Cours 1
Particules, ondes et atomes

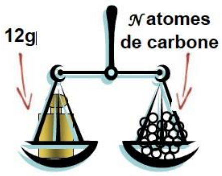
I. Masse et énergie

1. Masse en mécanique classique

La **masse** est la mesure d'une **quantité de matière d'un corps**. Elle est exprimée en kg dans le SI.

En physique, il s'agit **d'atomes isolés** ou de **particules élémentaires**, ainsi les **unités du SI** sont **peu adaptées.**

2. 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 $\mathbb{N} = \mathbf{6,02.10^{23}}$, choisi pour qu'**une mole soit ℕ atomes de C^{12} pèse 12g**).

Les masses atomiques en **g** sont ainsi **plus faciles à manipuler** que la masse d'un atome en g, mais cela reste peu pratique en physique.

3. 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**.

$$1u = \frac{12g}{\mathcal{N}} \times \frac{1}{12} = \frac{1}{\mathcal{N}} = \frac{1}{6{,}02.10^{23}} = 0{,}166.10^{-23}g$$

Quelques exemples :

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 *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

Avec $^{A}_{Z}X$ **A = Nombre de masse** (nombre de nucléons).
Z = numéro atomique (nombre de protons)

Ainsi 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

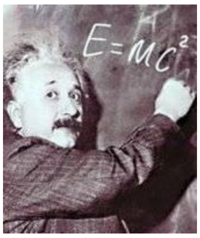
Donc, la **valeur numérique de A** exprime :

- 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)*

4. Relation massse-énergie

- <u>En mécanique classique</u>

  La masse est définie comme la **résistance à l'accélération** et on l'utilise pour calculer la force nécessaire à un objet pour lui conférer une accélération donnée.



- <u>En mécanique quantique</u>

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

$$\boxed{E_0 = m_0c^2}$$

avec m_0 *la masse au repos,*
c la vitesse de la lumière dans le vide ($3.10^8 m.s^{-1}$)

Mais **lorsque la particule se met en mouvement, l'énergie de l'accélération se transforme en masse** et on parle de **masse relativiste**.

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

m_0 = *masse au repos*
v = *vitesse de la masse*
c = *vitesse de la lumière dans le vide* ($3.10^8\ m.s^{-1}$)
Quand $v << c$, $m \rightarrow m_0$ *et* *quand* $v\nearrow$, $m\nearrow$

<u>Remarque</u> : Plus la **vitesse** de la particule **augmente** (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** $\boldsymbol{m_0}$.

II. <u>Particules matérielles</u>

1. Electron, proton et neutron

<table>
<tr><th></th><th>Masse au repos</th><th>Masse relativiste</th><th>Charge</th><th>Stabilité</th></tr>
<tr><td>Électron (électron négatif ou négaton)</td><td>m_e =0,548. 10^{-3}u ≈1/2000 u</td><td>Masse faible et vitesse relativement élevée, Pour v=0,5c, m_e=1,15m_0</td><td>$^-$e=-1,602. 10^{-19}C (coulombs)</td><td></td></tr>
<tr><td>Proton</td><td>m_p= 1,007 u</td><td rowspan="2">Considérés comme non relativistes</td><td>$^+$e=1,602. 10^{-19} C (coulombs)</td><td>Stable, même en dehors du noyau</td></tr>
<tr><td>Neutron</td><td>m_n= 1,009 u</td><td>nulle</td><td>Instable en dehors du noyau $n = p + e^- + \bar{\nu} + 0{,}78\ \text{MeV}$</td></tr>
</table>

<u>/!\ ATTENTION</u> **L'électron possède donc une masse relativiste** car dans certains cas il atteindra une vitesse proche de la célérité.

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

$$\boxed{1\ eV = Ec = 1{,}602.10^{-19} J}$$

Et 1 keV = 10^3 eV
1 MeV = 10^6 eV
1 GeV = 10^9 eV

<u>/!\ ATTENTION</u> C'est une **unité hors SI** *(comme l'u)* mais elle est **adaptée aux atomes et aux particules élémentaires**.

On peut avoir une **équivalence masse/énergie** pour 1 u :

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

m_0 en kg — c^2 — $1\ eV$ en J

$$1\,u = \frac{0{,}166.10^{-26} \times (2{,}9979.10^{8})^2}{1{,}602.10^{-19}} = 931\ MeV/c^2$$

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

Donc pour chaque particule on peut exprimer sa masse en u ou en énergie.

Exemple : $m_{e^-} = 0{,}548.10^{-3} \times 931 = 511\ keV$ *donc l'électron a une équivalence énergétique de 511 keV.*

Remarque : pour les calculs (en radioactivité notamment), on arrondira 931 à 1000, ça vous simplifiera la vie.

