

PETITE HISTOIRE DE LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE

5 – LA STRUCTURE DE L'ATOME

Alain Bouquet

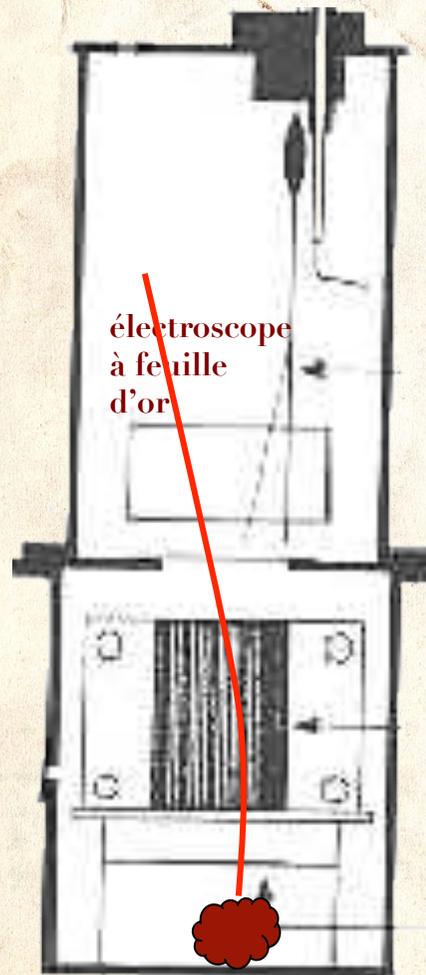
Laboratoire AstroParticule et Cosmologie

CNRS - Université Denis Diderot - CEA - Observatoire de Paris

LA NATURE DES ALPHAS

LA NATURE DES ALPHAS

- Un montage simple (Rutherford 1903)



électroscope
à feuille
d'or

plaques de cuivre connectées
à une forte batterie → champ
électrique

ou un gros aimant → champ
magnétique

source de rayonnement
(radium...)

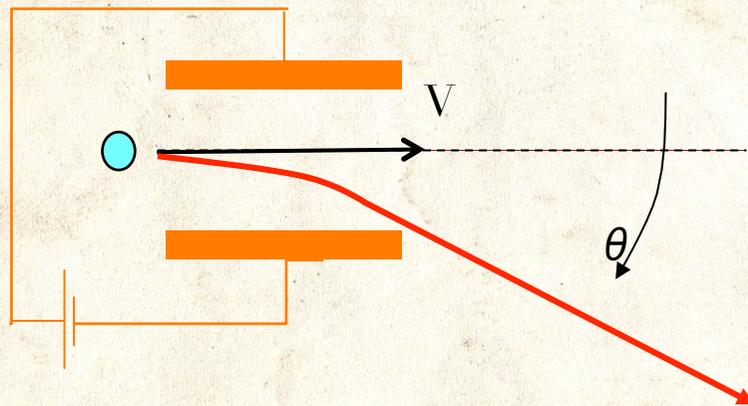
- Les rayons alpha sont déviés par un **très fort** champ électrique ou magnétique → particules chargées
- Sens de la déviation → charge positive
- Faible amplitude de la déviation → particules *beaucoup* plus lourdes qu'un électron → probablement des ions
- Mais de quel élément ?

DÉVIATION D'UNE CHARGE ÉLECTRIQUE e

○ **Champ électrique E**

○ Force de Coulomb $F_{\text{Coulomb}} = eE$

○ \rightarrow accélération $\gamma = e/m E$
orthogonale à la vitesse
initiale

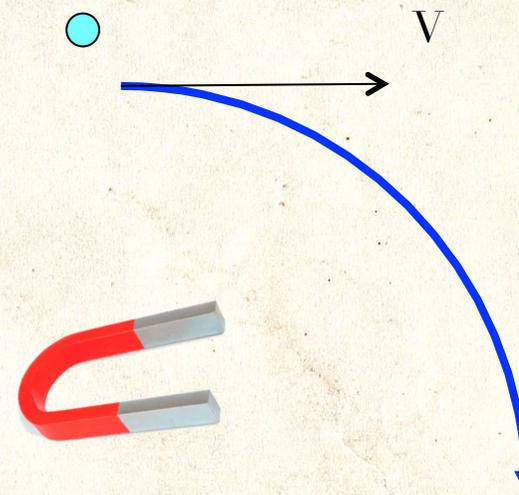


○ \rightarrow déviation $\theta \sim e/m E/V^2$

○ **Champ magnétique B**

○ Force de Lorentz $F_{\text{Lorentz}} = e V \times B$

○ \rightarrow accélération $\gamma = e/m V \cdot B$
orthogonale à la vitesse

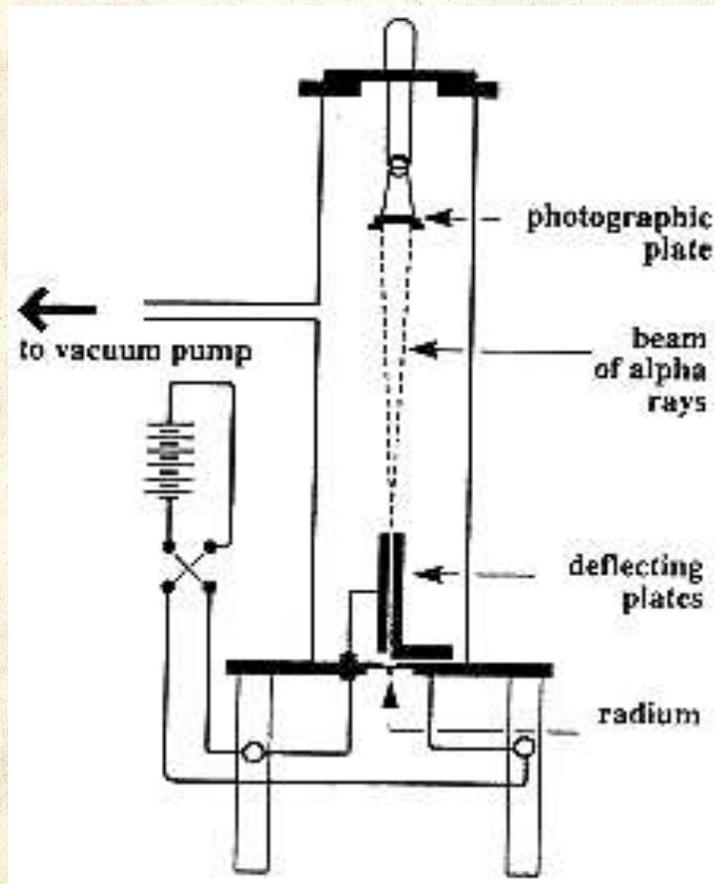


○ \rightarrow trajectoire circulaire de
rayon $r = m/e V/B$

Comparaison des déviations électrique et magnétique $\rightarrow e/m$ 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, (^{218}Po)
- radium F (^{210}Po)
- actinium
- thorium

