .	$3,3 \cdot 10^{-7}$	24,6 jours.	4	$\beta$
Uranium X <sub>2</sub> . . . . .	0,0100	1,15 min.	2	$\beta$
Uranium 2. . . . .	$1 \cdot 10^{-14}$	$2 \cdot 10^8$ 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' . . . . .	$7 \cdot 10^{-7}$	$10^{-6}$ 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	4 s	0	$\alpha$
Actinium A. . . . .	3,00		2	$\alpha$
Actinium B. . . . .	$3 \cdot 2 \cdot 10^{-4}$	27,1 min.	2	$\beta$
Actinium C . . . . .	$3 \cdot 3 \cdot 10^{-5}$	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 . . . . .	$4,0 \cdot 10^{-9}$	5,5 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	56 s	0	$\alpha$
Thorium A. . . . .	0,0		2	$\alpha$
Thorium B. . . . .	$1,8 \cdot 10^{-7}$		2	$\beta$
Thorium C <sub>1</sub> . . . . .		50 min.	3	$\alpha, \beta^2$
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	$\alpha$

Valence

Demi-vie

Mode de transmutation



## 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, mais tous apparemment situés entre l'uranium et le plomb
- 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 (masse et durée de vie différentes) – 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]

# Frederick Soddy

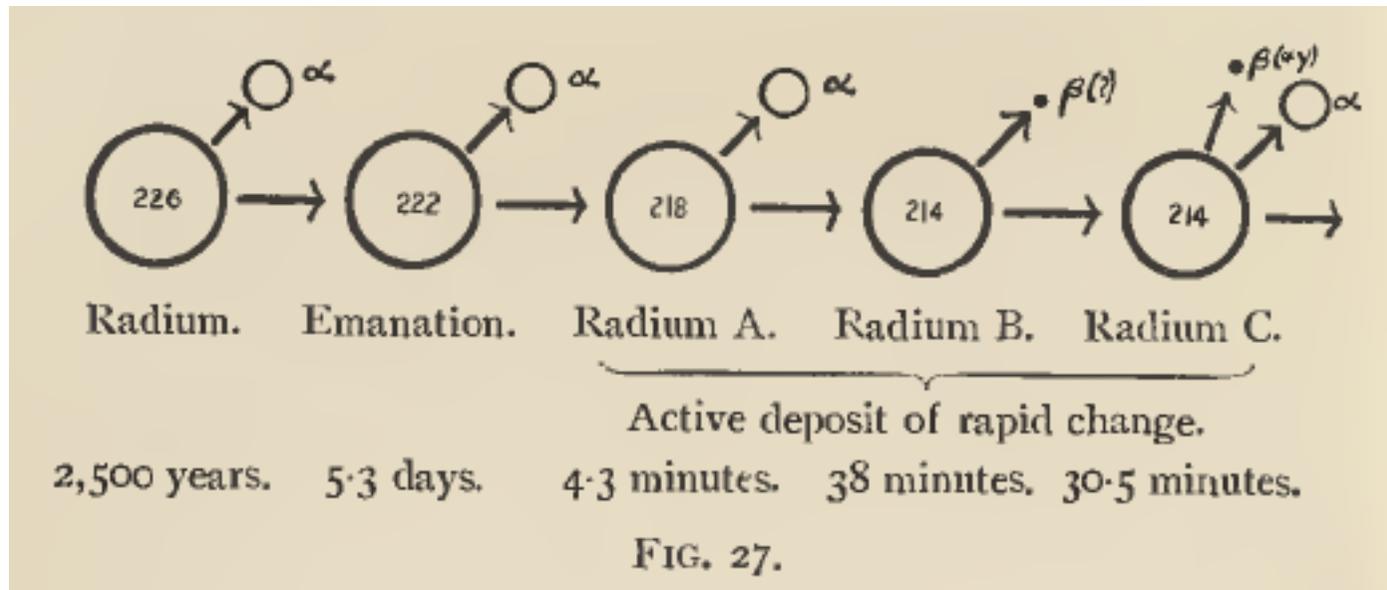
- Après sa découverte avec Rutherford des transmutations radioactives, Soddy était retourné en 1903 à Londres, collaborant avec Ramsay sur les gaz inertes



