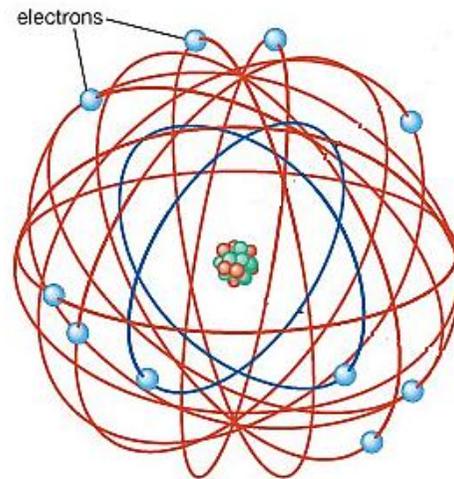


PHYSIQUE SUBATOMIQUE

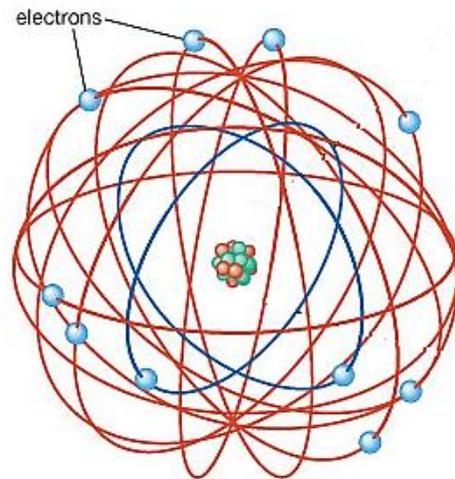
SMP S5



Plan du cours

- I. Généralités**
 - 1) Découverte du noyau
 - 2) Diffusion de Rutherford
- II. Le noyau atomique**
- III. Stabilité nucléaire et bilan énergétique**
- IV. Décroissance radioactive**
- V. Cinématique des réactions Nucléaires**
- VI. Interaction rayonnement matière**
- VII. Relativité restreinte**

PHYSIQUE SUBATOMIQUE GÉNÉRALITÉS



Découverte du noyau

Historique

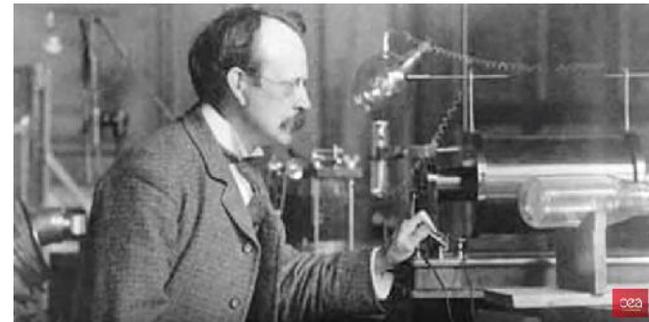
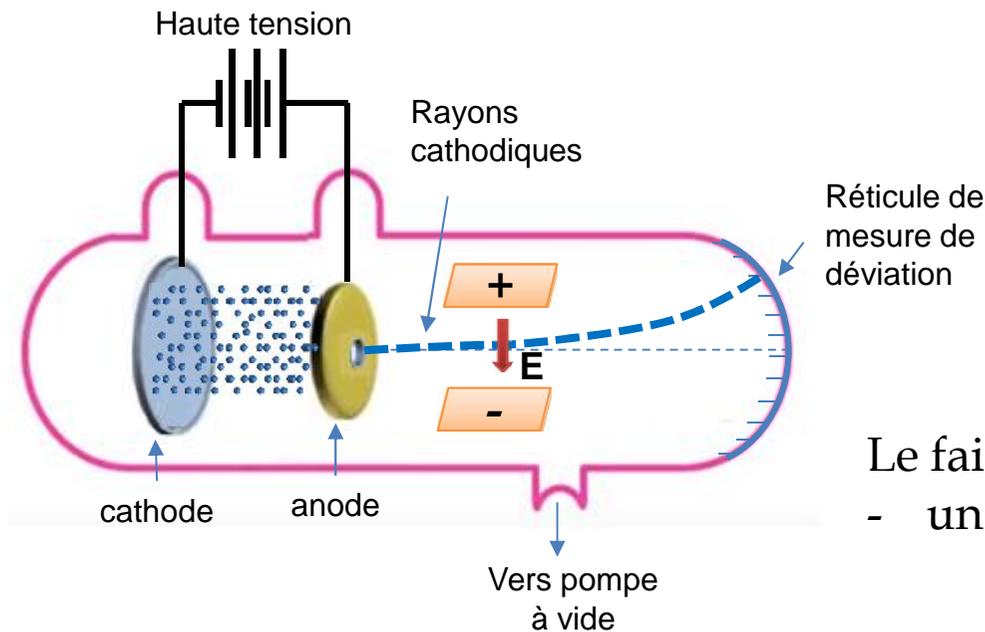
En 1869, Mendeleïev publie un tableau périodique constitué des 63 éléments connus. Il les inscrit dans l'ordre de leur **masse atomique**.

			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 = 59	Co = 59	Pd = 106,6	Os = 199
			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200
H = 1			Zn = 65,2	Cd = 112	
	Be = 9,4	Mg = 24	? = 68	Ur = 116	Au = 197?
	B = 11	Al = 27,4	? = 70	Sn = 118	
	C = 12	Si = 28	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?
	N = 14	P = 31	Se = 79,4	Te = 128?	
	O = 16	S = 32	Br = 80	J = 127	
	F = 19	Cl = 35,5	Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204
	Li = 7	K = 39	Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207
	Na = 23	Ca = 40	? = 45	Ce = 92	
		? = 45	?Er = 56	La = 94	
		?Er = 56	?Yt = 60	Di = 95	
		?Yt = 60	?In = 75,6	Th = 118?	
		?In = 75,6			

Pour un élément donné, la masse atomique est proche d'un entier A appelé **nombre de masse**.

Découverte de l'électron

Au 19^{ème} siècle les physiciens s'intéressent énormément à la décharge électrique dans les gaz raréfiés en utilisant un tube à vide.