- Champ électrique $\rightarrow e/mV^2$

- Champ magnétique $\rightarrow e/mV$

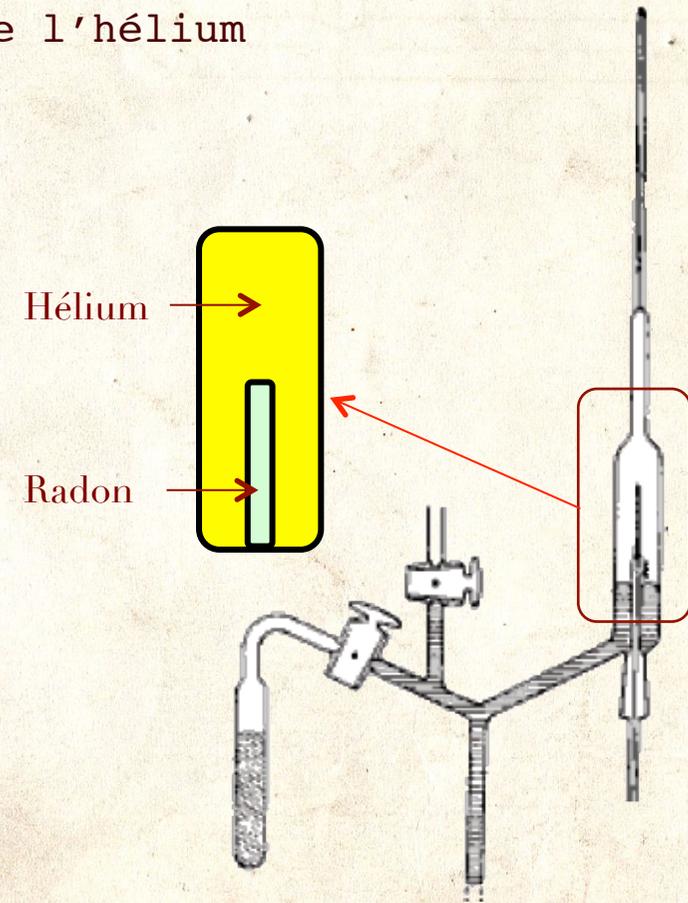
- $\rightarrow e/m \sim \frac{1}{2}$ ion hydrogène H^+

- \Rightarrow plusieurs identités possibles, (n fois la charge et 2n fois la masse de H^+)
dont l'ion hélium He^{++}

- et vitesses $\sim 10\,000$ km/s

LES ALPHAS SONT BIEN DES IONS HÉLIUM

- Rutherford pensaient que les α étaient des ions hélium
- Mais il demeurerait 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
 - et 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



L'ATOME EST-IL INSÉCABLE?

ATOMES ET ÉLÉMENTS CHIMIQUES

- Dalton (1766-1844)
 - matière formée d'atomes minuscules et inaltérables
 - identiques pour un même élément (carbone, oxygène...)
 - s'assemblant toujours dans les mêmes proportions
 - 1 atome de carbone \leftrightarrow 1 ou 2 atomes d'oxygène, jamais 3 ou 4 (ni 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 de Chancourtois (1862)
 - octaves de Newlands (1863)
 - **tableau de Mendeleiev** (1869)

TABLEAU DE MENDELEIEV

- 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 = 104,1	Pt = 197,1.	
			Fe = 56	Rn = 104,1	Ir = 198.	
		Ni = Co = 59	Pi = 106,6	O = 199.		
		Cu = 63,1	Ag = 108	Hg = 200.		
H = 1	Be = 9,1	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112		
	B = 11	Al = 27,1	? = 68	Ur = 116	Au = 197,2	
	C = 12	Si = 28	? = 70	Sn = 118		
	N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?	
	O = 16	S = 32	Se = 79,1	Te = 128?		
	F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	I = 127		
	Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,1	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, Mendeleieiev 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

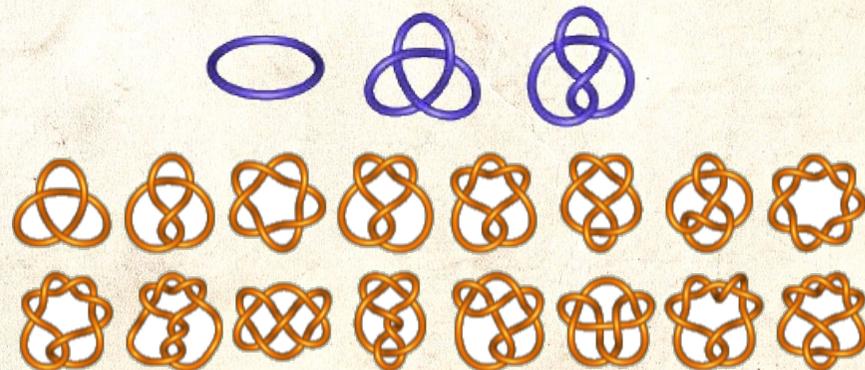
- cobalt (m=58,9) avant nickel (58,7)

- 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 (Cl et I)
 - 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)