- 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

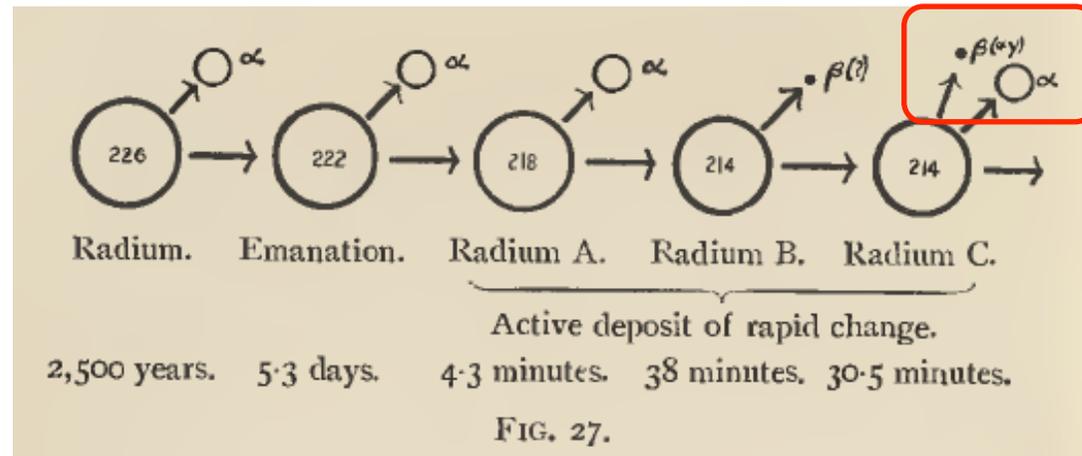
- Soddy démontra en 1911 qu'une transmutation alpha diminuait la masse atomique de 4 unités et **diminuait de deux rangs** la position de l'élément dans le tableau périodique ( $Z \rightarrow Z - 2$ )
  - le radium 226 ( $Z=88$ ) donne de l'émanation (= radon 222,  $Z=86$ )
  - celle-ci donne du radium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



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

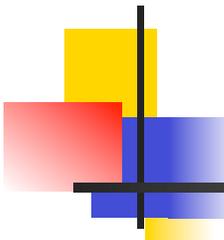
# La règle de déplacement pour les bêtas

- 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  $\mu$ s] du radium D par transmutation **alpha**



# La notion d'isotope

---

- Plusieurs équipes avaient démontré 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 nécessairement le même comportement chimique, tout en pouvant avoir un comportement radioactif différent (modes de transmutation et  $\frac{1}{2}$  vies) ainsi que des masses atomiques différentes
  - uranium X1 = thorium 234
  - ionium = thorium 230
  - radioactinium = thorium 227
- thorium = thorium 232
- radiothorium = thorium 228
- La notion d'isotope n'expliquait cependant pas **pourquoi** des éléments chimiquement identiques (inséparables) avaient des comportements physiques (masse, durée de vie et transmutations) si différents

