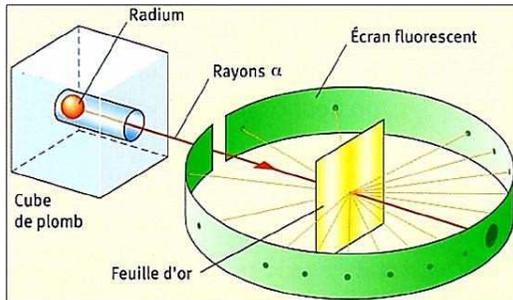


## Atome - Noyau atomique

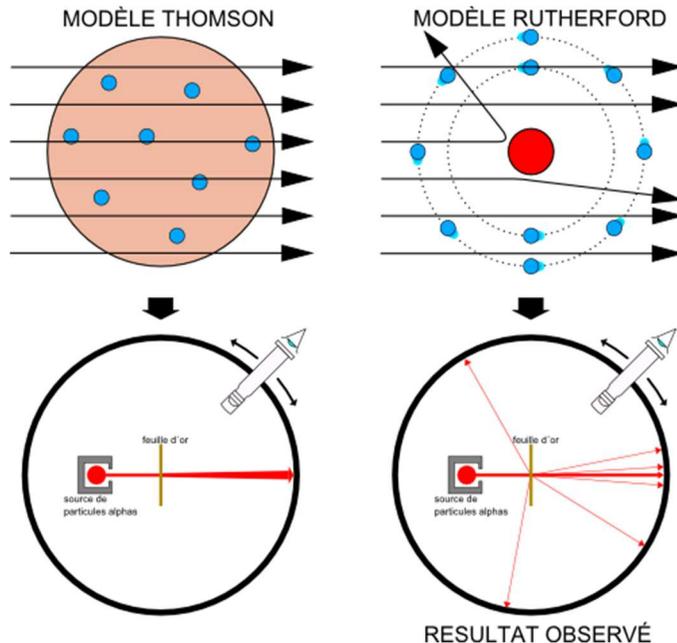
## Historique

La découverte par H. Becquerel de la radioactivité à l'époque du modèle de Thomson (cf. cours « Dipôles ») à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle (1896) est une étape décisive. En effet, E. Rutherford, ancien élève de J.J. Thomson, se lance dans ce nouveau domaine et identifie les rayonnements  $\alpha$  et  $\beta$ , en les distinguant selon leur pénétrabilité. Il montre que la radioactivité  $\alpha$  émet des particules : des noyaux d'Hélium.



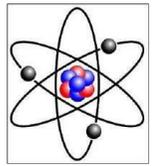
Pour étudier plus précisément le rayonnement  $\alpha$ , E. Rutherford propose en 1909 de bombarder une feuille d'or avec ces particules en plaçant un écran de détection tout autour de la feuille d'or. Le scintillement lumineux observé sur l'écran permet de visualiser la collision par les particules  $\alpha$ .

Au lieu de la répartition statistique gaussienne attendue avec la théorie du "plum-pudding", **l'expérience montre que la plupart des particules traversent la feuille d'or sans déviation**. E. Marsden et H. Geiger découvrent en affinant cette technique que des particules  $\alpha$  (1 sur 8000) sont déviées avec un angle supérieur à  $90^\circ$ .



[http://fr.wikipedia.org/wiki/Exp%C3%A9rience\\_de\\_Rutherford](http://fr.wikipedia.org/wiki/Exp%C3%A9rience_de_Rutherford)

Cette expérience met en évidence le **caractère lacunaire** de la matière et montre que les charges positives de l'atome sont fortement localisées dans l'espace. E. Rutherford propose alors un modèle en accord avec cette observation : le **modèle planétaire**.



Cependant ce modèle n'est pas en accord avec les lois de l'électromagnétisme. En effet, l'électron sur son orbite est radialement accéléré et devrait donc rayonner selon la théorie électromagnétique. Ceci impliquerait une perte de l'énergie totale de l'électron, qui s'écraserait alors sur le noyau. De plus, ce modèle n'explique absolument pas la série de Balmer du spectre de l'hydrogène.

N. Bohr propose alors, en s'inspirant des travaux de M. Planck, que le **moment cinétique de l'électron est un multiple entier de  $h$** . Ainsi l'électron ne peut rayonner car on lui impose une énergie sur une orbite donnée. Ce modèle, qui règle le problème de l'instabilité du modèle planétaire, permet également de retrouver la série de Balmer.

