



Cours n°1

Particules, ondes et atomes

I. MASSE ET ÉNERGIE

A. Masse en mécanique classique

La **masse** est définie comme la mesure d'une **quantité de matière d'un corps**.

Le SI (g,kg) est utilisable pour les grandes populations d'atomes (chimie) mais peu ou pas utilisé pour les atomes isolés et les particules élémentaires (physique). Les unités doivent être cohérentes entre elles et avec la nomenclature des nuclides :

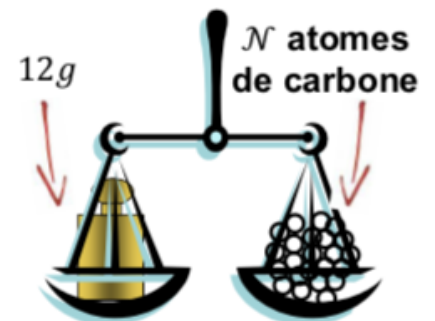
A_ZX

A = Nombre de masse (nombre de nucléons)
Z = numéro atomique (nombre de protons)

B. Masse molaire atomique

La masse atomique d'un élément est la **masse d'une mole d'atome**, c'est-à-dire **de N atomes** (nombre d'Avogadro $N = 6,02 \cdot 10^{23}$, choisi pour que N atomes de C^{12} pèsent 12g).

Les masses atomiques en g sont ainsi **plus faciles à manipuler** que la masse d'un atome en g.



C. Unité de masse atomique (u)

C'est le **1/12ème de la masse d'un atome de C^{12}** .

ATTENTION !! : Cette unité est **hors SI**, mais on l'utilise en physique car elle est **bien adaptée à l'échelle des atomes et des particules élémentaires**.

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

Masse	Hydrogène	Carbone	Oxygène
d'un atome en g	$0,17 \cdot 10^{-23}$	$2 \cdot 10^{-23}$	$2,65 \cdot 10^{-23}$
d'une mole d'atomes en g masse atomique	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

En regardant le tableau on remarque que :



Masse d'une mole d'atomes (g) = masse d'un atome (u)
A est toujours égal à l'entier le plus proche de cette valeur



Donc, la valeur numérique de **A** exprime :

- > Le **nombre de nucléons ou nombre de masse** (si pas d'unité)
- > La valeur entière la plus proche de la **masse d'une mole d'atomes** (si en g)
- > La valeur entière la plus proche de la **masse d'un atome** (si en u)

D. Relation masse-énergie

Selon Einstein, la masse est une forme d'énergie :

$$E_0 = m_0 c^2$$

c = vitesse de la lumière dans le vide (3.10⁸ m . s⁻¹)

Mais lorsque la particule se met en mouvement, l'énergie de l'accélération se transforme en masse. :

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

m₀ = masse au repos de la particule

v = vitesse de la particule

c = vitesse de la lumière dans le vide

(3.10⁸ m.s⁻¹) Quand v << c, m → m₀

- > On Remarque que lorsque v (vitesse de la particule) augmente et se rapproche de la vitesse de la lumière, sa masse relativiste m (masse en mouvement) augmente aussi
- > A l'inverse, quand sa vitesse est faible, sa masse se rapproche de m₀

II. PARTICULES MATERIELLES

A. Electron, proton et 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 <small>$n = p + e^- + \bar{\nu} + 0,78 MeV$</small>



La charge de l'électron permet de définir une nouvelle unité d'énergie, l'électronvolt (eV) : énergie cinétique acquise par un électron sans vitesse initiale, sous l'effet d'une ddp (différence de potentiel) de 1 Volt.

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

Et $1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$
 $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$
 $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$

ATTENTION !!!: C'est une **unité hors SI** mais elle est **adaptée aux atomes et aux particules élémentaires**.

On peut aussi avoir une équivalence masse énergie :

$$E_0 = m_0 c^2$$

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

Annotations: m en kg, c^2 , 1 eV en J , $[E] = [m] \cdot c^2$, $[m] = [E]/c^2$

Ex: Equivalence masse-énergie pour l' e^- : $931 \times 0,548 \cdot 10^{-3} = 511 \text{ keV}$



$$1 u = 931 \text{ MeV}/c^2$$

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

B. Autres particules

	Masse au repos	Charge
Positron (β^+) Antiparticule de l'électron	$m = 1/2000 u$	$*e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (coulombs) (idem que proton)
Neutrino (ν) et Antineutrino ($\bar{\nu}$) Expliquent la radioactivité β	quasi nulle	nulle
Particule α = 4 nucléons (2p + 2n) = le noyau de l'atome d'Hélium	$m = 4,0015u$ ($< 2m_p + 2m_n$)	charge = $3,204 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (2 x +e)