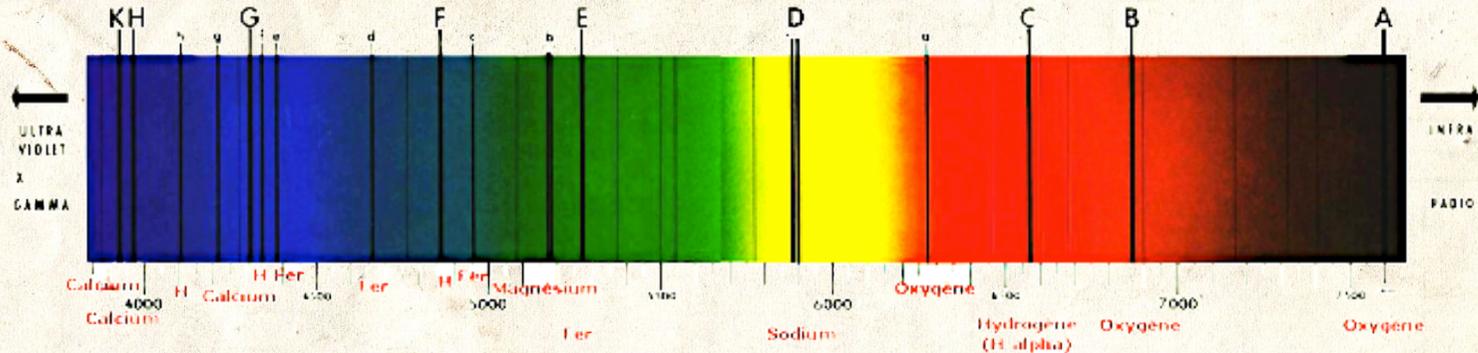


ATOME ET LUMIÈRE

○ Raies spectrales



J. Fraunhofer



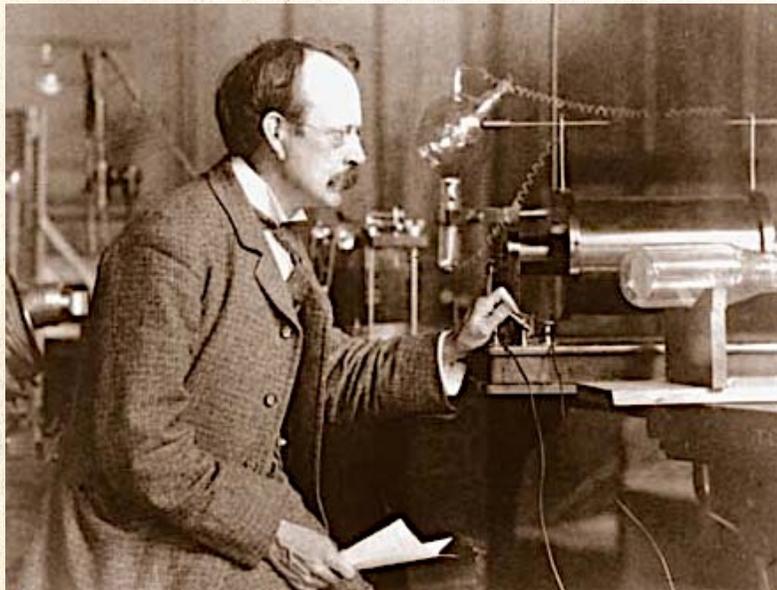
- Melvill: raies brillantes (1752)
- Fraunhofer: raies sombres (1819)
- Foucault: correspondance des raies (1849)
- Ångström: raies de l'hydrogène (1853)
- **Kirchhoff et Bunsen**: étude systématique (1855-1863)
- → découverte du césium, de l'hélium (Lockyer 1869) et d'une quinzaine d'éléments

○ **lien avec la structure atomique ?**

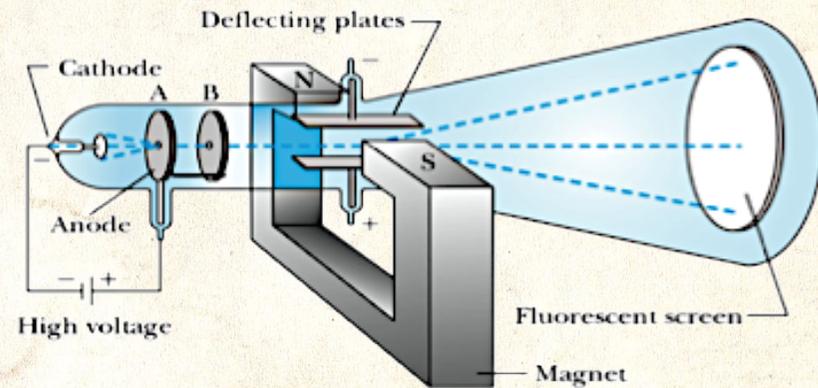
- Stokes (1852), Maxwell (1875): les fréquences des raies correspondent sans doute à des fréquences de vibration des **constituants des atomes**
- Régularités: Balmer (1885), Rydberg (1888)

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

LES « DYNAMIDES » DE LENARD (1903)

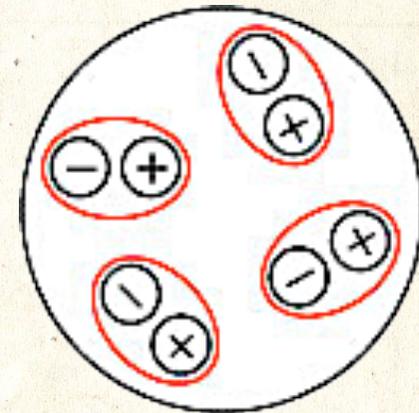
- Philip Lenard (1862-1947)
- L'absorption des rayons cathodiques (électrons) par la matière ne dépend que de la masse atomique de celle-ci (*Über die Absorption der Kathodenstrahlen verschiedener Geschwindigkeit* 1903)



Lenard, du côté obscur...

- ⇒ les atomes sont tous formés des mêmes constituants, les dynamides, mais en nombre variables

- Hélium



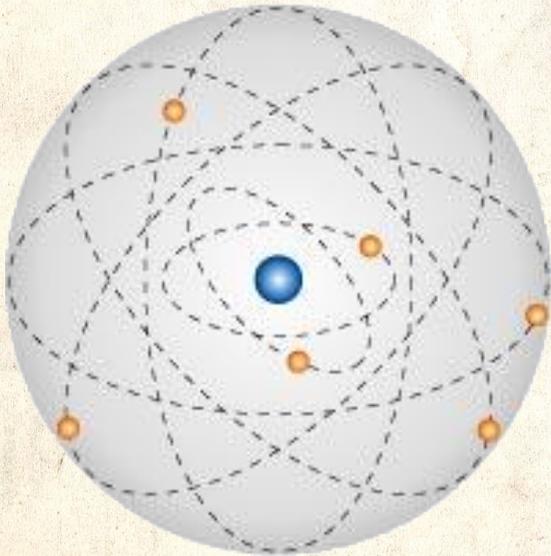
- Explique les électrons, l'ionisation, certaines régularités

Difficultés

- *liaison des dynamides*
- *composante positive?*
- *raies spectrales?*

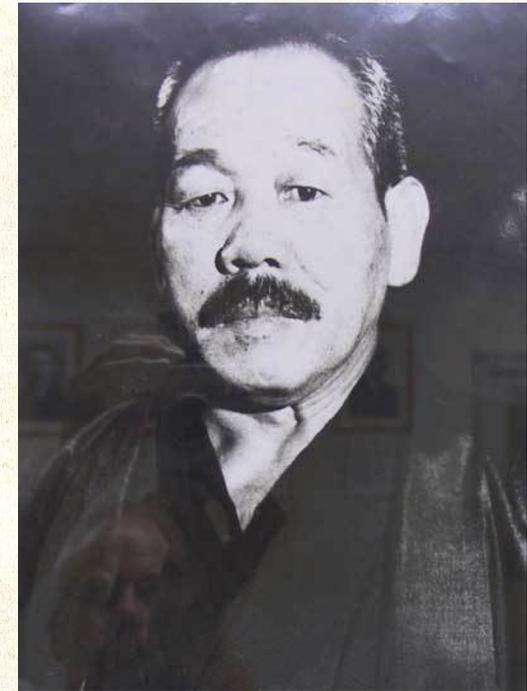
NAGAOKA : UN MODÈLE SATURNIEN (1904)

- 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

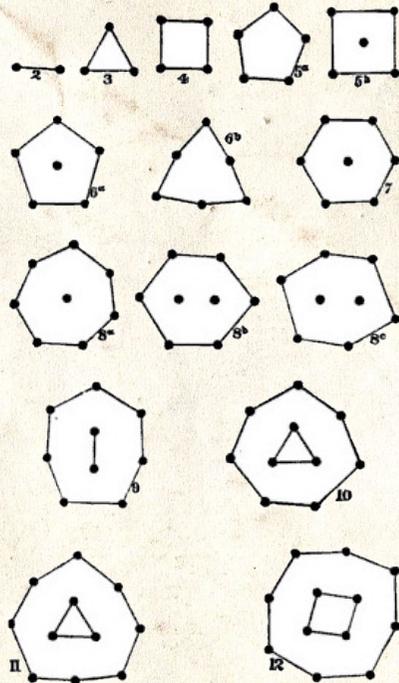
- *répulsion des électrons*
- *instabilité radiative*
- *raies spectrales*