2. Autres particules

	Masse au repos	**Charge**
Positon (β^+) Antiparticule de l'électron	**m =1/2000 u**	**$^+$e=1,602. 10^{-19} C** (coulombs) (idem que proton)
Neutrino (ν) et **Antineutrino ($\bar{\nu}$)** Expliquent la radioactivité β	**quasi nulle**	**nulle**
Particule α (^4_2He ou He^{++}) = 4 nucléons (2p + 2n) = le **noyau** de l'atome d'**Hélium**	**m = 4,0015u** ($<2m_p+2m_n$)	**charge = 3,204. 10^{-19}C** (2 x +e)

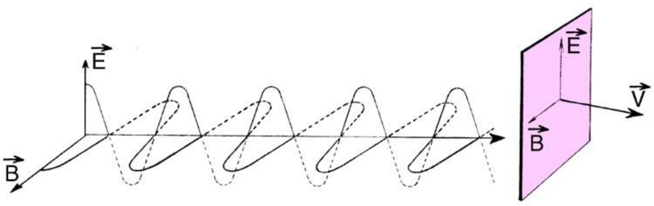
Remarque : ces particules sont rencontrées au niveau des transformations radioactives.

III. Rayonnements électromagnétiques (REM)

1. Représentation classique

Les REM :

- sont des **perturbations de champ électromagnétique** qui se propagent dans le **vide** à la **vitesse de la lumière** soit $c = 3.10^8 m.s^{-1}$
- résultent de la **propagation simultanée d'un champ électrique $\vec{E}$ et d'un champ magnétique $\vec{B}$** vibrant **en phase, perpendiculaires l'un par rapport à l'autre et par rapport à la direction de propagation**.

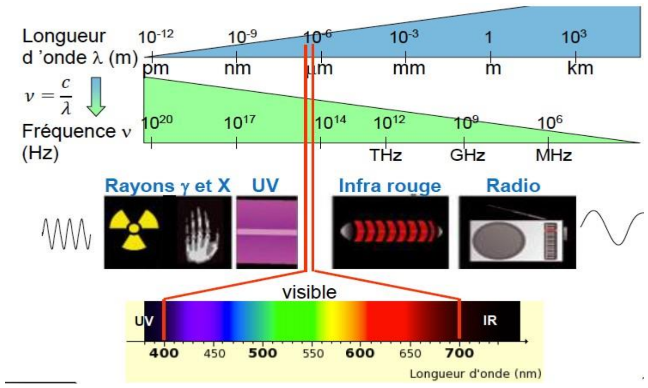


Les REM sont caractérisés par :

- 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

On a ainsi $\boxed{C = \lambda \times \nu}$ et $\boxed{\nu = \frac{c}{\lambda}}$

/!\ ATTENTION : **λ** et **ν** sont **inversement proportionnels** !



Le **spectre** des REM est **très large** *(la partie des rayonnements visibles est en réalité infime, de 400 à 700nm)* et peut s'exprimer selon :

- la longueur d'onde → croissante de gauche à droite
- la fréquence → croissante de droite à gauche

Remarque : 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).

2. 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 »** :

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

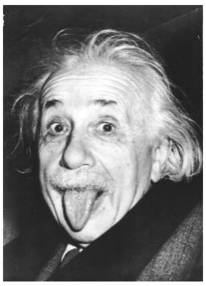
avec la constante de Planck $h = 6{,}62.10^{-34} J.s$

La **relation de Duane et Hunt** permet de relier facilement E et λ en considérant les **unités habituelles (/!\ hors SI)** :

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

IV. Dualité onde-particule

1. Les ondes considérées comme particules



Dans un premier temps, Einstein rapproche :

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

$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ pour le quantum de Planck

$$E = mc^2 = \frac{hc}{\lambda} \rightarrow \boxed{m = \frac{h}{\lambda c}}$$

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

2. Les particules associées à une représentation ondulatoire

Par la suite, Louis de Broglie prend le problème à l'envers.

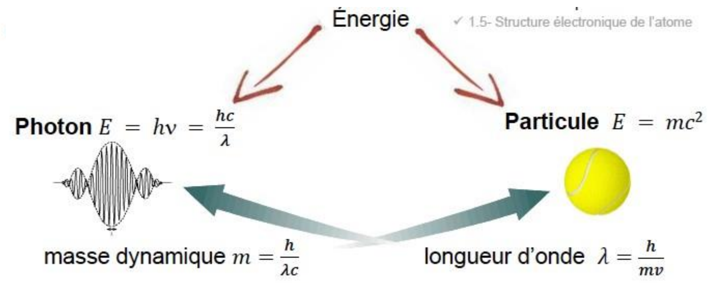
Il reprend $m = \frac{h}{\lambda c}$ pour le photon et donne $m = \frac{h}{\lambda v}$ pour une particule *(avec v sa vitesse).*

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

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

Remarque : ces théories n'ont d'**intérêt physique** que pour des **longueurs d'ondes suffisamment grandes** ($> 10^{-15}$m).
Exemple : balle de tennis à v=100km/h et m=58g → $\lambda = 4{,}2.10^{-34} m$ *→ pas de manifestations ondulatoires !*

RECAP (car cette partie n'est pas évidente, courage)



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

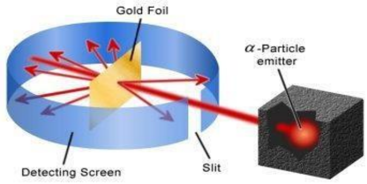
D'après Einstein, ce photon a une **masse dynamique** donc on peut le considérer comme une particule.