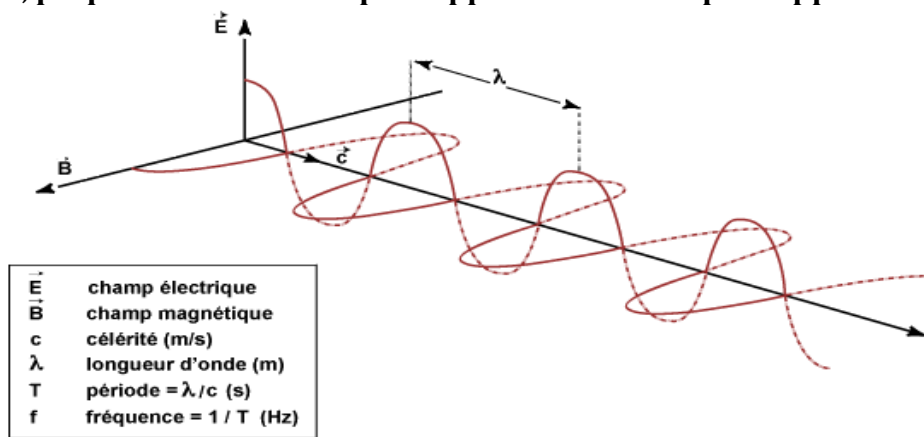


III. RAYONNEMENTS ÉLECTROMAGNÉTIQUES (REM)

A. Représentation classique

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

> Les REM résultent de la **propagation simultanée d'un champ électrique E et d'un champ magnétique B** vibrant **en phase, perpendiculaires l'un par rapport à l'autre et par rapport à la direction de propagation**.

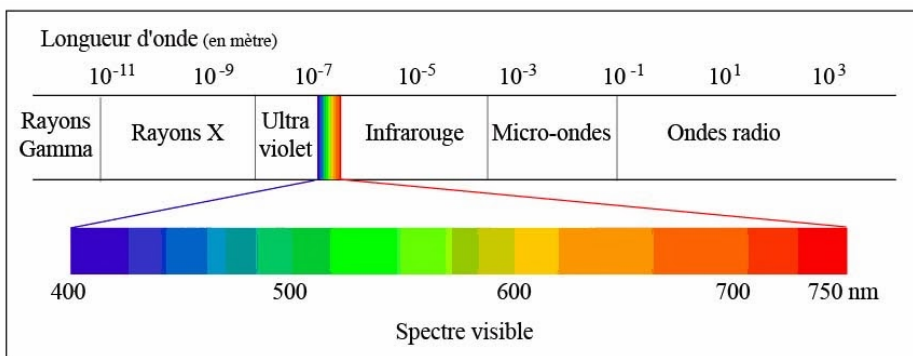


- Les REM sont caractérisés par : > leur **longueur d'onde λ** (en m) = plus petite distance séparant 2 points dans un même état vibratoire
- > leur **fréquence ν** (en Hz) = nombre de répétitions d'un phénomène périodique par seconde

La relation qui les lie est :

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

On remarque que λ et ν sont **inversement proportionnels** !



La partie visible du spectre se situe entre 400 et 700nm.

- Le spectre des REM est très large et la **différence** entre les **rayons X et γ** ne réside pas dans leur énergie, mais dans leur **provenance** : les **rayons X** proviennent des **électrons** (origine atomique) et les **rayons γ** des **noyaux** (origine nucléaire). +++

B. Représentation quantique

Une OEM 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** » :

$$E[J] = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Avec h la constante de Planck = $6,62 \cdot 10^{-34} J \cdot s$

Il existe aussi la relation de **Duane et Hunt** qui permet de relier E et λ :

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

ATTENTION !! Ici, e est en eV et λ en nm

IV. DUALITÉ ONDE-PARTICULE

A. Les ondes considérées comme particules

Einstein rapproche 2 formules : $E = mc^2$ pour une particule de masse m
 $E = h\nu = hc/\lambda$ pour le quantum de planck