Le faisceau est influencé par
- un champ électrique

Le faisceau est constitué de particules de matières **chargées négatives**

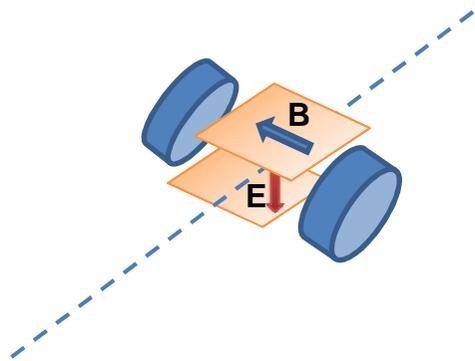
Découverte de l'électron

Nature des rayons cathodiques

Le faisceau est constitué de **particules de matières chargées négatives** de vitesse très inférieur à celle de la lumière

Le faisceau est influencé par

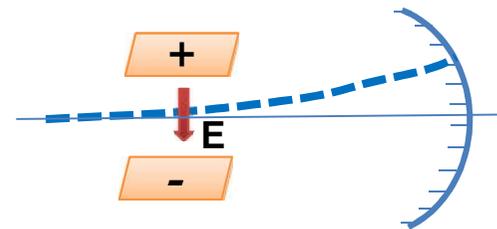
- un champ électrique
- un champ magnétique



$$qE = qvB \Rightarrow v = E / B$$

Connaissant

- la déviation du faisceau
- la vitesse des particules
- le champ E



On mesure le rapport $\frac{q}{m} = -1.76 \times 10^8 \text{ C / g}$

Découverte de l'électron

Nature des rayons cathodiques

En changeant le métal de la cathode, et le gaz du tube, le rapport q/m reste inchangé. On en déduit que le faisceau cathodique est constitué de **particules fondamentales de la matière et de charges négatives appelées corpuscules**

$$\frac{e}{m} = -1.76 \times 10^8 \text{ C / g}$$



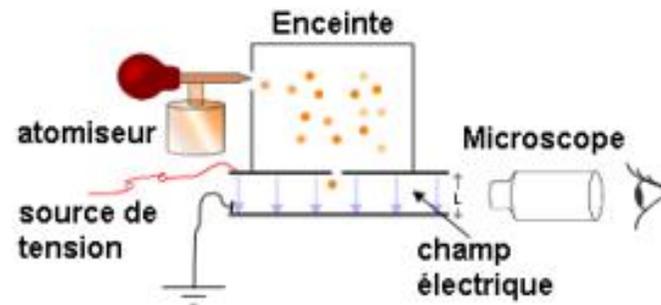
R. Millikan

Charge

1909, R. Millikan mesure la charge d'un électron en étudiant le mouvement de gouttelettes d'huile électrisées entre les deux électrodes (horizontales) d'un condensateur plan chargé (TP S6). La charge mesurée d'un électron est :

$$e = -1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$m_e = 9.1 \times 10^{-28} \text{ g}$$



Résumé: Découverte de l'électron

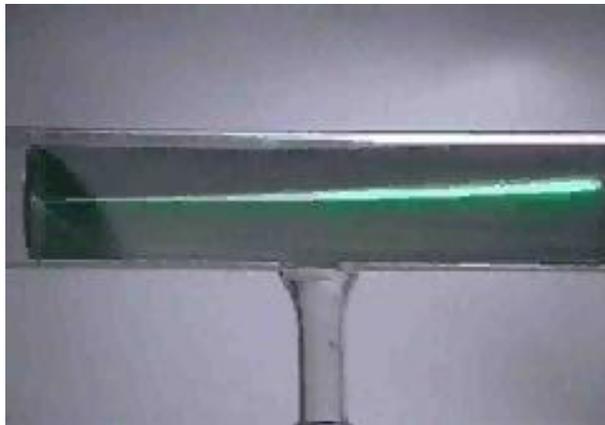


J.J.Thomson

Le faisceau voyage en ligne droite.
 Le faisceau est influencé par un aimant ou champ électrique.
 Le faisceau est constitué de particules de matières chargées négatives.

1897 J. J. Thomson montre que le faisceau ne dépend:

- ni du tube cathodique
- ni de la vitesse des particules,
- ni du gaz placé dans le tube,
- ni de la nature de la cathode



Il mesure le rapport charge/masse

$$\frac{e}{m} = -1.76 \times 10^8 \text{ C / g}$$

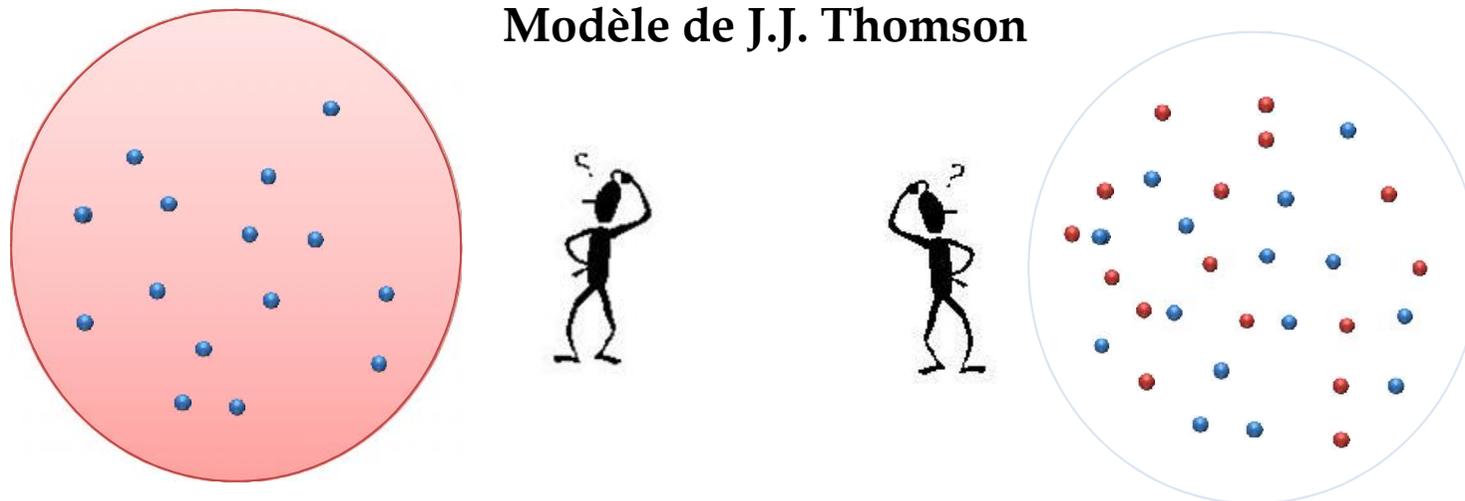
1897 J. J. Thomson

Découverte de l'électron constituant des «rayons cathodiques»