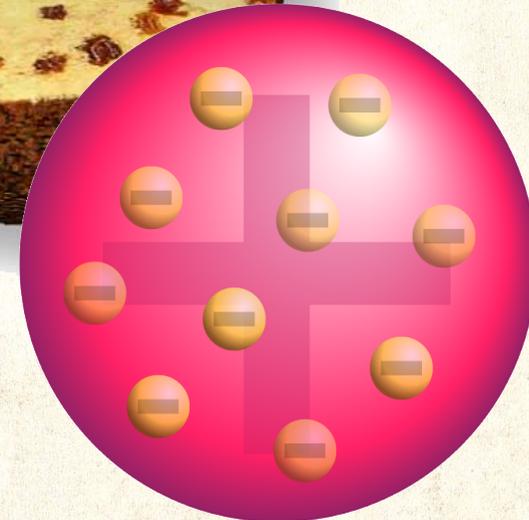
Nagaoka Hantaro (1865-1950)

L'ATOME SELON J.J. THOMSON

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



- **Plum-pudding**

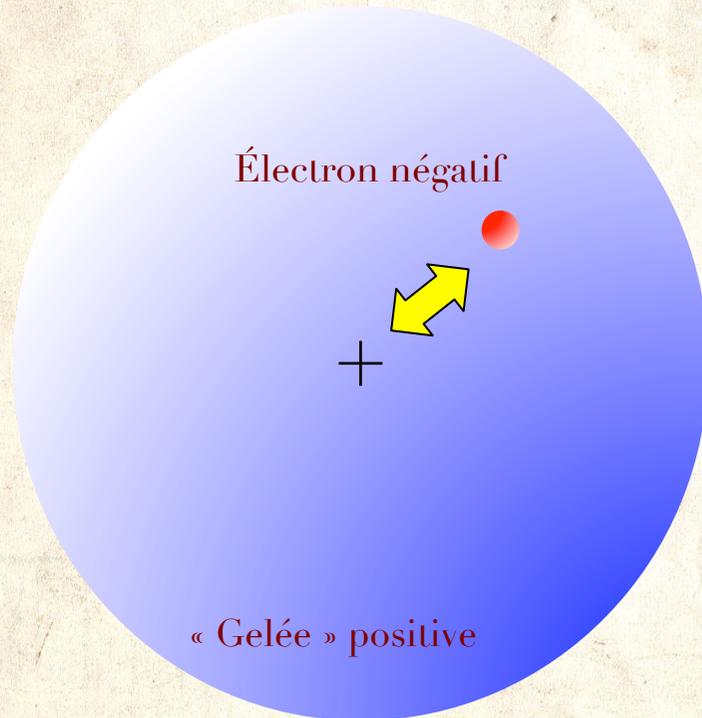


- Les électrons se répartissent-ils sur des coquilles → fréquences caractéristiques ?

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

TAILLE DE L'ATOME ET FRÉQUENCE DU RAYONNEMENT

- Position d'équilibre de l'électron : *a priori* le centre de la distribution de charge positive
- Déplacement \Leftrightarrow force de rappel \propto distance \Leftrightarrow fréquence de vibration \Leftrightarrow fréquence de la lumière émise ou absorbée

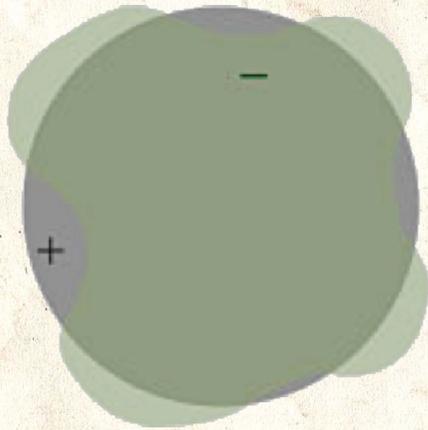


- Simple mouvement harmonique
 - charge électrique e
 - masse m
 - rayon R
 - \rightarrow fréquence $\nu(m, e, R) \rightarrow \lambda$
- Longueur d'onde $\lambda \sim 500 \text{ nm} \Leftrightarrow$ rayon $R \sim 10^{-10} \text{ m}$
- Ordre de grandeur correct
- Mais **impossibilité de calculer les positions des raies**, même pour l'hydrogène

TENTATIVES NOMBREUSES

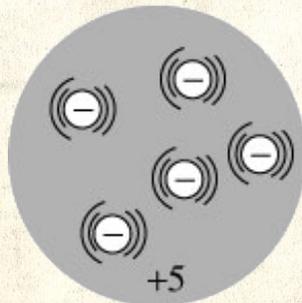
○ Rayleigh (1906)

- Deux fluides, positif et négatif (approximation d'un grand nombre d'électrons)



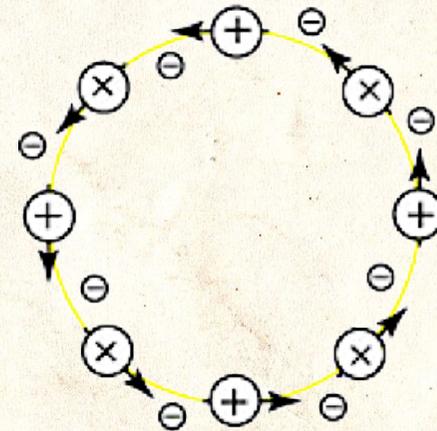
○ Jeans (1906)

- Électrons vibrants



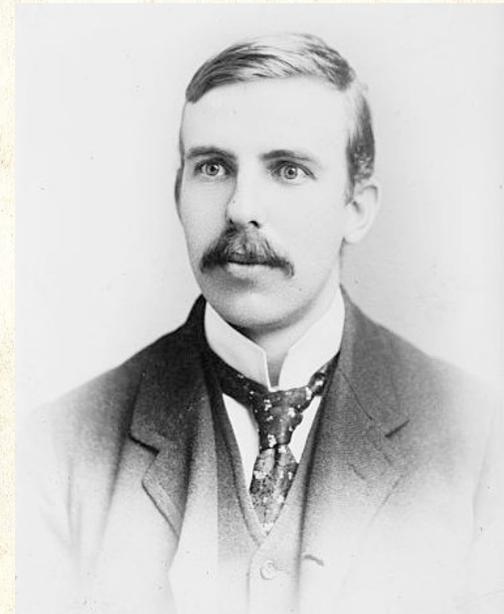
○ Stark (1910)

- Archons (charge positive massive)
- attraction magnétique
- et répulsion électrique (compensée par des électrons)



- Et beaucoup d'autres !

