

TUT'ENTRÉE – COURS 1
PARTICULES, ONDES ET ATOMES



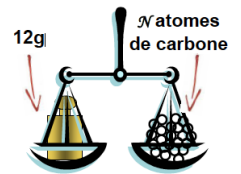
I. MASSE ET ÉNERGIE

A. Définition

- La **masse** est la **mesure de la quantité de matière d'un corps**.
- En **physique**, il s'agit d'**atomes isolés** ou de **particules élémentaires**, donc les **unités du système international** (kg, g) sont **peu adaptées**.

B. Masse (molaire) atomique (en g)

- La **masse atomique** d'un élément est la **masse d'une mole d'atome**, c'est à dire la **masse de N atomes** (nombre d'Avogadro $N = 6,02 \cdot 10^{23}$, choisi de façon à ce que N atomes de C^{12} pèsent 12g).
- Les **masses atomiques en g** sont **plus faciles à manipuler** que la masse d'un atome en g.



C. L'unité de masse atomique (u)

Attention : cette unité ne fait **pas** partie du système international !

- C'est le **1/12^{ème} de la masse d'un atome de Carbone¹²**.
- Cette unité est **bien adaptée à l'échelle des atomes** et des **particules élémentaires**.

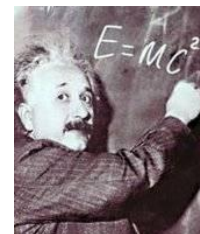
$$1u = \frac{12g}{N} \times \frac{1}{12} = \frac{1}{N} = \frac{1}{6,02 \cdot 10^{23}} = 0,166 \cdot 10^{-23}g$$

Masse	Hydrogène	Carbone	Oxygène
d'un atome en g	0,17.10 ⁻²³	2.10 ⁻²³	2,65.10 ⁻²³
d'une mole d'atomes en g <i>masse atomique</i>	1,007	12	15,994
d'un atome en unité de masse atomique	1,007	12	15,994
A nombre de masse (nombre de nucléons)	1	12	16

$\frac{A}{Z} X$ **A = Nombre de masse** (nombre de nucléons).
 Z = numéro atomique (nombre de protons)

Masse atomique en g = Masse d'un atome en u
A est toujours égal à l'entier le plus proche de cette masse

- La valeur numérique de A exprime 3 quantités selon son unité :
 - Sans unité → **nombre de nucléons**
 - En grammes → **masse atomique**
 - En unité de masse atomique (u) → **masse d'un atome**



D. Relation masse/énergie

- Selon Einstein, la **masse est une forme d'énergie** : $E_0 = m_0c^2$
c = vitesse de la lumière dans le vide (3.10⁸ m/s), m₀=masse au repos
- **Lorsqu'une particule est en mouvement**, l'**accélération** transforme de l'énergie en **masse** :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$m_0 =$ *masse au repos*
 $v =$ *vitesse de la masse*
 $c =$ *vitesse de la lumière dans le vide (3.10⁸ m.s⁻¹)*
 Quand $v \ll c$, $m \rightarrow m_0$

- Plus la **vitesse** de la particule se rapproche de la **vitesse de la lumière**, plus sa **masse relativiste** (=masse en mouvement) **augmente**. Inversement, plus sa **vitesse est faible**, plus sa **masse se rapproche de m₀**.

II. PARTICULES MATÉRIELLES

A. L'électron, le proton, le neutron

	Masse au repos	Masse relativiste	Charge	Stabilité
Électron (électron négatif ou négaton)	$m_e = 0,548 \cdot 10^{-3} u$ $\approx 1/2000 u$	Masse faible et vitesse relativement élevée, Pour $v=0,5c$, $m_e = 1,15m_0$	$e^- = -1,602 \cdot 10^{-19} C$ (coulombs)	
Proton	$m_p = 1,007 u$	Considérés comme non relativistes	$e^+ = 1,602 \cdot 10^{-19} C$ (coulombs)	Stable , même en dehors du noyau
Neutron	$m_n = 1,009 u$		nulle	Instable en dehors du noyau $n = p + e^- + \bar{\nu} + 0,78 MeV$

➤ Unité d'énergie adaptée à l'atome : l'électronvolt (eV) (hors système international)

Déf : Energie cinétique acquise par un électron sans vitesse initiale, sous l'effet d'une différence de potentiel de 1 volt.