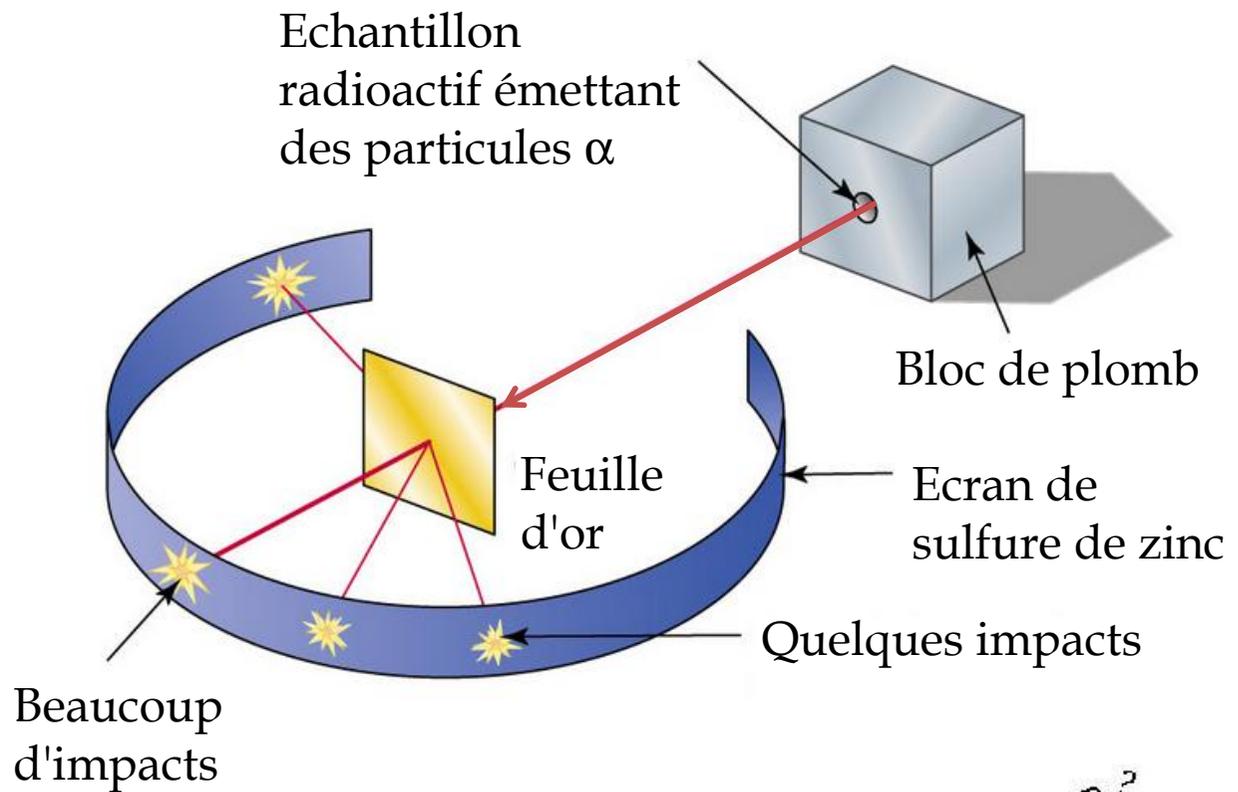
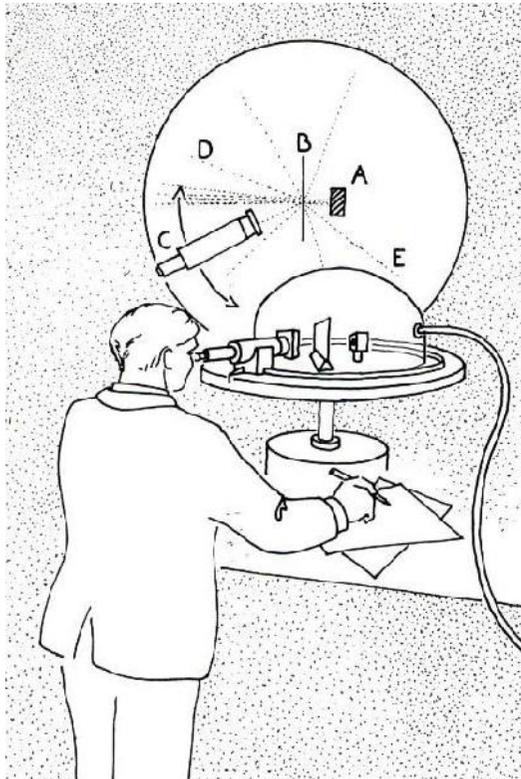
L'atome de Thomson

- Pour assurer la neutralité électrique de l'atome, J.J. Thomson imagine l'atome comme une sphère uniformément chargée positive, dans laquelle les électrons sont répartis.

On pouvait imaginer plusieurs modèles pour la répartition de cette charge positive à l'intérieur de l'atome.



Expérience de Marsden et Geiger



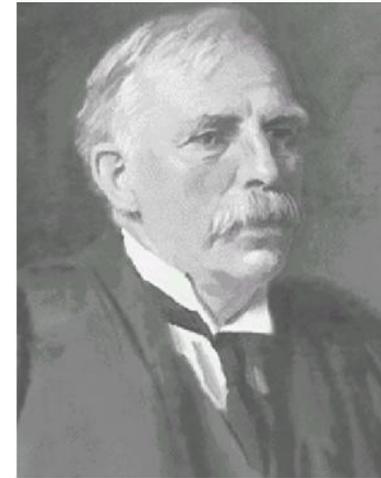
Marsden et Geiger observent que certaines particules alpha rebondissent en arrière comme sur un obstacle.



Diffusion de Rutherford

Hypothèses de travail

En analysant les données de Geiger et Marsden sur la diffusion des particules α par une feuille d'or, Rutherford explique ces données en formulant les hypothèses suivantes.



- La cible contient un noyau de charge Z_2e ,
- l'interaction est coulombienne entre le projectile (Z_1e) et la cible (Z_2e),
- la cible est beaucoup plus lourde que la particule alpha; le référentiel du centre de masse est identique au référentiel du laboratoire,
- Analyser en utilisant la dynamique classique,
- la diffusion est élastique,
- le projectile ne se diffuse qu'une fois lorsqu'il transite l'épaisseur du matériau cible.

Modèle de Rutherford - Etude des trajectoires

Force coulombienne F qui s'exerce sur la particule incidente de charge Z_1e de la part de la cible de charge Z_2e est

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \quad r \text{ est la distance entre les deux charges}$$

la particule incidente est soumise au potentiel $V_c(r) = k \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r}$

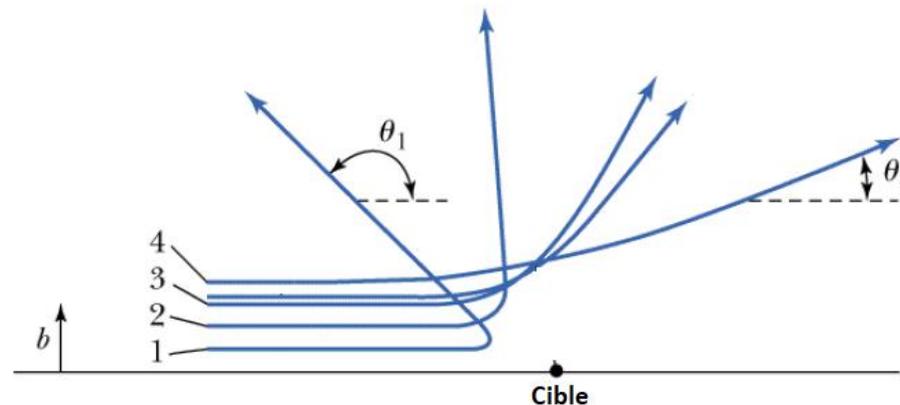
La cible est lourde (ne recule pas) \Rightarrow conservation de l'énergie totale avant et après interaction

$$(E_c + E_p)_{\text{avant}} = (E_c + E_p)_{\text{après}} \xrightarrow{E_p(\infty)=0} (E_c)_{\text{avant}} = (E_c)_{\text{après}}$$