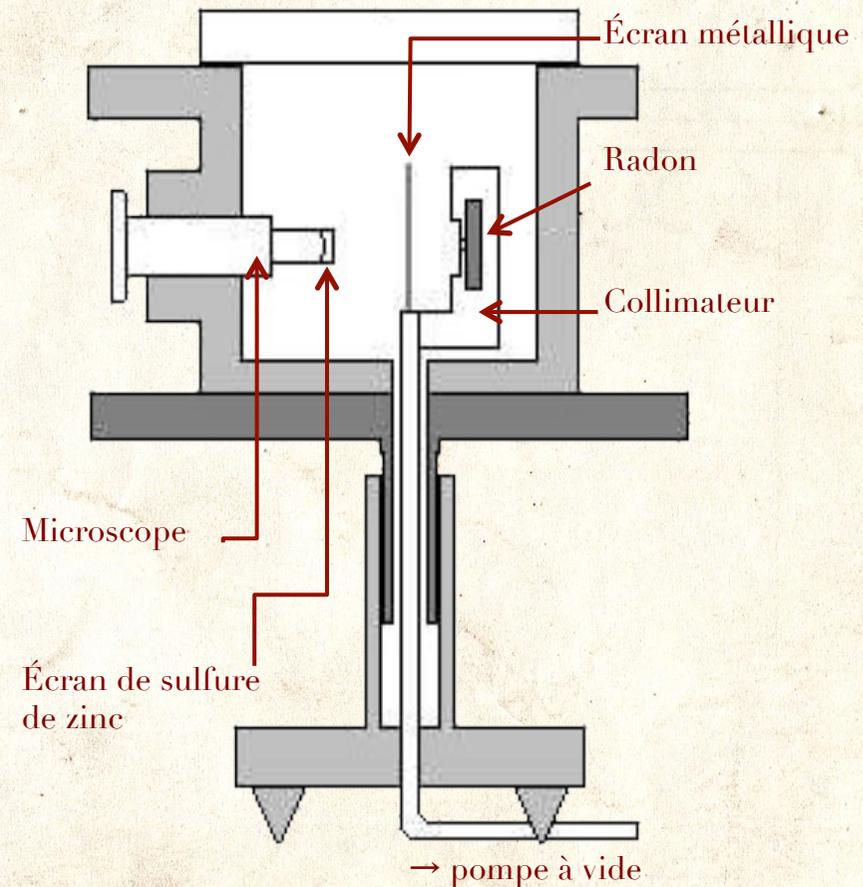
C'EST BIZARRE...



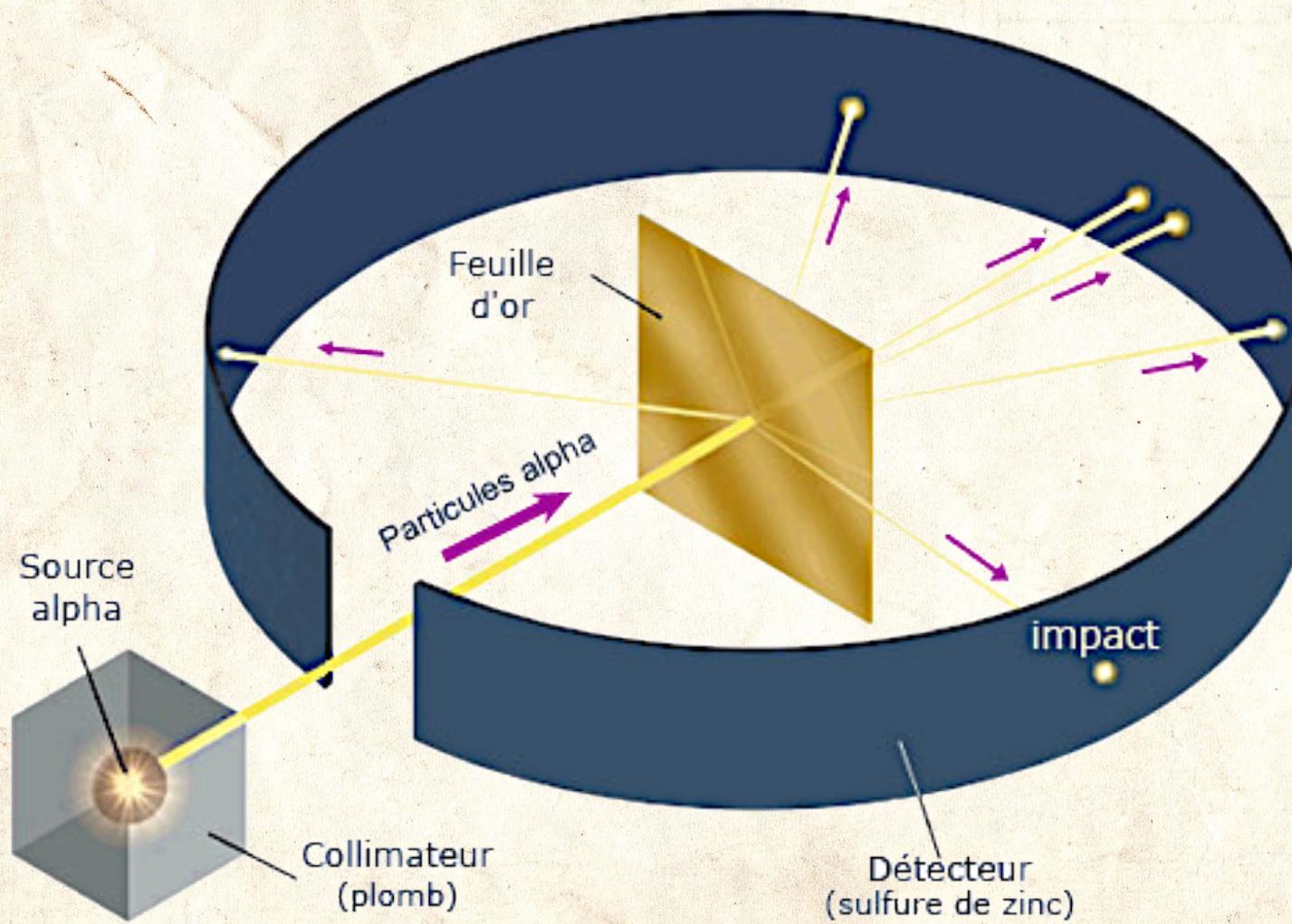
RUTHERFORD, GEIGER ET MARSDEN

- Rutherford avait observé la *dévi*ation de particules alpha dès 1906
 - les images photographiques des impacts des α déviés par un champ électromagnétique étaient *légèrement floues*
- 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

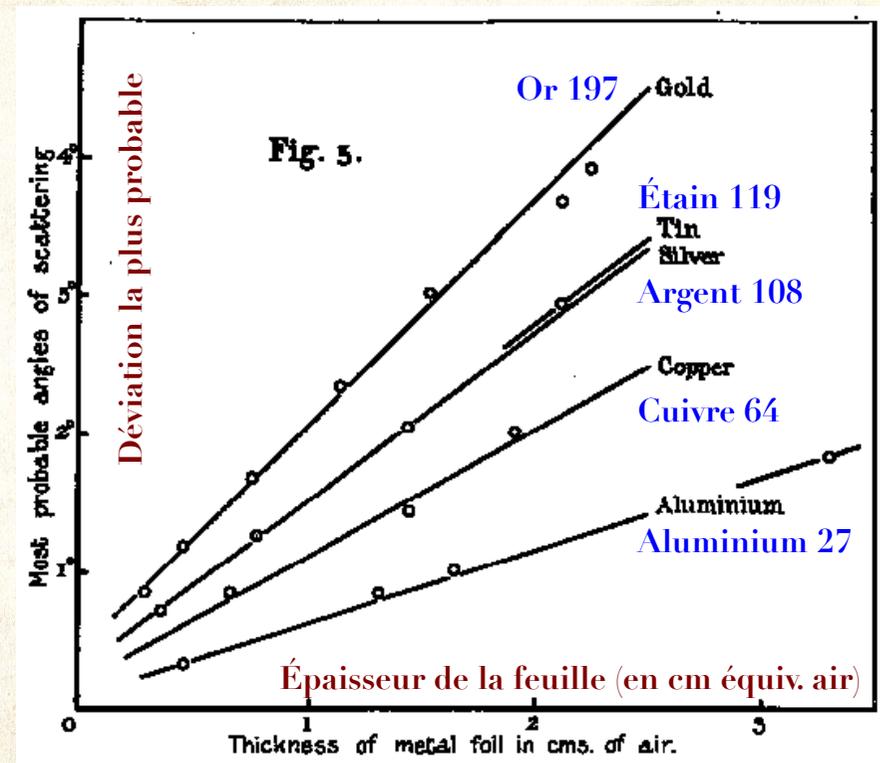
- Diffusion de particules α par des feuilles très minces [épaisseur $0,1 \mu\text{m}$ à $1 \mu\text{m}$] d'aluminium, de cuivre, d'argent, d'étain, d'or ou de platine
- \Rightarrow faible déviation (rarement plus de 1°) du jet de particules α