F. Soddy, Conférence Nobel 1921

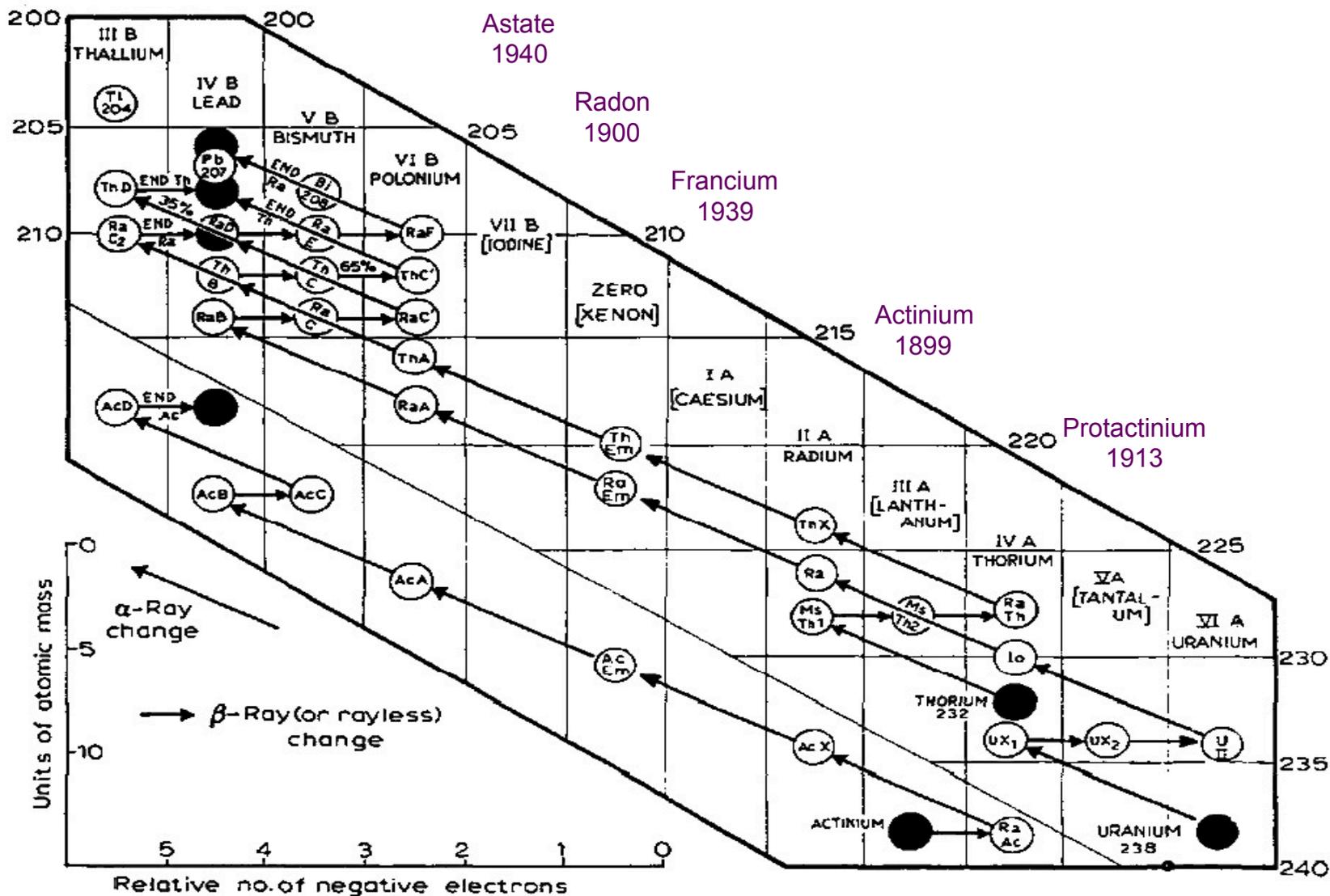
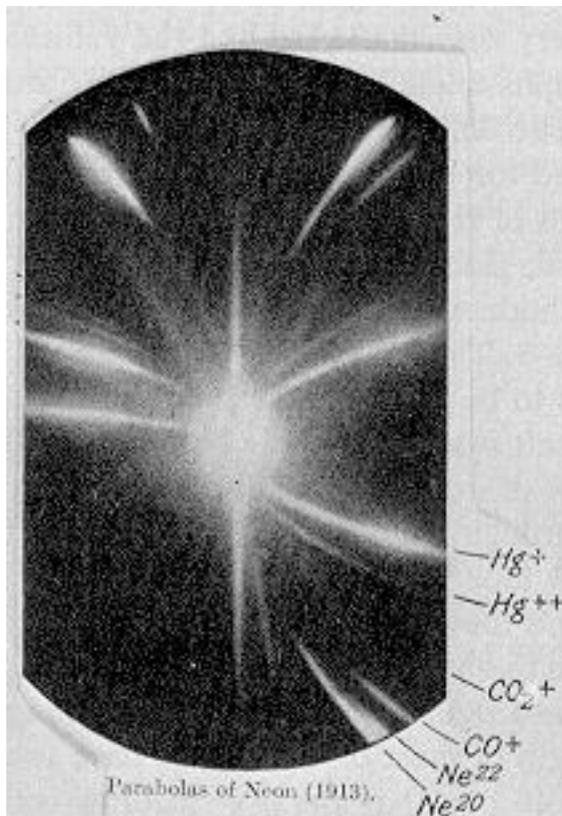


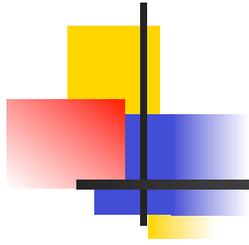
Fig. I. Radio-elements and Periodic Law. All elements in the same place in the Periodic Table are chemically non-separable and (probably) spectroscopically indistinguishable.

# Le vieux lion est toujours debout

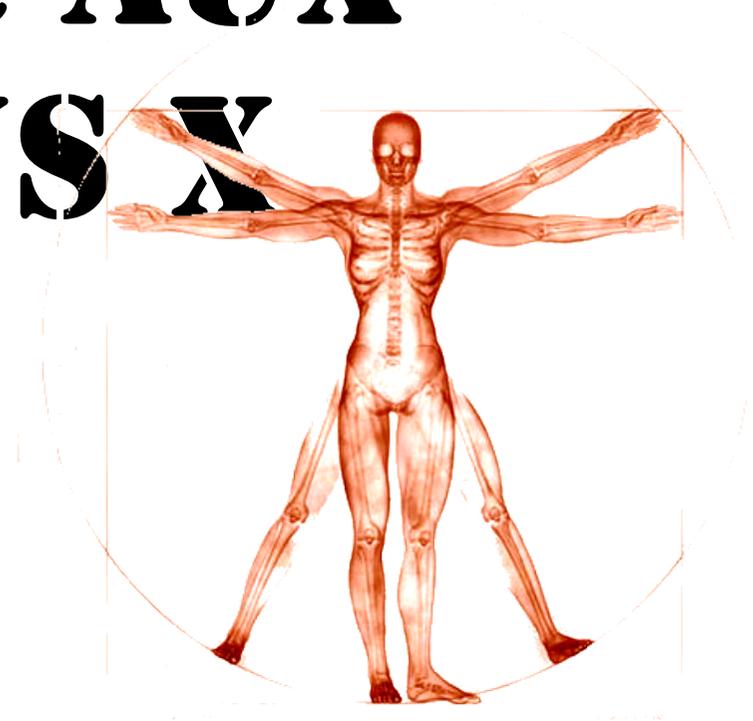
- En 1913, J.J. Thomson poursuivait au Cavendish ses études des « rayons canaux », les ions positifs des tubes à décharge