$$m = \frac{h}{\lambda c}$$

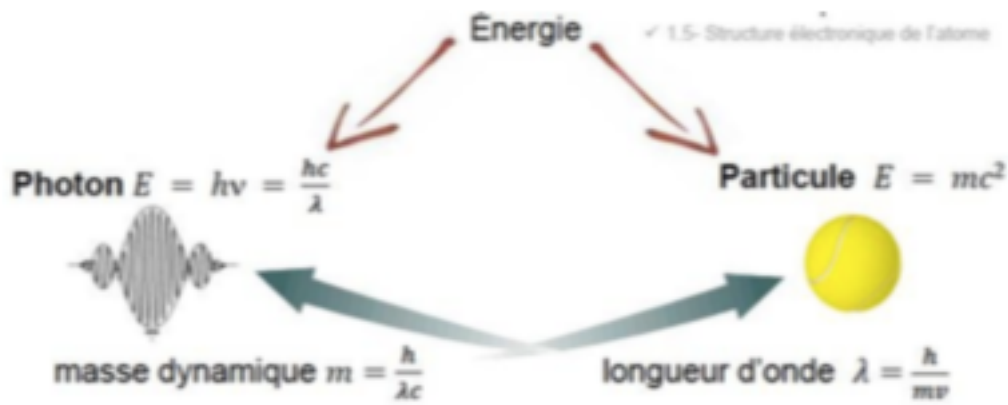
On peut donc affecter une masse à une **OEM**, qui peuvent être considérées comme des **corpuscules** : les **photons**, avec une **masse exclusivement dynamique** $m = h/\lambda c$

B. Les particules associées à une représentation obligatoire

Louis de Broglie (de Breuil pour les intimes) prend par la suite le problème à l'envers : il reprend $m = h/\lambda c$ pour le photon et donne $m = h/\lambda v$ pour une particule ou v représente la vitesse.

Ainsi, à toute **particule** de **masse** m et de vitesse v , on peut associer une **onde** dont la **longueur d'onde** λ vaut :

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



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**

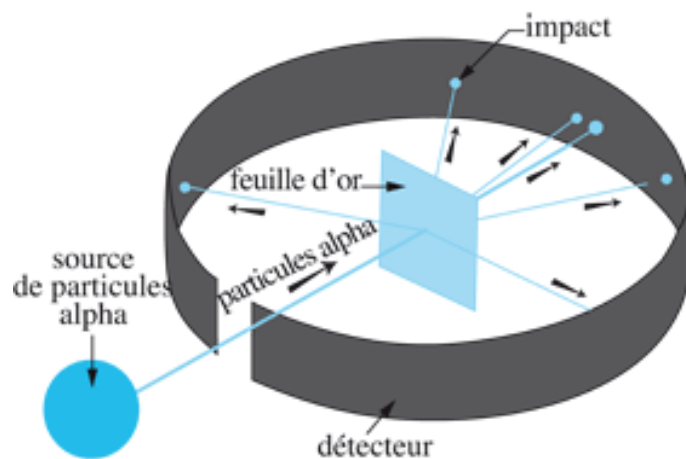
V. STRUCTURE ÉLECTRONIQUE DE L'ATOME

Jusqu'au **début du 20e siècle**, on considère l'atome comme une **sphère pleine remplie de charges négatives**.

A. Modèle planétaire de Rutherford (1911)

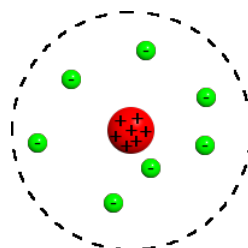
EXPERIENCE DE RUTHERFORD

Rutherford effectue une **expérience** démontrant l'**incompatibilité de ce modèle** : un émetteur envoie des particules α sur une feuille d'or et la majorité de ces **particules α** ne sont **pas déviées**. Il en conclut donc que « **la matière est pleine de vide** ». ++

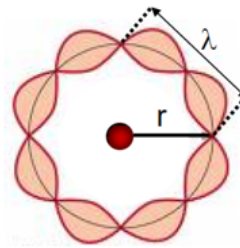


Selon ce nouveau modèle, l'atome est constitué :

- d'une **masse** concentrée dans le **noyau** chargé **positivement** (diamètre = $10^{-15}m$)
- et d'**électrons** chargés **négativement** qui gravitent autour, en **périphérie** (donnant la forme de l'atome, diamètre = $10^{-10}m$)



B. Modèle de Bohr (1913)



C'est la **conséquence directe de la dualité onde-particule**.

La **circonférence de l'orbite** est : $l = 2\pi r$ Pour que l'électron puisse « rentrer » dans l'orbite, il faut que la **taille** de cet espace soit **compatible avec sa nature ondulatoire**. Donc l doit être un **multiple entier de sa longueur d'onde λ** :

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

Le rayon r est donc quantifié selon un nombre fini d'orbites et l'**intensité de la liaison des électrons au noyau** dépend de r .