Par la suite, le modèle de Bohr sera justifié par la **mécanique quantique** dans le cas particulier des hydrogénoïdes. (Cf. rappels page suivante).

D'après <http://culturesciences.chimie.ens.fr/node/1230>

## Ordres de grandeurs

(S) = Savoir ; (R) = Retrouver (compétence exigible)

« Rayon » atome :  $10^{-10}$  m  $\xrightarrow{\frac{1}{10^5}}$  « Rayon » noyau :  $10^{-15}$  m. (S)

Masse noyau :  $Z \times 10^{-27}$  kg  $\xrightarrow{\frac{1}{2000}}$  Masse électron :  $10^{-30}$  kg. (S)

Champ dans l'atome d'hydrogène :  $E \approx 10^{11}$  Vm<sup>-1</sup> (champ capable d'ioniser H). (R)

Champ disruptif de l'air (ionisation de l'air : production d'étincelles) :  $E \approx 10^6$  Vm<sup>-1</sup>. (S)

Énergie de constitution du noyau (ordre de grandeur de l'interaction forte qui maintient les nucléons au sein du noyau) :  $E_{\text{noyau}} \approx \text{MeV}$ . (R)

*Comprendre* : la stabilité du noyau impose l'existence d'une interaction très intense à très courte portée (interaction forte) pour contrebalancer la répulsion électrostatique qui tend à provoquer l'éclatement du noyau.

Énergies mises en jeu dans les réactions chimiques :  $E_{\text{chimiques}} \approx \text{eV}$  (kJ pour une mole). (R)

Énergies mises en jeu dans les réactions nucléaires :  $E_{\text{nucléaires}} \approx \text{MeV}$ . (R)

## Exercices - Ordres de grandeur : expressions littérales et applications numériques \*

1. Champ dans l'atome H : retrouver son ordre de grandeur en l'assimilant au champ créé par le proton au niveau de l'électron situé à la distance définissant le « rayon » de l'atome.
2. Énergie de constitution du noyau : estimer cette énergie en l'assimilant à l'énergie potentielle d'un proton dans le noyau subissant le champ créé par un autre proton.
3. Énergies mises en jeu dans les réactions chimiques : estimer ces énergies en les assimilant à l'énergie potentielle d'un électron subissant le champ créé par un proton. Passage à l'échelle macroscopique via le nombre d'Avogadro.
4. Énergies mises en jeu dans les réactions nucléaires : cf. question 2.

## Énergie de constitution du noyau

On cherche à déterminer plus précisément l'ordre de grandeur de l'énergie de constitution du noyau en construisant le noyau par adjonction progressive de charges apportées de l'infini.

Méthode (résumé – calcul détaillé en exercice)

Un « opérateur » amène progressivement de l'infini des charges sans leur communiquer d'énergie cinétique (i.e. réversiblement) : la force exercée par l'opérateur compense exactement la force électrostatique.

On suppose le noyau constitué jusqu'au rayon  $R' < R$  (rayon final). Afin de faire passer le rayon de  $R'$  à  $R'+dR'$ , l'opérateur doit amener une charge  $dq$  subissant le potentiel créé par le noyau. Le travail pour amener  $dq$  de l'infini jusqu'au rayon  $R'$  permet d'accéder à l'énergie de constitution du noyau.

### Exercice - Énergie de constitution du noyau (Facultatif) \*\*

Le noyau constitué (dans son état final) est modélisé comme une sphère de rayon  $R$  de charge totale  $q$ . On note  $\rho$  sa densité volumique de charge supposée uniforme (intermédiaire de calcul utile).

- Justifier sans calculs que le volume  $d\tau$  occupé par la charge  $dq$  située entre  $R'$  et  $R'+dR'$  autour du noyau est  $d\tau = 4\pi R'^2 dR'$ .
- En déduire la charge  $dq$  à apporter de l'infini pour remplir ce volume en fonction de  $\rho$  et  $d\tau$ .
- Exprimer le potentiel créé par le noyau de rayon  $R'$  au point M situé à la distance  $r$ .
- En déduire le travail des forces électrostatiques  $\delta W_e$  pour amener la charge  $dq$  depuis l'infini jusqu'à la surface du noyau (distance  $R'$ ). Commenter le signe.
- En déduire le travail  $\delta W_{op}$  effectué par l'opérateur.
- L'énergie de constitution du noyau s'identifie au travail total effectué par l'opérateur pour constituer progressivement le noyau de  $R'=0$  à  $R$  en amenant les charges de l'infini (l'exprimer en fonction de  $q$  et  $R$ ).