- Déviation des ions par champs électrique et magnétique → impact sur la plaque photographique dépendant de leur rapport charge/masse
-  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



# Max von Laue (1879-1960)

- La lumière : onde ou 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)

- comment le démontrer?
- 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

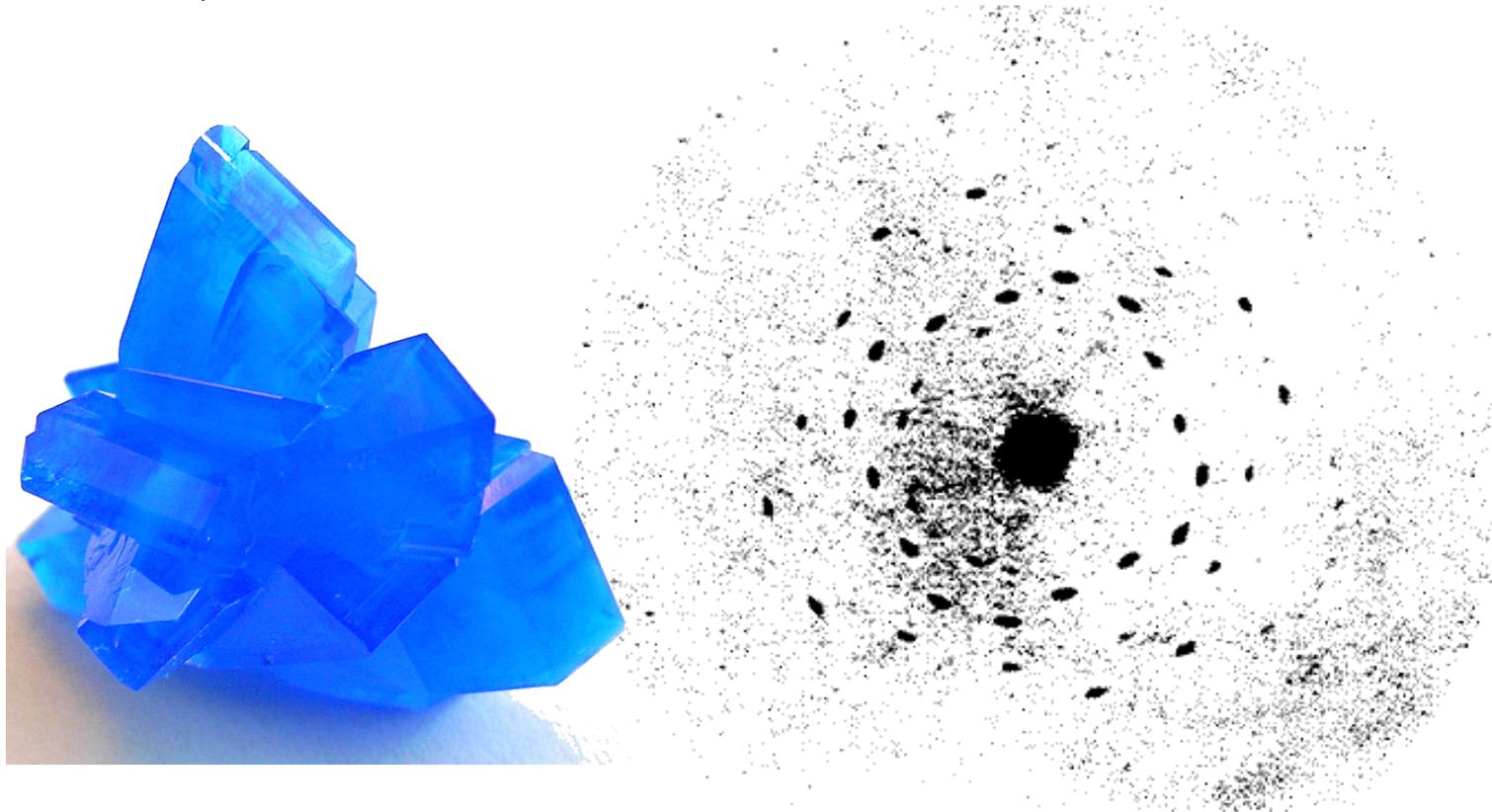
- diffracter des rayons X sur des cristaux pour en étudier les structures