Diffusion élastique :

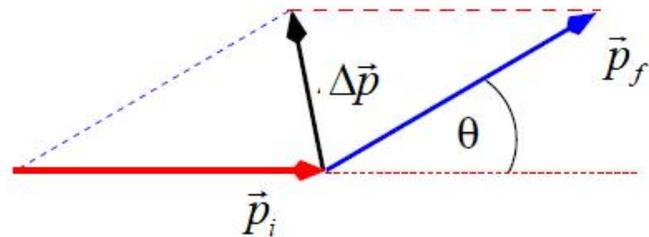
$$\frac{1}{2} m_1 v_i^2 = \frac{1}{2} m_1 v_f^2 \Rightarrow |\vec{p}_i| = |\vec{p}_f|$$

Quand b (*paramètre d'impact*) augmente, l'angle de diffusion diminue



Paramètre d'impact et l'angle de diffusion

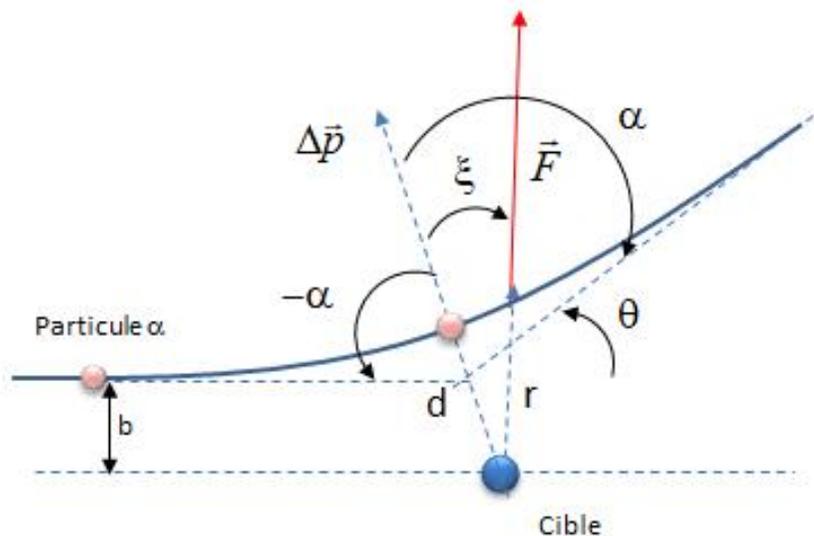
Lors de la diffusion, la particule incidente a une impulsion initiale \vec{p}_i . Elle subit l'interaction coulombienne et son impulsion devient \vec{p}_f .



l'impulsion entre l'état avant interaction et celui après interaction a varié d'une quantité.

$$\Delta \vec{p} = \vec{p}_f - \vec{p}_i$$

Comme la diffusion est élastique $\Rightarrow |\vec{p}_i| = |\vec{p}_f| \Rightarrow |\Delta \vec{p}| = 2 p_1 \sin(\theta / 2)$



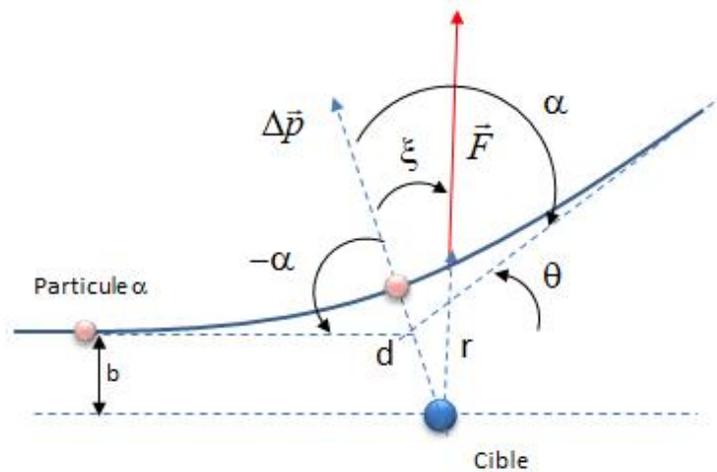
Le changement $\Delta \vec{p}$ est due à la force \vec{F}

$$\Delta \vec{p} = \int_{-\infty}^{+\infty} \vec{F} dt$$

la projection de cette relation sur l'axe $\Delta \vec{p}$

$$|\Delta \vec{p}| = \int_{-\infty}^{+\infty} F \cos \langle dt$$

Paramètre d'impact et l'angle de diffusion



$$|\Delta \vec{p}| = \int_{-\infty}^{+\infty} F \cos \xi dt$$

l'angle ξ varie également au cours du temps entre $-\alpha$ à $+\alpha$

$$2r = f - " \quad \dot{\xi} dt = d\xi$$

$$|\Delta \vec{p}| = \frac{e^2}{4f v_0} Z_1 Z_2 \int_{-r}^{+r} \frac{\cos \xi}{r^2 \dot{\xi}} d\xi$$

De la conservation du moment angulaire avant et pendant l'interaction

$$|\vec{\ell}_{avant}| = m_1 b v_0 \quad |\vec{\ell}_{pendant}| = m_1 r^2 \dot{\xi} \quad \Rightarrow \quad \dot{\xi} = \frac{r^2}{b v_0}$$

$$|\Delta \vec{p}| = \frac{e^2}{4f v_0} \frac{Z_1 Z_2}{b v_0} \int_{-r}^{+r} \cos \xi d\xi$$

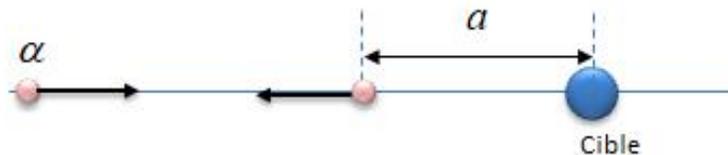
$$|\Delta \vec{p}| = \frac{e^2}{4f v_0} \frac{Z_1 Z_2}{b v_0} 2 \cos(\alpha / 2)$$

