TUT'RENTRÉE – COURS 1
PARTICULES, ONDES ET ATOMES

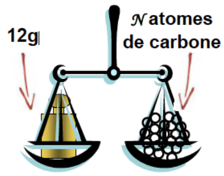
I. MASSE ET ÉNERGIE

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 Ɲ atomes** (nombre d'Avogadro Ɲ= 6,02. 10^{23}, choisi de façon à ce que Ɲ 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 **1/12ème de la masse d'un atome de Carbone12.**
- Cette unité est **bien adaptée à l'échelle des atomes** et des **particules élémentaires**.

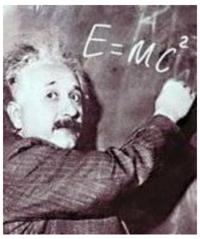
$$1u = \frac{12g}{\mathcal{N}} \times \frac{1}{12} = \frac{1}{\mathcal{N}} = \frac{1}{6{,}02.10^{23}} = 0{,}166.\,10^{-23}g$$

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 *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

$^A_Z X$ **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 (3.10^8 m/s), m_0=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 (3.10^8 $m.s^{-1}$)
Quand $v << c$, $m \rightarrow m_0$

- **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 m_0.**

II. PARTICULES MATÉRIELLES

A. L'électron, le proton, le neutron

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

- 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 = Ec = 1,602. 10^{-19}J

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

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

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

$\boxed{m_0 \text{ en kg}}$ $\boxed{c^2}$

$$1\ u = \frac{0{,}166.\,10^{-26} \times (2{,}9979.\,10^8)^2}{\underbrace{1{,}602.\,10^{-19}}_{\boxed{1\ eV\ en\ J}}} = 931\ MeV/c^2$$

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 x 1,602 . 10 $^{-19}$C (Coulombs) =96 500 C = 1 Faraday*

B. Autres particules matérielles

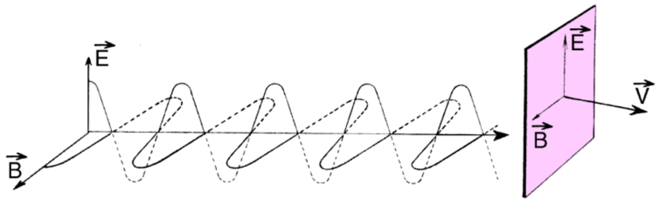
- Elles sont produites lors de transformations radioactives.

	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. 10^{-19} C** (coulombs)	**nulle**	**charge = 3,204. 10^{-19}C (2 x $^+$e)**

III. LES RAYONNEMENTS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

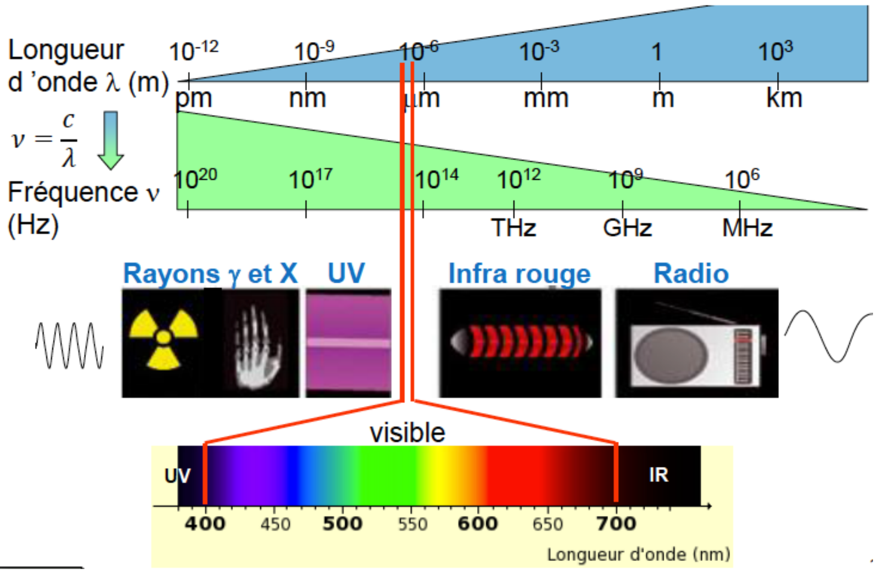
A. Représentation classique

- 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. 10^8 m. 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** = λ = plus petite distance séparant 2 points dans un même état vibratoire (en mètres)
    - Leur **fréquence** $\nu = \frac{c}{\lambda}$ [Hertz]
- Spectre des REM :

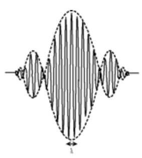


→ La fréquence ν est inversement proportionnelle à la longueur d'onde $\boldsymbol{\lambda}$.