- 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 α -Particles by Matter* 1910

DÉVIATION D'UNE CHARGE PONCTUELLE PAR UNE AUTRE

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

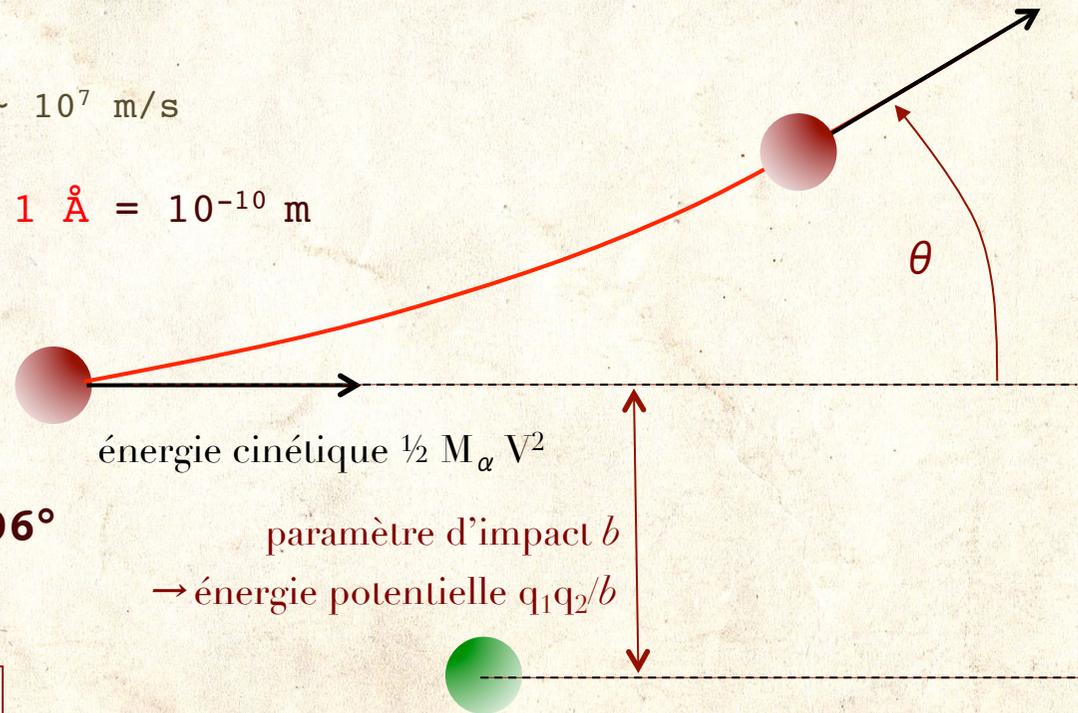
- charge élémentaire $e = 1,6 \times 10^{-9} \text{C}$
- ($q_1 = 2e$ et $q_2 = 79e$ pour l'or)
- unité de masse atomique $m = 1.7 \times 10^{-27} \text{kg}$
- $M_\alpha = 4m$
- vitesse des alphas $V \sim 10^7 \text{ m/s}$

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

○ \Rightarrow Déviation

$\theta \sim 10^{-3} \text{ radian} = 0.06^\circ$

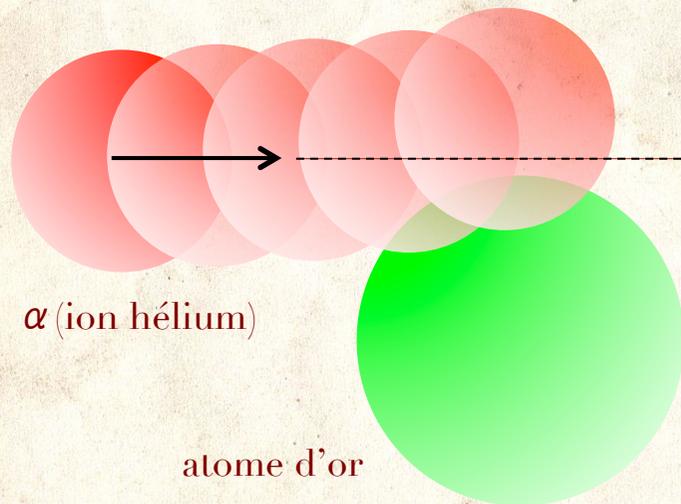
Probabilité $P(\theta) \propto 1/\theta^4$



DIFFUSION D'UN ALPHA PAR UN ATOME DE THOMSON (1)

- « gelée » positive de rayon $\sim 1 \text{ \AA}$

- Passage près de la surface



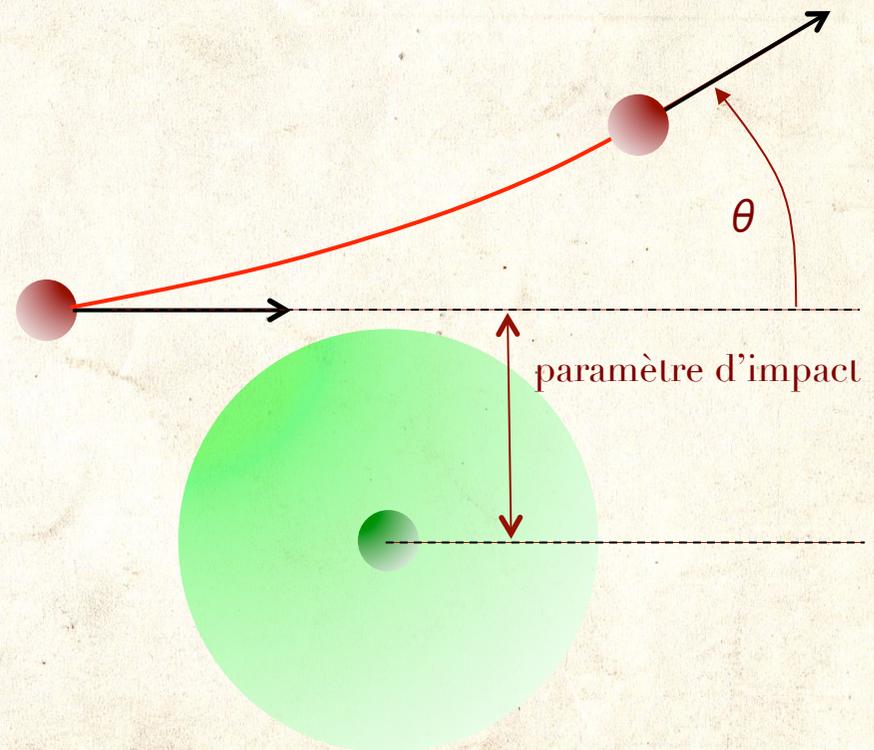
- Tout se passe comme si les charges étaient ponctuelles