Paramètre d'impact et l'angle de diffusion

$$\left. \begin{aligned} |\Delta\vec{p}| &= 2 \frac{e^2}{4f v_0} \frac{Z_1 Z_2}{b v_0} \cos(\theta / 2) \\ |\Delta\vec{p}| &= 2 p_1 \sin(\theta / 2) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \boxed{\cotg(\theta / 2) = \frac{2b}{a}}$$

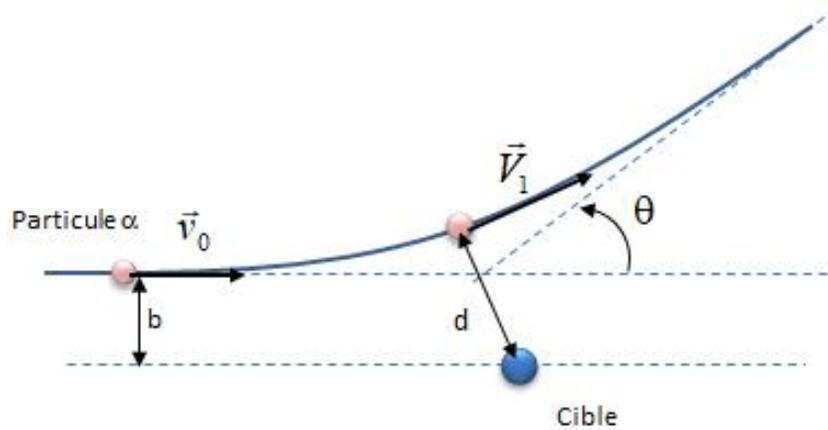
$$a = \left(\frac{1}{4f v_0} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{m_1 v_0^2 / 2} \right)$$

La distance d'approche minimale ou *diamètre de collision* "a" est obtenue quand toute l'énergie cinétique initiale est convertie en énergie potentielle: point où la particule α inverserait la direction, c'est-à-dire que l'angle de diffusion θ égal π.



$$T_{avant} = \left(\frac{1}{4f v_0} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{a} \right) = E_p(a)$$

Paramètre d'impact et distance minimum d'approche



De la conservation de l'énergie totale

$$T_{avant} + E_{pot}^{avant} = T_{pendant} + E_{pot}^{pendant}$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_0^2 = \frac{1}{2} m_1 V_1^2 + \frac{1}{4f v_0} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{d}$$

De la conservation du moment angulaire

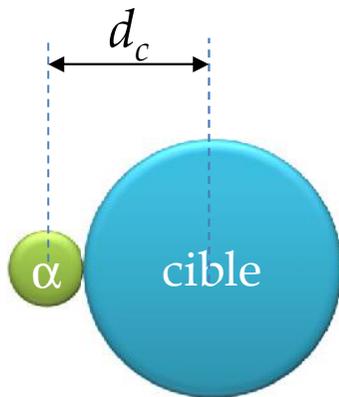
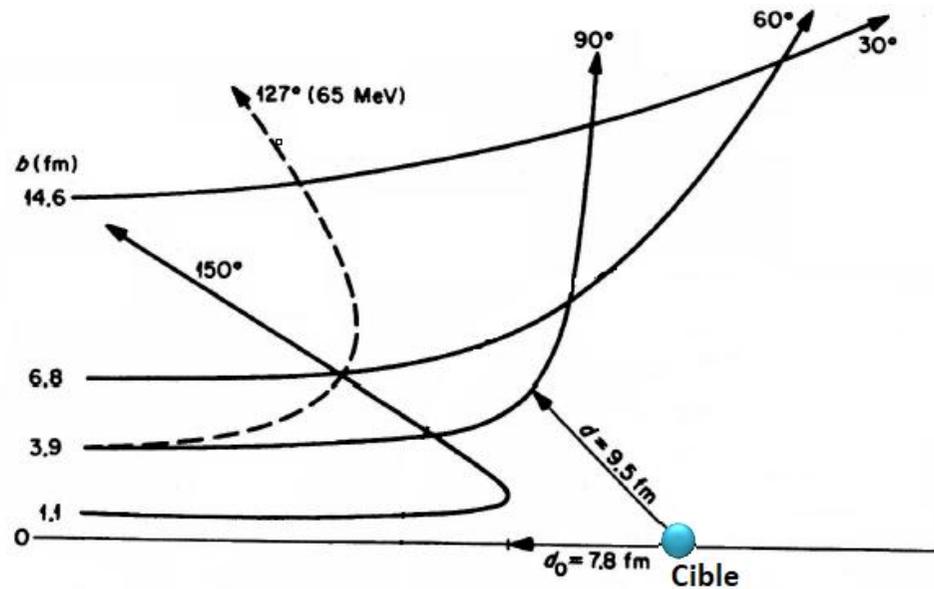
$$|\vec{\ell}_{avant}| = m_1 b v_0 \quad |\vec{\ell}_{pendant}| = m_1 d V_1 \Rightarrow V_1 = \frac{b}{d} v_0 \quad \Rightarrow \quad d^2 - ad - b^2 = 0$$

$$d = \frac{a}{2} + \sqrt{\frac{a^2}{4} + b^2}$$

$$b = d \sqrt{1 - \frac{a}{d}}$$

d : distance minimum d'approche
b : paramètre d'impact
a : diamètre de collision

Résumé: Diffusion de Rutherford



d_c : distance critique

$$d_c = R_{cible} + R_{projectile}$$

Le potentiel n'est plus coulombien $d \leq d_c$

a : diamètre de collision

θ : angle de diffusion

b : paramètre d'impact

d : distance minimum d'approche

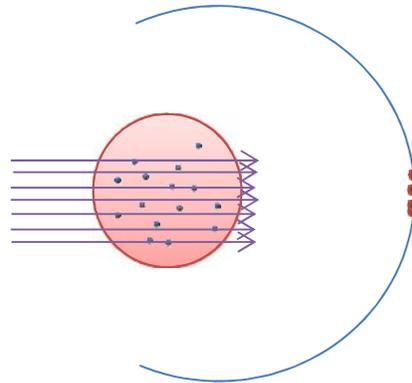
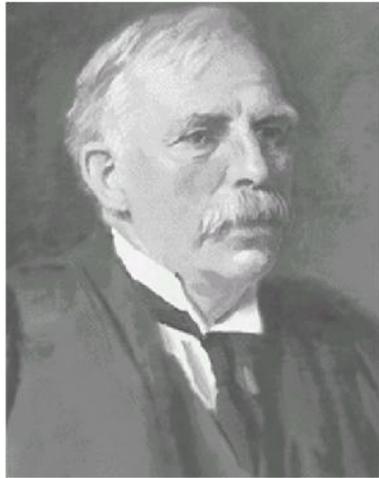
$$a = \left(\frac{1}{4f v_0} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{m_1 v_0^2 / 2} \right)$$