1 eV = $E_c = 1,602 \cdot 10^{-19} J$

$$10^3 eV = keV$$

$$10^6 eV = MeV$$

$$10^9 eV = GeV$$

➤ On peut avoir une équivalence masse/énergie pour 1 unité de masse atomique :

$$E_0 = m_0 \times c^2 \text{ pour 1 unité de masse atomique}$$

$$1 u = \frac{0,166 \cdot 10^{-26} \times (2,9979 \cdot 10^8)^2}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 931 MeV / c^2$$

m_0 en kg c^2 $1 eV$ en J

1 u = 931 MeV/c²

➤ Remarque 1 : on assimile la masse de l'atome d'hydrogène à la masse du proton (son noyau) car la masse de l'électron est 2000 fois plus petite.

➤ Remarque 2 : 1 mole d'électrons = $N \times 1,602 \cdot 10^{-19} C$ (Coulombs) = 96 500 C = 1 Faraday

B. Autres particules matérielles

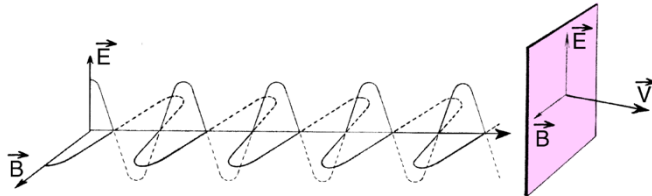
➤ Elles sont produites lors de transformations radioactives.

	Positon (β^+) Antiparticule de l'électron	Neutrino (ν) Explique la radioactivité β	Particule α = 4 nucléons (2p + 2n) = le NOYAU de l'Hélium
Masse au repos	$m = 1/2000 u$	quasi nulle	$m = 4,0015u$ ($< 2m_p + 2m_n$)
Charge	$e^+ = 1,602 \cdot 10^{-19} C$ (coulombs)	nulle	charge = $3,204 \cdot 10^{-19} C$ ($2 \times e^+$)

III. LES RAYONNEMENTS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

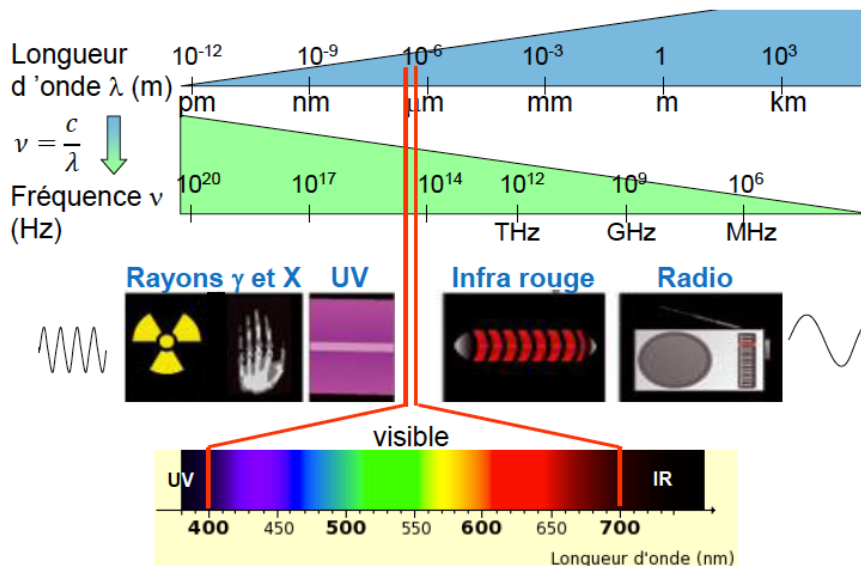
A. Représentation classique

- Les rayonnements électromagnétiques (REM) sont des **perturbations** du **champ électromagnétique** qui se propagent dans le vide à la vitesse de la lumière, soit $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



On les modélise comme composés d'un **champ magnétique B** et d'un **champ électrique E** qui vibrent **en phase**, sont **perpendiculaires l'un par rapport à l'autre** et par rapport à la **direction de propagation**.

- Ces REM sont caractérisés par :
 - Leur **longueur d'onde** $\lambda =$ plus petite distance séparant 2 points dans un même état vibratoire (en mètres)
 - Leur **fréquence** $\nu = \frac{c}{\lambda}$ [Hertz]
- Spectre des REM :



→ La fréquence ν est inversement proportionnelle à la longueur d'onde λ .

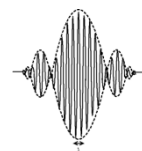
Attention : la différence entre les rayons X et γ ne réside pas dans leur énergie, mais dans leur provenance. Les rayons X proviennent des électrons et les rayons γ des noyaux.