### Nombres quantiques (électrons d'un atome) :

- ✓ principal  $n$  (niveau d'énergie),  $n \in \mathbb{N}^*$
- ✓ azimutal  $\ell$  (moment cinétique orbital :  $L^2 = \hbar^2 \ell(\ell+1)$ ),  $0 \leq \ell \leq n-1$
- ✓ magnétique  $m_\ell$  (projection du moment cinétique orbital sur un axe :  $L_z = m_\ell \hbar$ ),  $-\ell \leq m_\ell \leq \ell$
- ✓ magnétique de spin  $m_s$  (projection du moment cinétique intrinsèque :  $S_z = m_s \hbar$ ),  $m_s = \pm \frac{1}{2}$

### Atomes, molécules polaires ou polarisables - Forces de Van der Waals

Les forces de Van der Waals décroissent avec la distance  $r$  en  $\frac{1}{r^7}$ . Cf. doc « Dipôles ».

## Magnétisme atomique – Magnéton de Bohr

 Le **modèle planétaire** de l'atome d'hydrogène permet, en assimilant l'atome à une **boucle de courant**, de montrer que l'atome possède un **moment magnétique** proportionnel au **moment cinétique de l'électron** :

$$\vec{M} = \gamma \vec{L} \quad \text{où } \gamma \text{ est le } \textbf{rapport gyromagnétique} \text{ de l'électron } \gamma = -\frac{e}{2m}.$$

 En physique quantique le **moment cinétique** est **quantifié** :  $L = \sqrt{\ell(\ell+1)} \hbar$  et  $L_z = m_\ell \hbar$ .

 On en déduit que le moment magnétique est quantifié :  $M = \gamma L \propto \gamma \hbar = \frac{e\hbar}{2m}$ .

 Le **moment magnétique atomique est donc un multiple du moment magnétique**

**élémentaire**  $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} = 0,9 \cdot 10^{-23} \text{ Am}^2$  appelé **magnéton de Bohr**.

*Questions de cours - Savoir-faire exigible*

### Exercice - Magnétisme atomique \*

1. Modèle planétaire de l'atome d'hydrogène

- En appliquant la 2<sup>ème</sup> loi de Newton à l'électron ( $e, m$ ) en orbite circulaire de rayon  $a$  autour du proton, déterminer la pulsation  $\omega$  puis la période  $T$  de son mouvement. Application numérique pour  $T$ .
- La durée très brève de la période permet, du point de vue magnétique, de modéliser l'électron sur sa trajectoire par une boucle de courant circulaire parcourue par un courant d'intensité  $I$  constante. Exprimer  $I$  puis le moment magnétique  $\vec{M}$  de l'atome d'hydrogène en fonction de  $a, e$  et  $\omega$ .
- Exprimer le moment cinétique  $\vec{L}$  de l'atome en fonction de  $m, a$  et  $\omega$ .
- En déduire une relation entre  $\vec{M}$  et  $\vec{L}$ , puis l'expression du rapport gyromagnétique de l'électron  $\gamma$ .
- Application numérique : ordre de grandeur du magnéton de Bohr.

2. Analyse dimensionnelle (Savoir-faire du physicien)

Les dimensions et l'ordre de grandeur du magnéton de Bohr peuvent être retrouvés rapidement par analyse dimensionnelle en écrivant que **l'énergie d'un photon** de pulsation  $\omega$  (de façon à introduire la constante de Planck) et **l'énergie d'un dipôle** de moment  $\mu_B$  dans un champ magnétique  $B$  ont même dimension. Pour éliminer la pulsation  $\omega$  et le champ  $B$ , on utilise la **pulsation cyclotron** (intervenant dans les mouvements de particules chargées dans un champ magnétique) :  $\omega_c = \frac{eB}{m}$ .

Retrouver l'expression du magnéton de Bohr à un facteur numérique près.

### Magnétisme intrinsèque (spin) – Expérience de Stern et Gerlach (à venir)