$$\cotg(\theta / 2) = \frac{2b}{a}$$

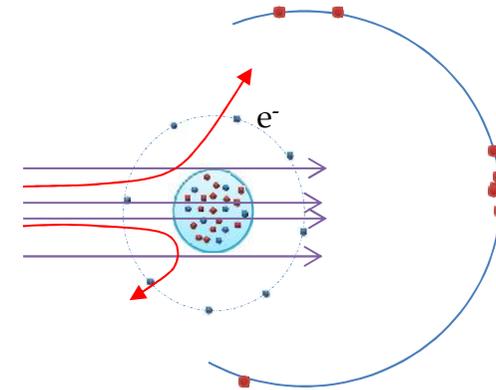
$$b = d \sqrt{1 - \frac{a}{d}}$$

$$d = \frac{a}{2} + \sqrt{\frac{a^2}{4} + b^2}$$

Modèle de Rutherford



Modèle de J.J. Thomson



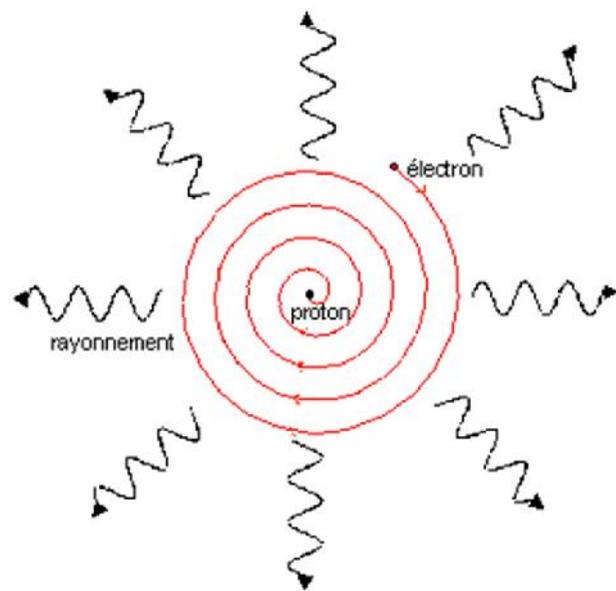
Modèle de Rutherford

Rutherford contredit l'hypothèse de J.J. Thomson et propose un modèle atomique planétaire :

- un noyau de charge positive (+Ze) concentrée dans une région dont les dimensions sont de l'ordre de quelques fermi ($1 \text{ fm} = 10^{-13} \text{ cm}$) et
- de Z électrons autour; le volume d'un atome est essentiellement occupé par le vide.
- l'essentiel de sa masse est concentré autour de ce noyau

Défauts du modèle de Rutherford

Les lois de l'électromagnétisme imposent que l'électron en mouvement doit perdre de l'énergie sous forme de rayonnement. A cause de cette perte d'énergie, il devrait rapidement s'écraser sur le noyau.



la diminution continue de r implique la variation continue de la fréquence de rayonnement et un spectre d'émission de l'atome continu alors qu'il est discontinu.



Modèle à rejeter

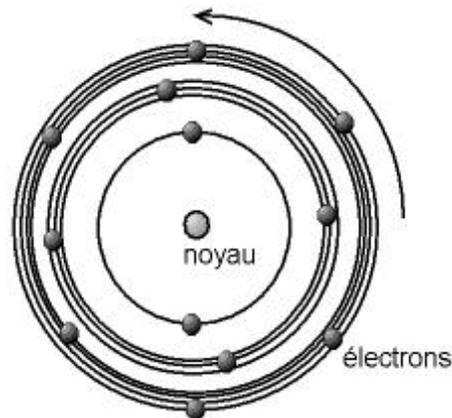
En s'inspirant du modèle de Rutherford, Niels Bohr a proposé en 1913 une théorie permettant de remédier aux défauts de Rutherford. Elle est fondée sur les trois postulats suivants:

Structure de l'atome - Bohr



- L'électron ne rayonne aucune énergie lorsqu'il se trouve sur une orbite \Rightarrow décrit une trajectoire circulaire (orbite) de rayon r voisin de l'Angström (10^{-8} cm), centrées sur le noyau.
- Il y a quantification du moment cinétique orbital L de l'électron par rapport au centre de l'orbite.

$$\vec{L} = \vec{r} \wedge \vec{p}$$



- L'électron ne rayonne ou n'absorbe de l'énergie que lors d'un changement d'orbite \Rightarrow Les électrons ont la possibilité de passer d'une couche à une autre, émettant ou en absorbant un quantum d'énergie, le photon

Structure de l'atome - Sommerfeld

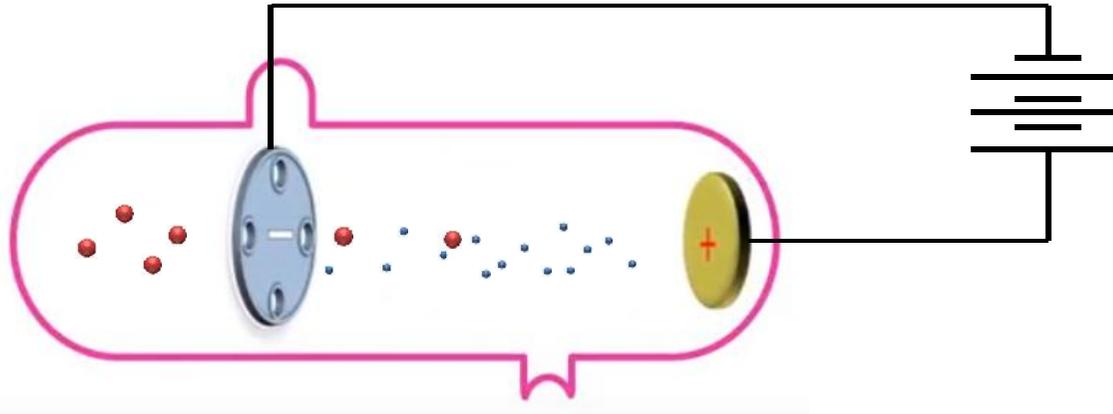


La théorie classique de Bohr utilise arbitrairement le concept de la quantification. Elle ne considère que des orbites circulaires, définies par un nombre quantique n .

Elle est incapable d'expliquer le dédoublement des raies spectrales observées lors de l'application d'un champ magnétique intense (effet Zeeman) ou d'un champ électrique intense (effet Stark) au tube émetteur contenant H

Sommerfeld a amélioré le modèle de Bohr en introduisant un nouveau nombre quantique ℓ (≥ 0) et l'énergie d'un électron sur une orbite de nombres quantiques $\{n, k\}$ devenait $E_n = E_0 / (n + \ell)^2$. Ceci conduit à des orbites elliptiques en plus des orbites circulaires, et a permis d'expliquer le dédoublement des raies spectrales et les spectres d'émission d'un certain nombre d'atomes légers.