D'après De Broglie, à cette particule on peut lui trouver une **longueur d'onde** donc on se rapproche d'un REM.

V. Structure électronique de l'atome

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

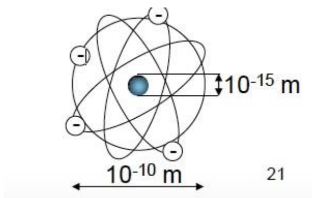
1. Le modèle planétaire de Rutherford (1911)



Mais Rutherford effectue une **expérience** démontrant l'i**ncompatibilité 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 ».**

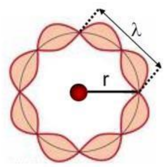
Selon ce nouveau modèle, l'atome est constitué :

- 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 = $10^{-10} m$**)



2. Le 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 la circonférence l doit être un **multiple entier de sa longueur d'onde λ** :

$$\boxed{l = 2\pi r = n\lambda}$$

Ainsi, le **rayon r** est **quantifié** selon un nombre fini d'orbites ($r = n\frac{\lambda}{2\pi}$) et **l'intensité de la liaison des électrons au noyau dépend de r**.

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

A. Cas de l'atome d'hydrogène $_1H$ à Z=1 (1p et 1e⁻)

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

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

/!\ ATTENTION : **L'énergie de l'électron** est donc **négative** !

♦ 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 :

$$\boxed{E_L = |W_n|}$$

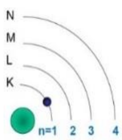
/!\ ATTENTION : **L'énergie de liaison de l'électron** est **positive** !

♦ $\boldsymbol{W_n}$ **et** $\boldsymbol{E_L}$ **sont quantifiées** : elles varient de manière **discontinue** en fonction de n.

$r_n = n^2 \times 0{,}5.10^{-10} \quad m$

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

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 $\boldsymbol{W_n}$ **minimale** et $\boldsymbol{E_L}$ **maximale**. Il peut **passer sur une orbite supérieure**, seulement par absorption d'un **quantum d'énergie**.
Exemple : si ΔE = 10,2 eV → passage de K à L

B. Généralisation à un nombre Z quelconque d'électrons

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

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

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

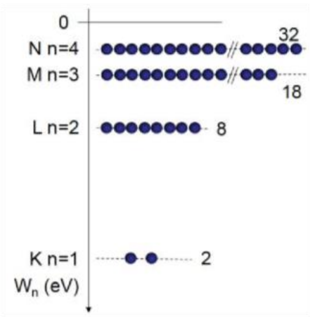
avec $\boldsymbol{\sigma}$ *la constante écran,*
donnée en énoncé

Exemple: couche M du tungstène ($Z = 74$):

Théorie équ. (1) → $W_M = -13{,}6\ \frac{74^2}{3^2} = -8275\ eV$

Valeur réelle équ. (2) → $W_M = -13{,}6\ \frac{(74-30{,}8)^2}{3^2} = -2820\ eV$

4. Remplissage des couches électroniques dans le modèle de Bohr



Nombre d'électrons maximal par couche = $\boldsymbol{2n^2}$

Ex : couche K (n=1) → 2 e⁻ ; couche L (n=2) → 8 e⁻ ; couche M (n=3) → 18 e⁻ …

/!\ <u>ATTENTION</u> : **n=1** pour la **première couche K** ! Jamais n=0 !!

5. Conclusion

- ✓ Tous les atomes sont construits selon le **même mode de remplissage des couches électroniques :** $\boldsymbol{2n^2}$ (modèle de Bohr).
- ✓ Les **énergies des électrons sont quantifiées** : elles dépendent des couches sur lesquelles ils se trouvent et de l'atome considéré ($W_n = -13{,}6\frac{(Z-\sigma)^2}{n^2}$ eV).
- ✓ <u>Les e⁻ de la couche K</u> sont les **plus fortement liés**, donc $\boldsymbol{W_K}$ **varie fortement** selon les atomes (car n=1 donc plus de dénominateur dans la formule) ;
- ✓ <u>Les e⁻ de la couche externe</u> sont les **moins fortement liés**, donc $\boldsymbol{W_{ext}}$ **varie peu** selon les atomes.

Exemple :

	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

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

Bon courage à tous ! Meulin