B. Représentation quantique

- Une onde EM ne peut céder ou acquérir de l'énergie qu'elle transporte que par **quantités discontinues, multiples entiers d'une quantité élémentaire** : le « *quantum de Planck* » :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

avec $h =$ constante de Planck $= 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4,13 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$



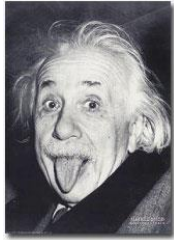
- La **relation de Duane et Hunt** permet de relier facilement E et λ en considérant les unités habituelles (hors système international) :

$$E[\text{eV}] = \frac{1240}{\lambda[\text{nm}]}$$

IV. DUALITÉ ONDE-PARTICULE

A. Les ondes EM sont considérées comme des corpuscules

- Einstein rapproche :



$E = mc^2$ pour une particule de masse m

$E = \frac{hc}{\lambda}$ du quantum de Planck

$$\left. \begin{array}{l} E = mc^2 \\ E = \frac{hc}{\lambda} \end{array} \right\} E = mc^2 = \frac{hc}{\lambda} \longrightarrow \boxed{m = \frac{h}{\lambda c}}$$

→ On est capable d'affecter une masse à un REM ; donc les ondes EM peuvent être considérées comme des corpuscules : les **photons**, avec une **masse exclusivement dynamique** $m = \frac{h}{\lambda c}$.

B. Les particules sont associées à une représentation ondulatoire

- Selon Louis de Broglie, la relation d'Einstein pour les ondes EM vaut aussi pour toutes les particules.



Comme on avait $m = \frac{h}{\lambda c}$ →

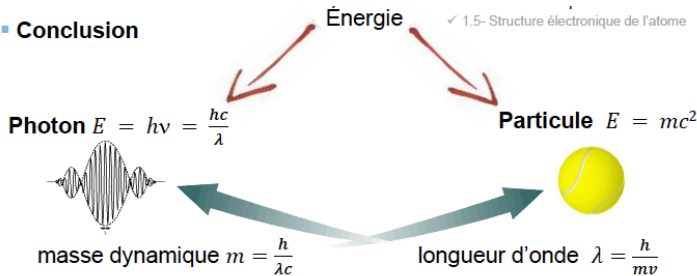
il propose $m = \frac{h}{\lambda v}$

À toute **particule de masse m et de vitesse v** , on associe une onde dont la longueur d'onde λ est donnée par :

$$\boxed{\lambda = \frac{h}{mv}}$$

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Conclusion



L'énergie peut être portée soit par un **photon** soit par une **particule**.

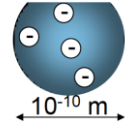
D'après Einstein, ce **photon** a une **masse dynamique**.

D'après De Broglie, à cette **particule** on peut lui trouver une **longueur d'onde**.

- Remarque : cette loi générale n'a d'intérêt qu'à certaines échelles.
 Pour une balle de tennis à 100 km/h ($m=58g$) : $\lambda = 4,2 \cdot 10^{-34}m$.
 Pour un électron soumis à une différence de potentiel de 100 volt : $\lambda = 1,2 \cdot 10^{-10}m$.
 Ordre de grandeur : dimension du noyau $10^{-15}m$
 ⇒ Pas de manifestation ondulatoire à cette échelle pour la balle.

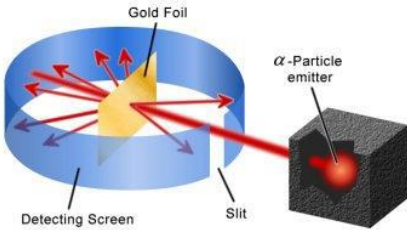
V. STRUCTURE ÉLECTRONIQUE DE L'ATOME

- Jusqu'au début du XX^{ème} siècle, on considère que l'atome est une **sphère pleine positive** sur laquelle sont **accrochées des charges négatives**



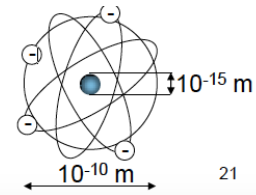
A. Le modèle planétaire de Rutherford (1911)

- Mais une expérience démontre l'incompatibilité de ce modèle :



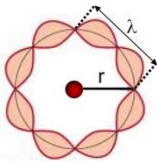
Un émetteur envoie des particules α sur une feuille d'or. Or, une majorité d' α n'est pas déviée.
→ donc « la matière est pleine de vide ».

- Selon ce nouveau modèle, l'atome est constitué :
 - d'une **masse concentrée au niveau du noyau** chargé **positivement** (10^{-15} m)
 - d'**électrons** chargés **négativement**, refoulés à la **périphérie du vide péri-nucléaire** (10^{-10} m)



B. Le modèle de Bohr (1913)

- C'est une des **conséquences** de la **dualité onde-particule**.
Soit un atome de ${}^1_1\text{H}$ qui possède un **électron**, comment **associer une onde stationnaire à cet électron**, tournant sur une **orbite** à une **distance r du noyau** ?