- charge $2e$ pour l'alpha

- charge Ze pour l'atome-cible

- Paramètre d'impact $r \sim 1 \text{ \AA}$

- \Rightarrow déviation $\theta \sim 10^{-3} \text{ rd}$



DIFFUSION D'UN ALPHA PAR UN ATOME DE THOMSON (2)

○ **Passage près du centre**

- La particule alpha n'est sensible qu'à la charge qui se trouve à *l'intérieur*, entre elle et le centre de la « gelée »

○ \Rightarrow charge effective $Ze(r/R)^3$

○ **Conséquences**

- cette charge est beaucoup plus faible que Ze
- elle se comporte encore comme si elle était ponctuelle

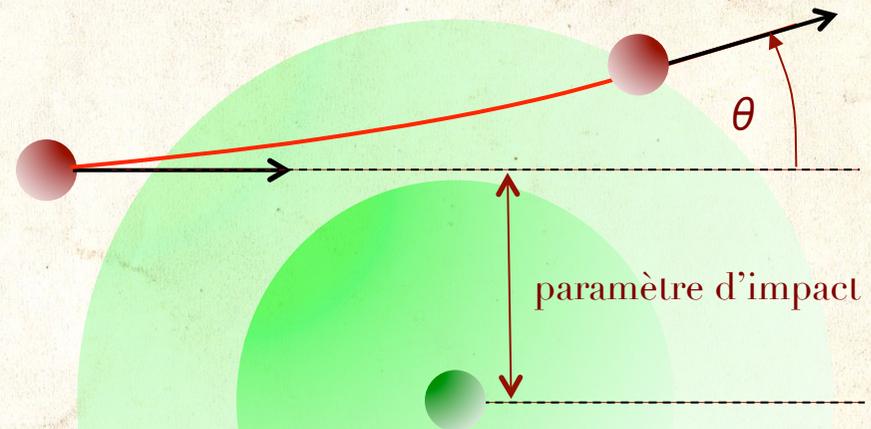
$$\theta \cong \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{b} \frac{2}{M_\alpha V^2}$$

○ Paramètre d'impact $r \sim 0,1 \text{ \AA}$

○ charge $\div 1000$

○ distance $\div 10$

○ \Rightarrow déviation $\theta \div 100 \Rightarrow 10^{-5} \text{ rd}$



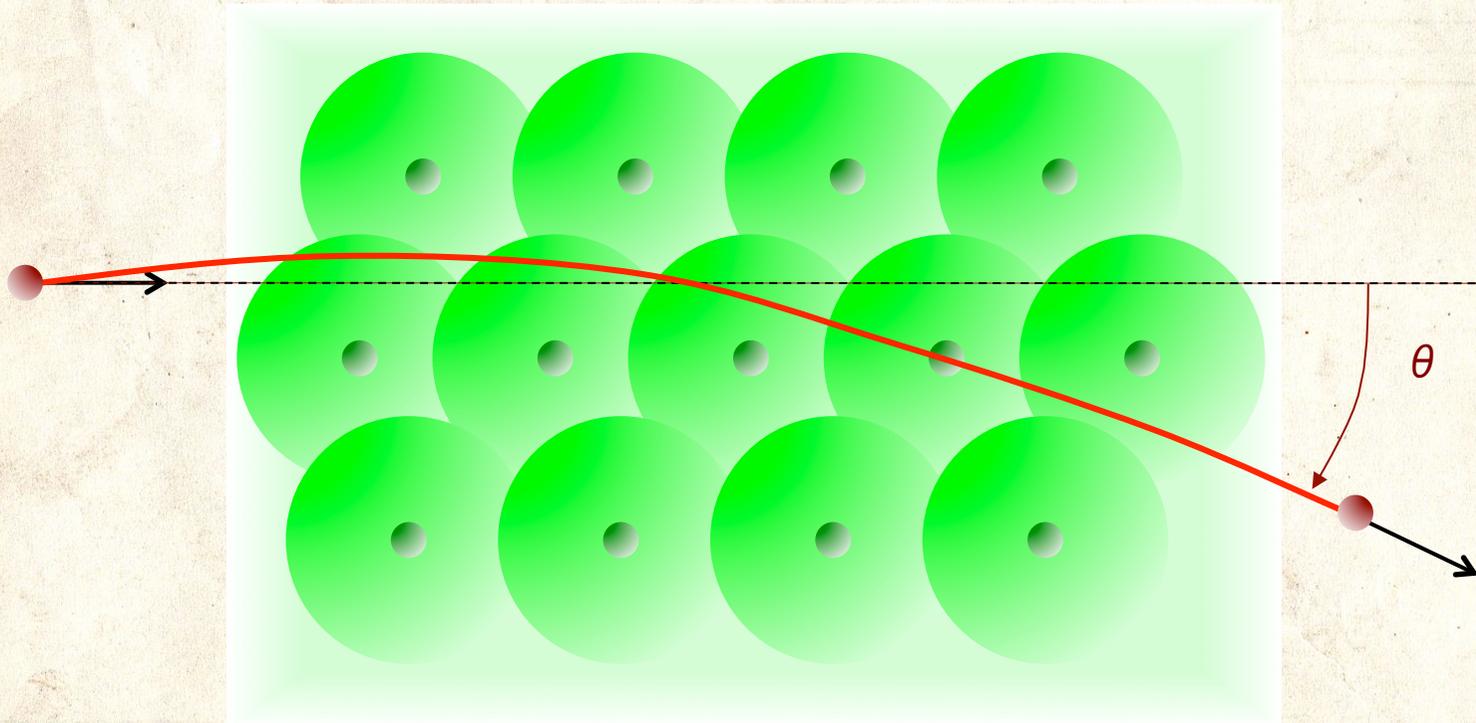
○ Bien sûr, rien n'indique que la densité de la « gelée » soit constante!

DIFFUSION PAR UNE FEUILLE D'OR

○ Diffusion successive par plusieurs atomes

○ Déviation $\theta \sim \sqrt{(1000)} \times 1/10^\circ$

○ Soit quelques degrés au plus



○ Épaisseur de la feuille d'or de $0.2 \mu\text{m} \rightarrow \sim 1000$ atomes traversés

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°
- 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° ou plus
 - \Rightarrow la concentration de charge est une cible 10 000 fois plus petite que l'atome

L'INTERPRÉTATION DE RUTHERFORD



○ **Déviation unique par une charge ponctuelle**

○ L'angle de déviation θ est inversement proportionnel au paramètre d'impact b

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

○ $b \sim 1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} \rightarrow$ 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

1. est concentrée
2. dans un rayon inférieur à 10^{-14} m [1/10 000 du rayon atomique]

○ \Rightarrow NOYAU !

Theory of structure of atom

Suppose atom consist of + charge in center & - charge as electron distributed throughout sphere of radius R .