- → prix Nobel de physique 1914

# Spectaculaire !

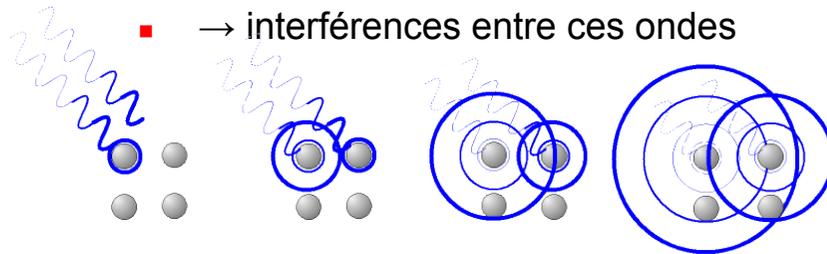
- Figure de diffraction obtenue par von Laue en 1912 avec un cristal de sulfate de cuivre ( $\text{CuSO}_4$ )



# Diffraction et interférence des rayons X

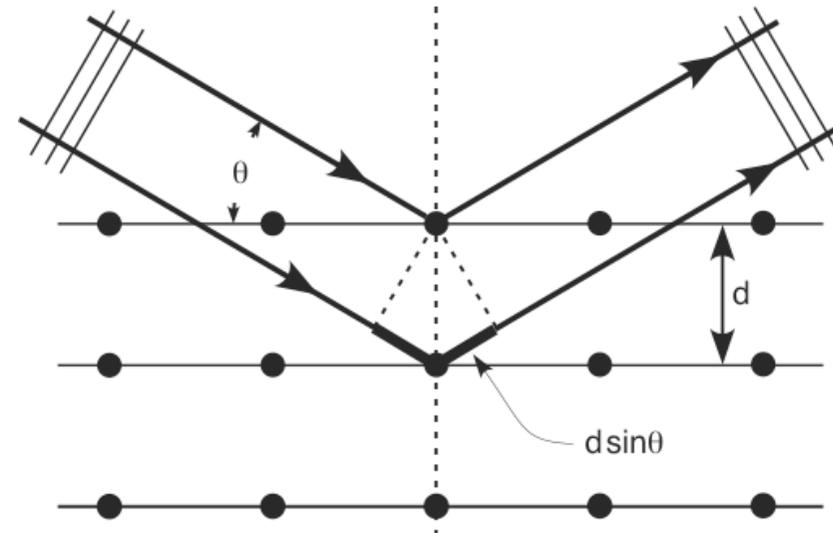
## ■ Rayons X et cristaux

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

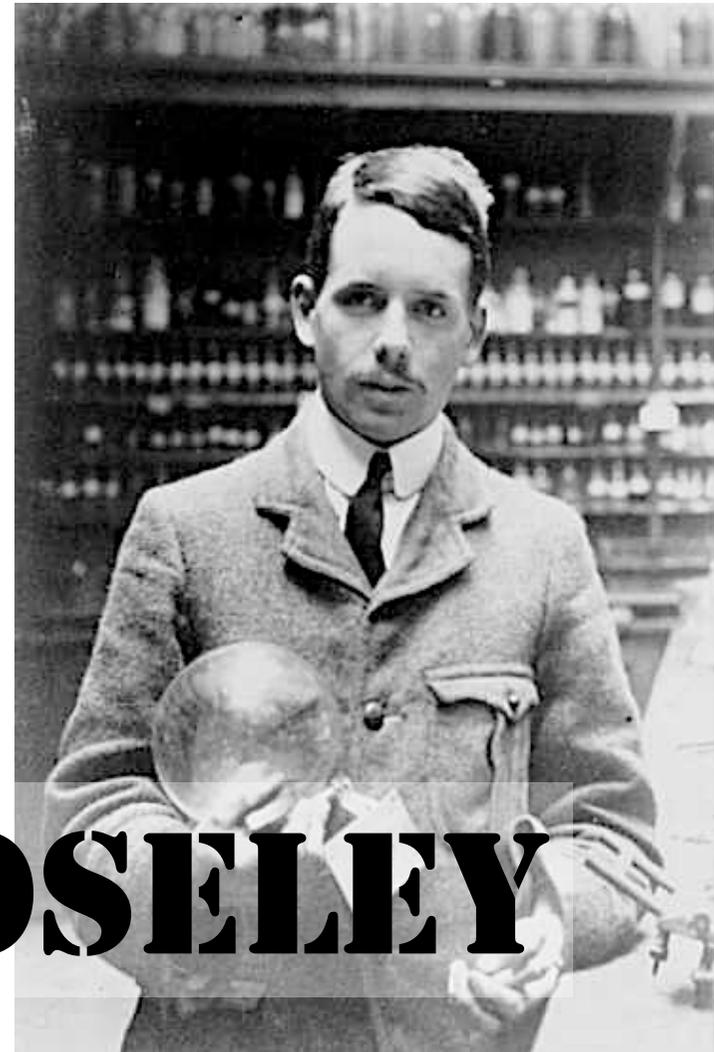
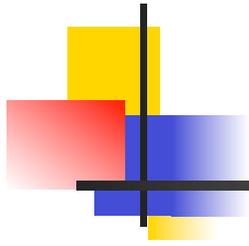