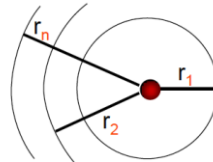
La **circonférence** de l'**orbite** est : $l = 2\pi r$

Pour que l'électron puisse « rentrer » dans cet espace fermé, il faut que la **taille de cet espace** soit **compatible** avec sa **nature ondulatoire**.

→ l doit être un **multiple entier** de sa longueur d'onde λ :

$$l = 2\pi r = n \lambda$$

- **Donc r est quantifié** : il y a un **nombre fini d'orbites** dont les **périmètres** sont des **multiples entiers de λ** . L'**intensité de la liaison** au noyau des électrons positionnés sur ces orbites **dépend de r**.



C. Conséquences du modèle de Bohr sur l'énergie de l'électron

- On montre que pour un atome de ${}^1_1\text{H}$ et l'orbite n , l'énergie de l'électron est donnée par :

$$W_n = -13,6 \frac{1}{n^2} \text{ eV}$$

- L'**énergie de l'électron** est **négative**.
- L'**énergie de liaison** de l'électron est l'**énergie qu'il faut apporter pour arracher cet électron** à l'édifice atomique et l'**emporter hors de l'influence du noyau** :

$$E_{Ln} = |W_n|$$

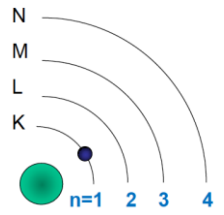
- W_n et E_{Ln} sont **quantifiées** : elles varient de manière **discontinue** en fonction de n .

➤ Toujours pour 1H :

$$r_n = n^2 \times 0,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$W_n = -13,6 \frac{1}{n^2} \text{ eV}$$

n	1	2	3	4
r (10⁻¹⁰m)	0,5	2	4,5	8
Orbite	K	L	M	N
W_n (eV)	-13,6	-3,4	-1,5	-0,8
	$W_K/4$	$W_K/9$	$W_K/16$	



À l'état fondamental de 1H, l'e⁻ occupe la **couche K** correspondant à l'énergie **W_n minimale (E_i maximale)**. Il peut **passer sur une orbite supérieure** par absorption d'un **quantum d'énergie**.

Ex : si ΔE = 10,2 eV → passage de K à L

D. Généralisation du modèle de Bohr à un nombre Z d'électrons

➤ Théoriquement : $W_n = -13,6 \frac{Z^2}{n^2} \text{ eV}$

➤ En réalité : le cortège électronique modifie l'interaction noyau / électron par un « effet écran ». Pour en tenir compte :

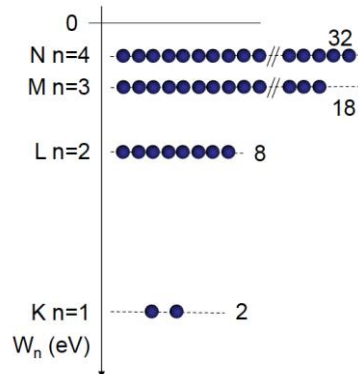
$$W_n = -13,6 \frac{(Z-\sigma)^2}{n^2} \text{ eV}$$

avec σ « constante d'écran »

Ex : couche M du tungstène (Z=74) : en théorie $W_n = -8\,275 \text{ eV}$, valeur réelle $W_n = -2\,820 \text{ eV}$ (σ = 30,8)

E. Remplissage des couches électroniques dans le modèle de Bohr

➤ Nombre maximum d'électrons par couche = 2n²



CONCLUSION

➤ Tous les atomes sont construits selon le même mode de remplissage des différentes couches : 2n² électrons par couche (modèle de Bohr) ...

➤ Les énergies des électrons dépendent de la couche et de l'atome : $W_n = -13,6 \frac{(Z-\sigma)^2}{n^2} \text{ eV}$

	Hydrogène Z=1	Calcium Z=20	Tungstène Z=74
W _K (eV)	- 13,6	- 4000	- 69500
W _{ext} (eV)	- 13,6	- 25,4	- 5,7

- Les e⁻ K sont les plus fortement liés ; W_K varie beaucoup selon les atomes (fonction de Z² à l'effet écran près).
- Les e⁻ de la couche la plus externe sont les moins fortement liés ; W_{ext} varie peu selon les atomes (dépend peu de Z).

➤ Lorsque les couches électroniques les plus basses sont complètes, l'atome est dans son état fondamental (sinon excès d'énergie).