C. Conséquences du modèle de Bohr

1. Cas pour l'hydrogène H_1 quand $Z = 1$

- L'énergie de l'électron sur une orbitale n quelconque est donnée par :

→ **L'énergie de l'électron est donc négative ! ++**
(attention pièges qcm)

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

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

$$E_L = |W_n|$$

→ **L'énergie de liaison de l'électron est donc positive ! ++**
(attention pièges qcm)

Remarque : W_n et E_L sont **quantifiées**, elles varient de manière **discontinue** en fonction de n

n	1	2	3	4
r ($10^{-10}m$)	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** et E_L **maximale**. Il peut **passer sur une orbite supérieure**, seulement par absorption d'un **quantum d'énergie**.
Exemple : si $\Delta E = 10,2 eV \rightarrow$ passage de K à L

Remarque : Il est conseillé de retenir les valeurs d'énergie des différentes couches pour l'atome d'hydrogène

2. Cas pour un nombre Z quelconque d'électrons

En théorie, si les électrons ne se gênaient pas, leur **énergie** serait : $W_n = -13,6 \frac{Z^2}{n^2} [eV]$

Mais en réalité, ils subissent l'**influence du nuage électronique auxquels ils appartiennent** : c'est l'**effet écran**. On a donc :

+++ Concours

σ (constante d'écran) vous sera donné

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

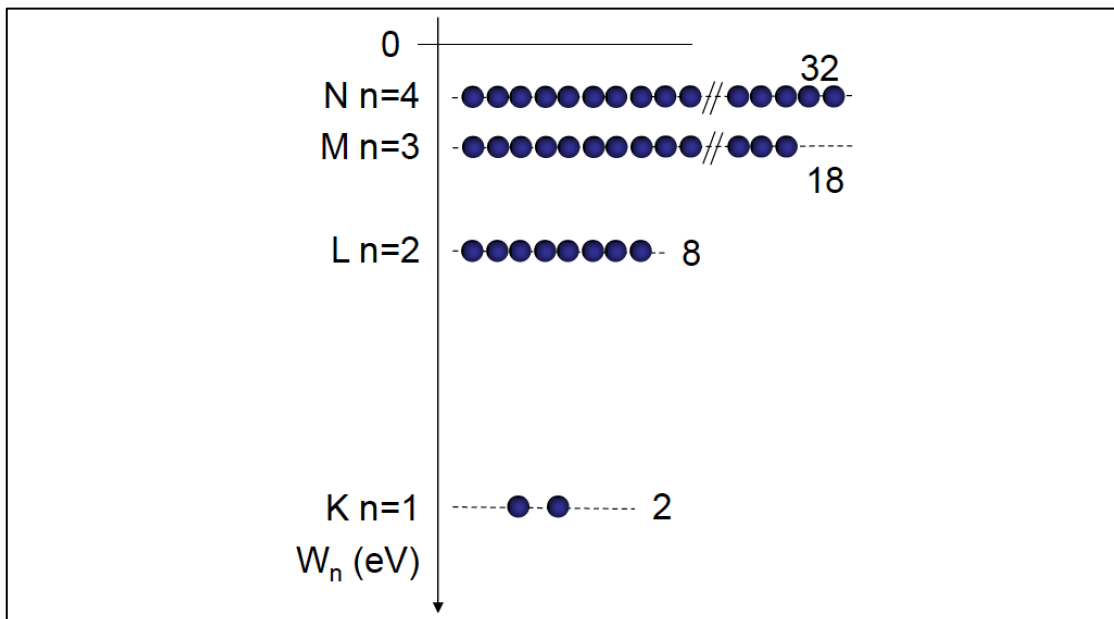


Ex : couche M du tungstène (Z=74) : en théorie $W_n = -8\,275$ eV, valeur réelle $W_n = -2\,820$ eV ($\sigma = 30,8$)

D. Remplissage des couches électroniques

Nombre d'électrons maximal par couche = $2n^2$

Ex : couche K ($n=1$) $\rightarrow 2 e^-$; couche L ($n=2$) $\rightarrow 8 e^-$; couche M ($n=3$) $\rightarrow 18 e^-$...ATTENTION !! : **n=1** pour la première couche K ! Jamais $n=0$!!



E. Conclusion

- Tous les atomes sont construits selon le **même mode de remplissage des couches électroniques : $2n^2$** (modèle de Bohr).
- Les e^- de la couche K sont les **plus fortement liés**, donc **W_K varie fortement** selon les atomes (car $n=1$ donc plus de dénominateur dans la formule) ;
- Les e^- de la couche externe sont les **moins fortement liés**, donc **W_{EXT} varie peu** selon les atomes.
- Lorsque les **couches électroniques les plus basses** sont **complètes**, l'atome est dans son **état fondamental** (sinon état excité avec excès d'énergie).