- → angles  $\theta$  d'émission maximale dépendant de la distance  $d$  entre les atomes et de la longueur d'onde  $\lambda$  du rayonnement (X ou pas d'ailleurs)

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



- ⇒ si  $\lambda$  est connu →  $d$
- ⇒ si  $d$  est connu →  $\lambda$
- ⇒ spectroscopie des rayons X

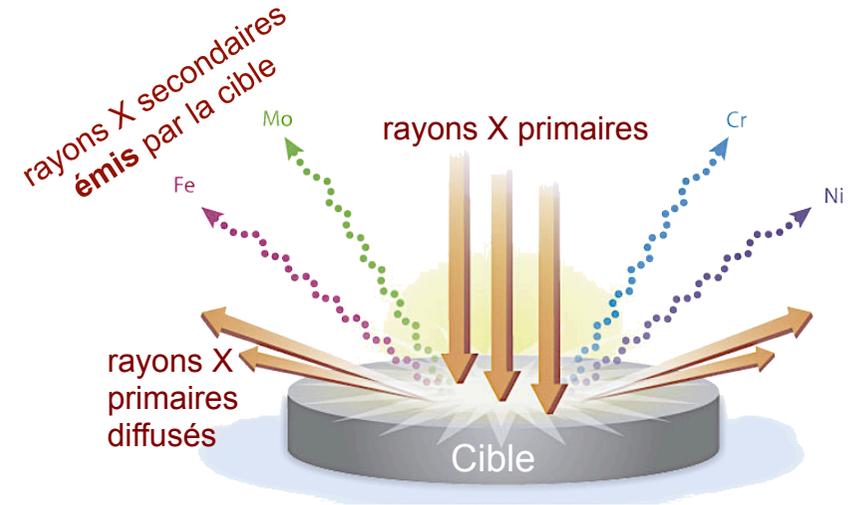


# HENRY MOSELEY

# Spectroscopie par diffraction de rayons X

## ■ Méthode : diffraction des rayons X

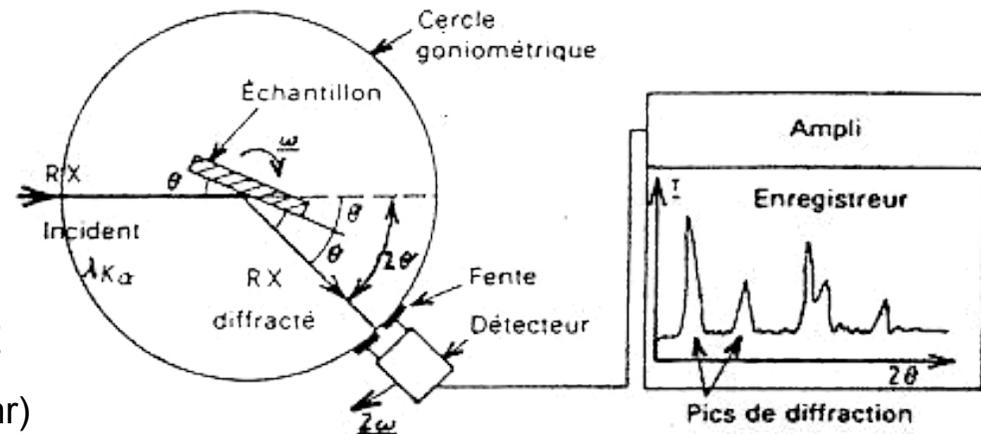
- émission de rayons X par une source
- bombardement d'une **cible** par ces rayons → rayons X *secondaires*
- diffraction des X secondaires par un cristal (**connu** !)
- angle de diffraction  $\Leftrightarrow$  longueur d'onde  $\lambda$  des X émis par la cible, ou fréquence  $\nu = c/\lambda$