Force at P on electron = $N e^2 \left\{ \frac{1}{r^2} - \frac{1}{R^2} \frac{r}{R} \right\}$

= $N e^2 \left\{ \frac{1}{r^2} - \frac{r}{R^3} \right\} = \#$

Suppose charged particle e comes in from left so that deflection is small but r distance from center is a .

Deflection force is direct towards P

= $N e^2 \left\{ \frac{1}{r^2} - \frac{r}{R^3} \right\}$ and

and r is direct towards Q = $dd = \frac{N e^2}{m} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{r}{R^3} \right) \frac{a}{r}$

Along u required impulse $M \frac{dv}{dt}$ along r direct

$u = \int dd \, di = N e^2 / a \cdot \frac{ds}{r^2}$

= $\frac{N e^2}{m v} \int \left(\frac{1}{r^2} - \frac{r}{R^3} \right) \frac{a}{r} \frac{r \, dr}{r^2}$

= $\frac{2 N e^2 a}{m v} \int \frac{dr}{r^3} - \frac{a^2}{R^3} \int \frac{dr}{r}$ and $u = \frac{2 N e^2 a}{m v} \left[\frac{1}{2 r^2} - \frac{1}{R^3} \ln r \right]_{r_1}^{r_2}$

UN INTÉRÊT POLI

○ 2^o Conférence Solvay 1913

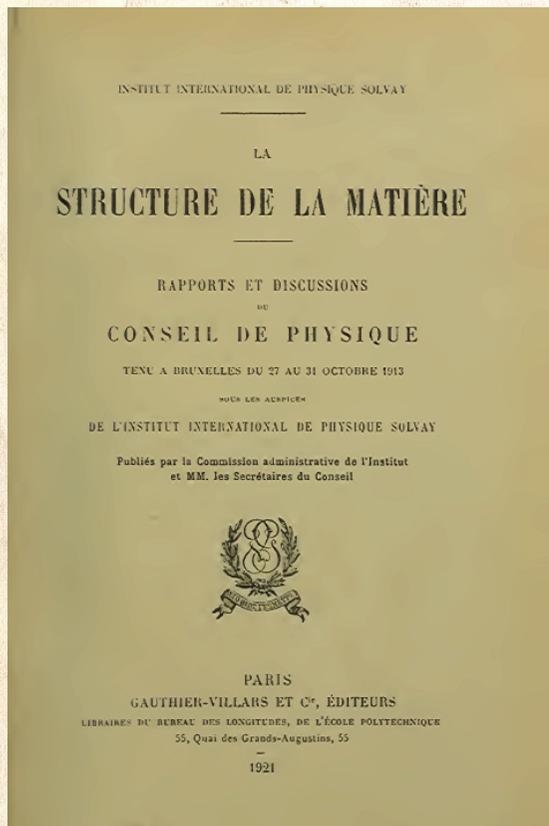


TABLE DES MATIÈRES.

	Pages.
Notice sur l'Institut international de Physique Solvay.....	iii
Statuts de l'Institut.....	v
Deuxième Conseil de Physique.....	xiii
J.-J. THOMSON, La structure de l'atome.....	1
Discussion.....	41
M ^{me} CURIE, Sur la loi fondamentale des transformations radioactives.....	66
M. V. LAUE, Les phénomènes d'interférence des rayons de Röntgen, produits par le réseau tridimensionnel des cristaux.....	75
Discussion.....	101
W.-H. BRAGG, La réflexion des rayons X.....	101
Discussion.....	107
A. SOMMERFELD, Sur les photographies de la blende et le spectre du rayonnement.....	107
W. BARLOW et W.-J. POPE, La relation entre la constitution chimique et la structure cristalline.....	147
M. BILLOUIN, Quelques considérations sur la structure des cristaux et l'anisotropie des molécules. Dimorphisme du carbonate de calcium.....	185
Discussion.....	218
M. VOIGT, Sur la relation entre la pyroélectricité et la température.....	235
Discussion.....	240
E. GUNDELSEN, Théorie moléculaire des corps solides.....	243
Discussion.....	281
R.-W. WOOD, Rayonnement de résonance et spectres de résonance.....	303

J.-J. THOMSON, La structure de l'atome.
Discussion.....

Les résultats de Rutherford sont à peine évoqués en passant

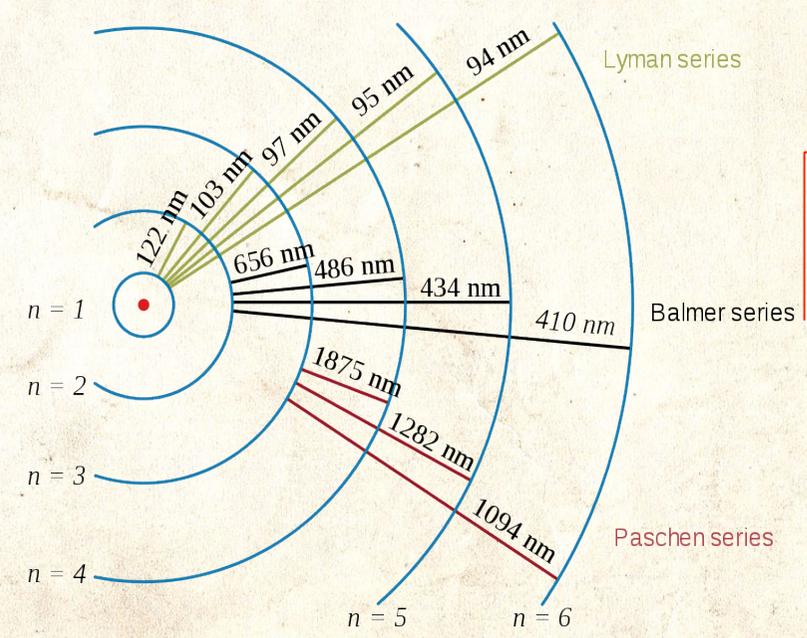
LA CONCLUSION DE THOMSON SUR RUTHERFORD

Cela me paraît indiquer que les grands changements, qui de temps en temps se produisent brusquement dans la direction du mouvement des particules α , ne sont pas produits par des forces dues à des charges électriques, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas produits par des forces qui agiraient aussi bien sur un corpuscule chargé que sur une particule α chargée. À mon avis, ils doivent plutôt être attribués à des forces spéciales qui entrent en jeu lorsque deux particules α se rapprochent l'une de l'autre à une distance inférieure à une certaine limite. Je pense qu'en réalité, lorsque deux particules α s'entre-choquent à l'intérieur d'un atome, les forces qui s'exercent entre elles ne sont pas uniquement celles qui seraient exercées entre les charges des particules en vertu des lois ordinaires de l'électrostatique. Outre ces forces-là, il y en a d'autres qui se font sentir et ce sont elles qui produisent les irrégularités caractéristiques dans les trajectoires des particules α .

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) dans le modèle de Rutherford
- *Mais à condition que*
 - l'électron ne suive **que** certaines orbites ($L=n\hbar/2\pi$)
 - **ne rayonne pas** sur ces orbites
 - émette en changeant d'orbite un photon de fréquence
$$\nu = (E_1 - E_2) / h$$
- et son modèle est un échec pour tous les autres atomes



À SUIVRE !



Mais c'est tout pour aujourd'hui!