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 » :*



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

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

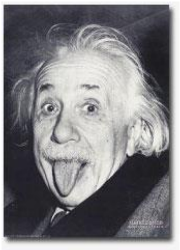
- La **relation de Duane et Hunt** permet de relier facilement E et λ en considérant les unités habituelles (hors système international) :

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

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

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

→ 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

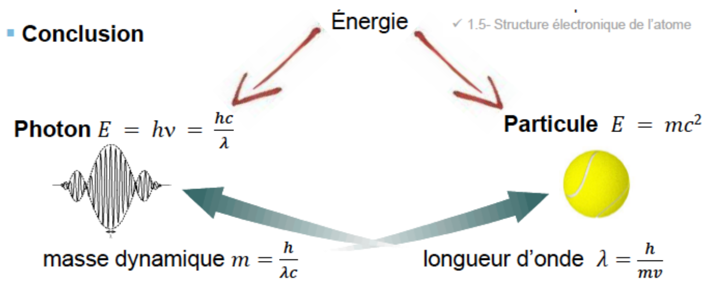
➢ Selon Louis de Broglie, la relation d'Einstein pour les ondes EM vaut aussi pour toutes les particules.

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

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

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



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

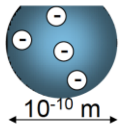
D'après Einstein, ce **photon** a une **masse dynamique.**

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) : $\lambda = 4{,}2.\ 10^{-34}$m.
Pour un électron soumis à une différence de potentiel de 100 volt : $\lambda = 1{,}2.\ 10^{-10}$m.
Ordre de grandeur : dimension du noyau 10^{-15}m
$\Rightarrow$ *Pas de manifestation ondulatoire à cette échelle pour la balle.*

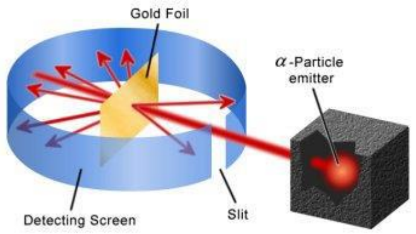
V. STRUCTURE ÉLECTRONIQUE DE L'ATOME

- <u>Jusqu'au début du XXème siècle</u>, on considère que **l'atome** est une **sphère pleine positive** sur laquelle sont **accrochées** des **charges négatives**



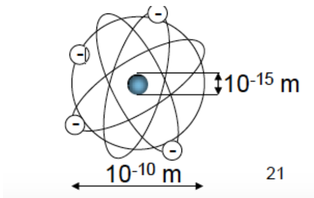
A. Le modèle planétaire de Rutherford (1911)

- <u>Mais une expérience démontre l'incompatibilité de ce modèle</u> :



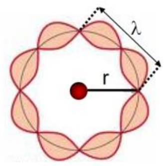
Un émetteur envoie des particules α sur une feuille d'or.
Or, une majorité d'α n'est pas déviée.
→ donc « la matière est pleine de vide ».

- <u>Selon ce nouveau modèle, l'atome est constitué</u> :
  - 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)

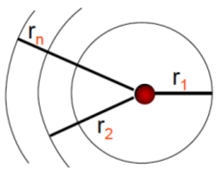
- C'est une des **conséquences** de la **dualité onde-particule**.
*Soit un atome de $_1$H qui possède un électron, comment **associer une onde stationnaire à cet électron**, tournant sur une **orbite** à une **distance r du noyau** ?*



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.**
→ <u>l doit être un multiple entier de sa longueur d'onde λ</u> :

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

- <u>**Donc *r* est quantifié**</u> : 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

- <u>On montre que pour un atome de $_1$H et l'orbite *n*</u>, l'énergie de l'électron est donnée par :

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

- **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** :

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

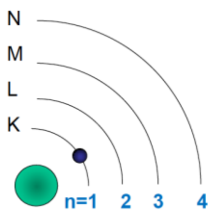
- **W_n et E_{Ln} sont quantifiées** : elles varient de manière **discontinue** en fonction de *n*.

- Toujours pour $_1H$:

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

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

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 $_1$H, l'e$^-$ occupe la **couche K** correspondant à **l'énergie W_n minimale (E_L 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 : $W_n = -13{,}6\frac{Z^2}{n^2}$ eV
- En réalité : le cortège électronique modifie l'interaction noyau / électron par un « effet écran ».
  Pour en tenir compte :

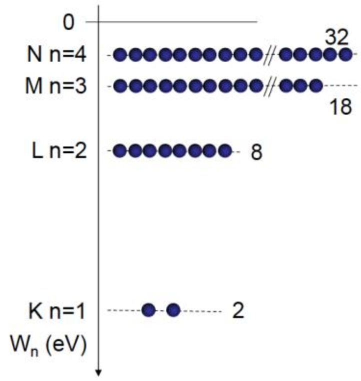
$$\boxed{W_n = -13{,}6\frac{(Z-\sigma)^2}{n^2}\ eV}$$

avec σ « constante d'écran »

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

E. Remplissage des couches électroniques dans le modèle de Bohr

- **Nombre maximum d'électrons par couche** = **$2n^2$**



CONCLUSION

- **Tous les atomes sont construits selon le même mode de remplissage des différentes couches : $2n^2$ électrons par couche (modèle de Bohr) ...**

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