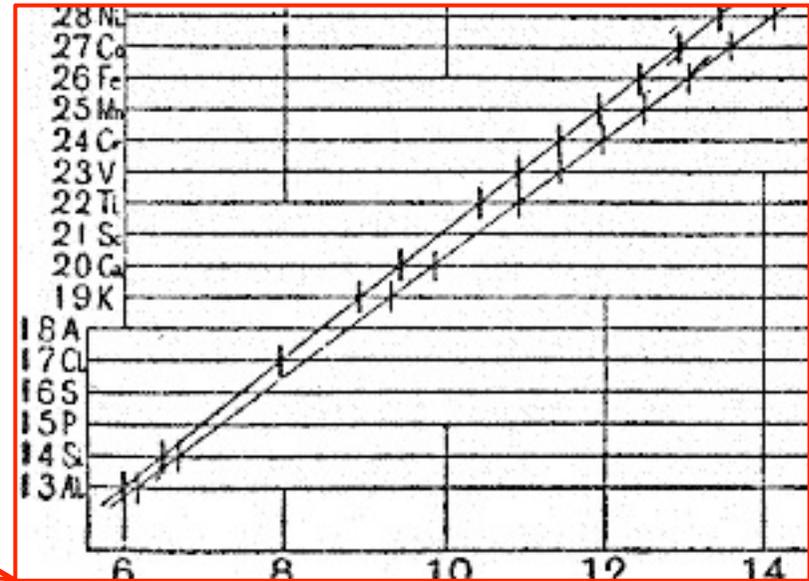
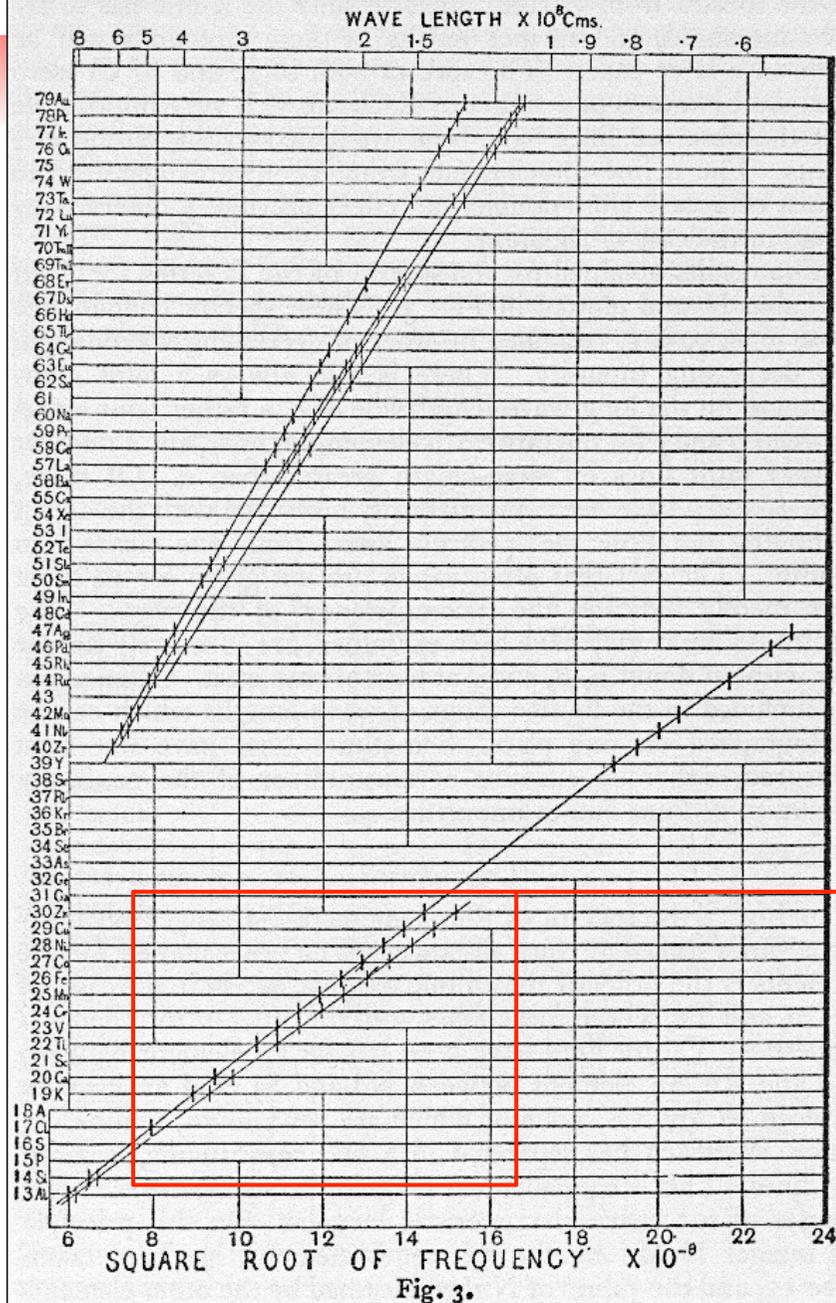
## ■ Henry Moseley (1887-1915) montra que

$$\nu = \nu_0 * (Z-1)^2$$

- pour une cible de numéro atomique  $Z$
- (relation prévue par le modèle de Bohr)