Découverte du proton



$$\frac{e}{m_H} = 9.58 \times 10^4 \text{ C / g}$$

$$m_H = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\frac{m_H}{m_e} = 1835$$

En 1919 Goldstein, observa que en plus des rayons cathodiques, d'autres rayons qui passent à travers les trous de la cathode.

Il trouva que ces rayons

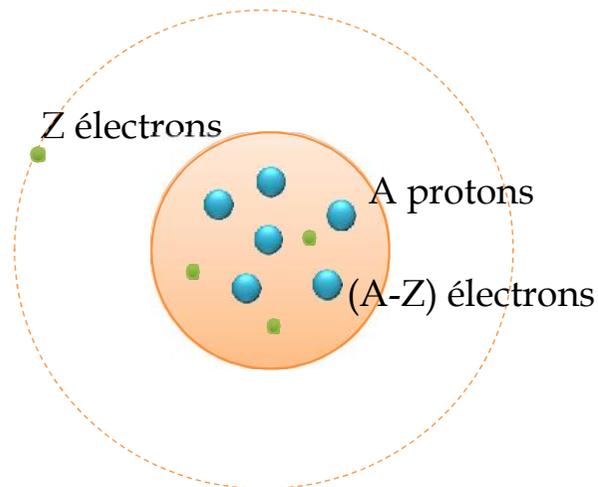
- Produisent une lueur lors de l'impact sur le tube
- La déflexion par un champ E ou B montre que ce sont des particules chargées positives
- La nature dépend du gaz dans le tube
- Leur masse est un multiple des rayons obtenus avec un gaz d'hydrogène
- Ils ne proviennent pas de la cathode. Ils sont produits par collision des électrons avec les molécules: $M + e^- \longrightarrow M^+ + e^-$
- **Proton** est le nom que Rutherford a donné au noyau de l'atome d'H

Modèle proton-électron

Ainsi, après la découverte du noyau, il était naturel de supposer que l'atome n'était composé que de protons et d'électrons.

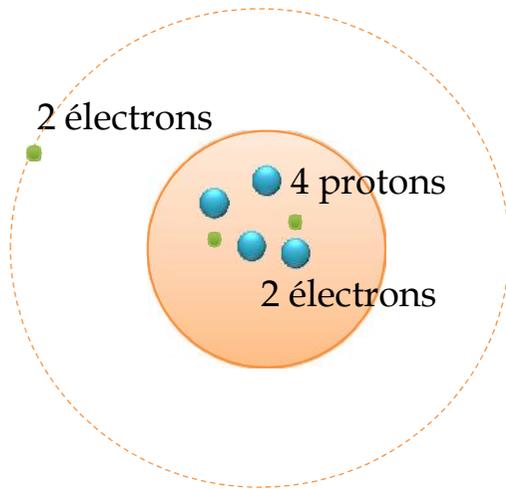
Grâce aux premières méthodes de mesure de masse (spectrographe de masse), on a constaté que la masse d'un atome était approximativement égale au produit de la masse du proton par un entier A .

Cette constatation a permis d'admettre que le noyau contient par hypothèse A protons et $(A-Z)$ électrons pour assurer la neutralité électrique de l'atome;



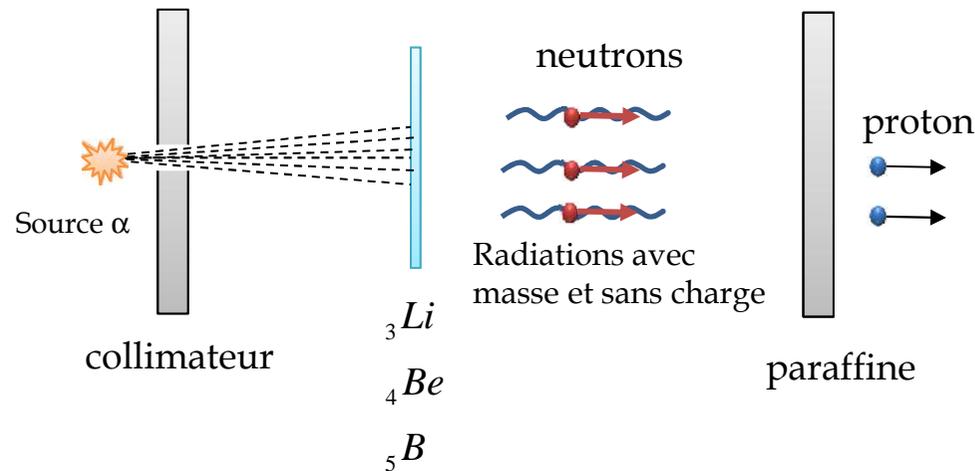
Ce modèle proton-électron a présenté un grand nombre de contradictions

Découverte du neutron - Chadwick



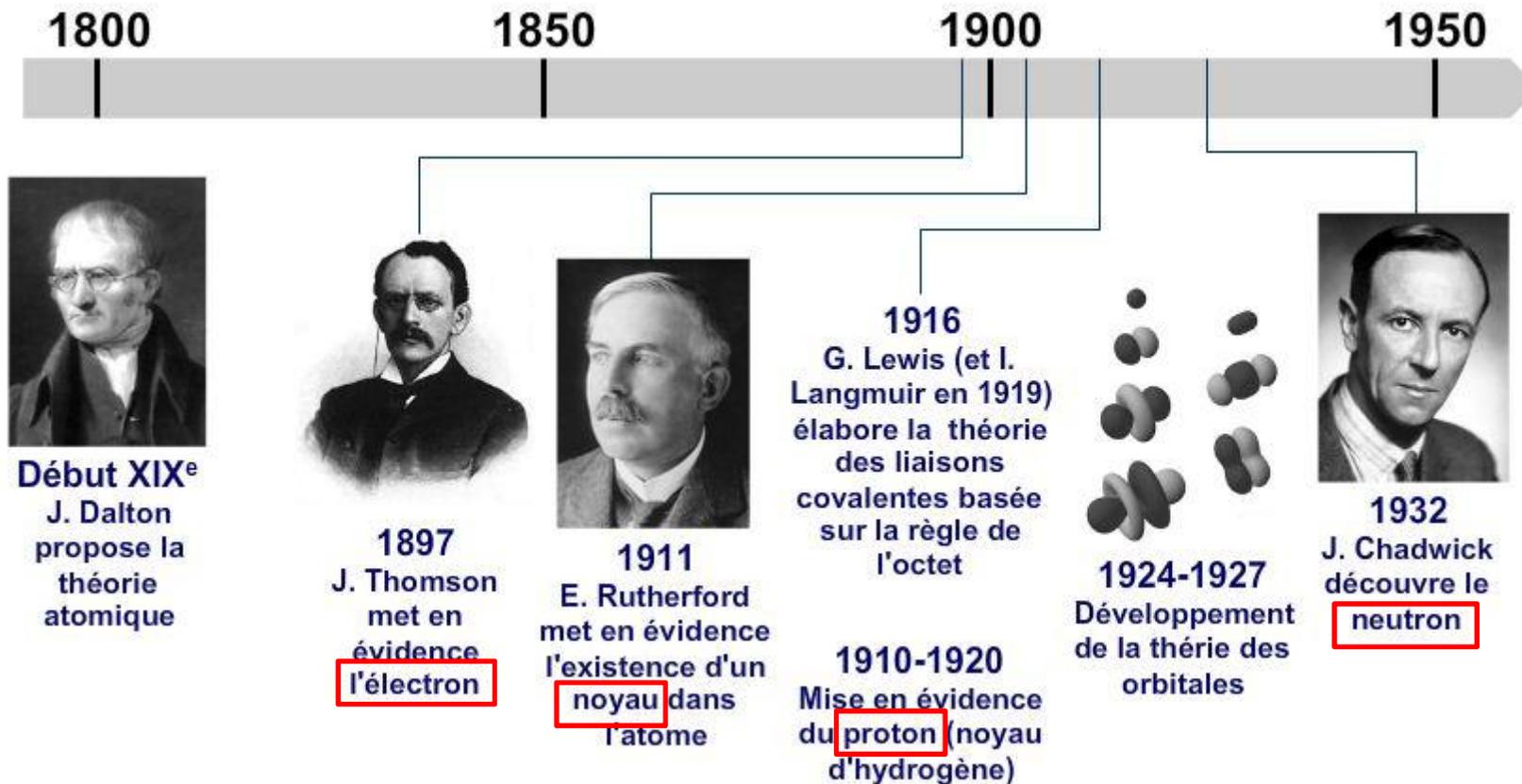
modèle proton-électron
Non valable

Chadwick suggéra que si l'hélium a deux protons et que sa masse vaut 4 fois celle d'un proton, donc il y a autre chose dans l'atome qui a une masse égale à 2 fois celle de H et qui est neutre.



Par une analyse du recul des noyaux bombardés par ce rayonnement, parvient à montrer que celui-ci est le fait d'une particule neutre, appelée **neutron**, dont la masse est approximativement égale à celle du proton.

Résumé



Nomenclature



On appelle **isotopes** les noyaux qui ont le *même nombre atomique Z*, mais des nombres de masses différents:



On appelle **isotones** les noyaux qui ont le *même nombre de neutrons N* mais des nombres de masses différents:



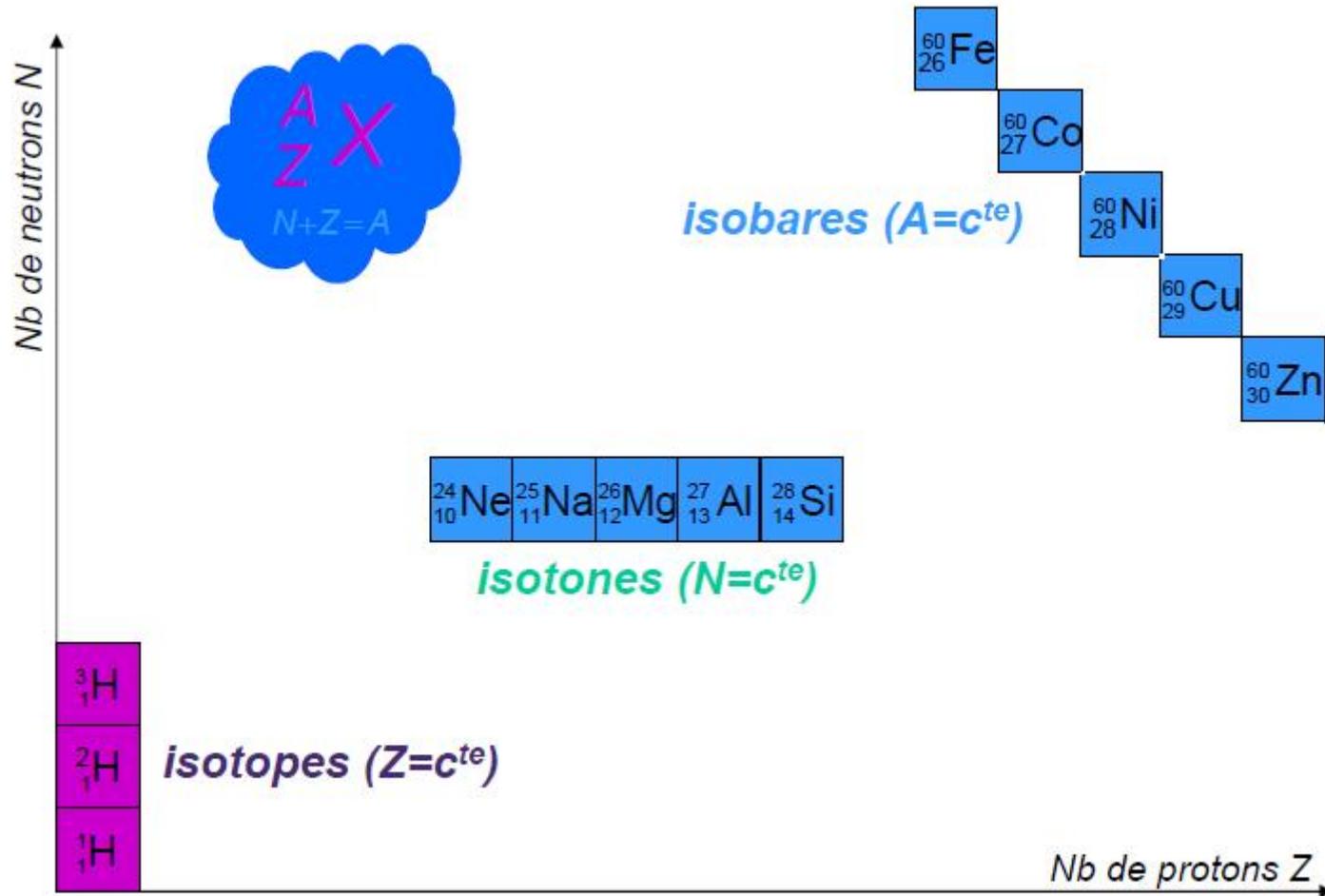
On appelle **isobares** les noyaux ayant le *même nombre de nucléons*, c'est à dire le même nombre de masse A et des nombres atomiques Z différents :



On appelle **noyaux miroirs** des noyaux isobariques (même A) et pour lesquels le nombre de protons de l'un est égal au nombre de neutrons de l'autre:



Nomenclature



FIN