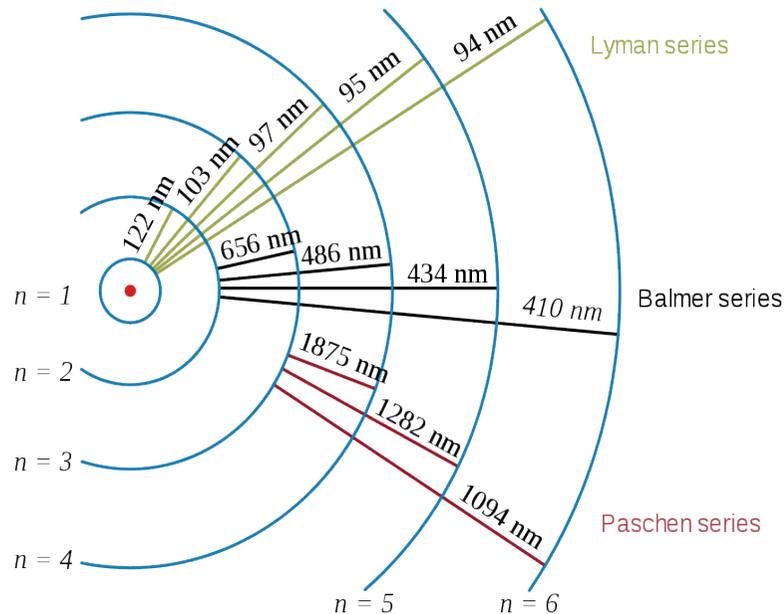
High-Frequency Spectra of the Elements.



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

# Lien avec le modèle de Bohr de l'atome

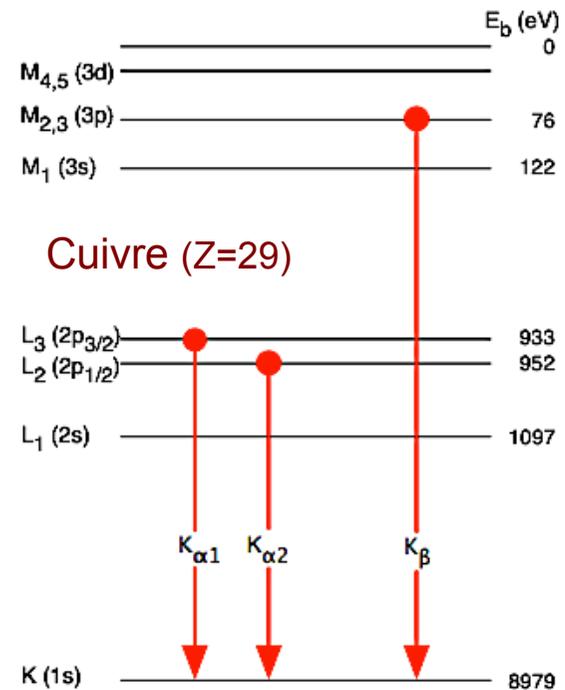
- Atome d'hydrogène selon Bohr

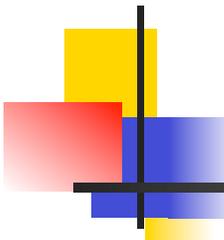


K  $\leftrightarrow$   $n=1$ , L  $\leftrightarrow$   $n=2$ , M  $\leftrightarrow$   $n=3$

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

$$\Rightarrow \text{énergie} = h \nu = 10,2 \text{ eV } (Z-1)^2$$





# Le numéro atomique $Z$

---

- Numéro atomique  $Z$  = rang ( $\rightarrow$  nombre entier) dans le tableau de Mendeleiev quand les atomes sont classés par *masse* atomique croissante
  - $\rightarrow$  exige des permutations pour s'accorder aux propriétés chimiques
  - $\rightarrow$  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  $Z$  à la charge ( $+Ze$ ) du noyau et donc au nombre exact d'électrons d'un atome (neutre)
  - 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 des places du cobalt et du nickel
  - Il confirma que des éléments  $Z=43$ ,  $61$ ,  $72$ ,  $75$ ,  $85$  et  $87$  devaient exister (de fait, découverts de 1923 à 1940)
  - Il confirma qu'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											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	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)	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)	86 Rn

Technétium (1937)

Hafnium (1923)

Rhénium (1925)

Astate (1940)

Francium (1939)

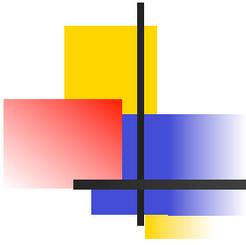
Neptunium (1940) Plutonium (1940)

Prométhium (1945)

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



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



Merci de votre attention !

