

Module 1

Biophysique

Fiche de cours n°1

Etats de la matière

Distribution papier

- ★ Notion tombée 1 fois au concours
- ★★ Notion tombée 2 fois au concours
- ★★★ Notion tombée 3 fois ou plus au concours

L'ATOME	
Modèle de l'atome de Bohr	▪ Atome = un noyau + un nuage d'électrons gravitant autour du noyau ○ Dimension du noyau : 10^{-14} m ▪ Atome électriquement neutre ○ Noyau chargé positivement ○ Electrons chargés négativement
Noyau composé de nucléons	▪ Protons ○ Masse = $1,6723 \cdot 10^{-27}$ kg = 1 u.m.a (u.m.a = unité de masse atomique) ○ Chargés positivement : $+1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb ○ Découverts en 1910 par E. Rutherford ▪ Neutrons ○ Masse = $1,6747 \cdot 10^{-27}$ kg = 1 u.m.a ○ Non chargés = neutres ○ Découverts en 1932 par J. Chadwick
Cortège électronique composé d'électrons	▪ Masse = $9,11 \cdot 10^{-31}$ kg = $1/2000$ u.m.a ○ Masse des électrons négligeable comparée aux nucléons : la masse d'un atome est principalement concentrée dans son noyau ▪ Chargés négativement : $-1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb

PARTICULES ÉLÉMENTAIRES = FONDAMENTALES = PARTICULES SANS STRUCTURE INTERNE IDENTIFIÉE	
Eléments de classification	▪ Comportements ▪ Caractéristiques mesurables : masse, charge, spin, ...
2 catégories	▪ Fermions ⚡ ○ Constituent la matière et l'anti-matière - Chaque particule élémentaire est associée à une antiparticule ○ Obéissent à la statistique de Fermi-Dirac ○ Spin = 1/2 ▪ Bosons ○ Médiateur (= vecteur) des interactions entre les fermions ⚡ - Transmettent les forces fondamentales - Force entre 2 fermions = échange de boson ○ Permettent d'expliquer comment la matière tient ensemble ○ Obéissent à la statistique de Bose-Einstein ○ Spin = 1 pour les bosons vecteurs

PARTICULES ÉLÉMENTAIRES 12 TYPES DE FERMIONS	
Répartition en 2 catégories	▪ Leptons ⚡⚡ ▪ Quarks ⚡⚡
Répartition en 3 groupes	▪ 1 groupe de particules légères ○ Quarks : up et down - Confinés à l'intérieur des nucléons ○ Leptons : électrons et neutrinos - Peuvent se déplacer librement ▪ 2 groupes de particules lourdes
Répartition en 3 générations = 3 familles	▪ 1^{ère} génération : quark up, quark down, électron, neutrino électronique ○ Particules stables qui constituent la matière ▪ 2^{ème} génération : quark charm, quark strange, muon, neutrino muonique ▪ 3^{ème} génération : quark top, quark bottom, tauon, neutrino tauique

Particules élémentaires : FERMIONS	
QUARKS	
6 sortes de Quarks = 6 « saveurs »	3 quarks chargés $+(2/3)$ de la charge élémentaire e - Up, Charm $\otimes$, Top 3 quarks chargés $-(1/3)$ de la charge élémentaire e - Down, Strange, Bottom - Chaque quark a un anti-quark associé
Formation de particules composites	Associations de quarks par interaction forte
Etat énergétique = « charge de couleur »	- Propriété sans aucun rapport avec l'aspect visuel de la couleur, ce nom est imagé - Etats représentés par les 3 couleurs fondamentales : rouge, bleu et vert - Anti-quarks de couleur anti-rouge, anti-bleu, anti-vert

Particules élémentaires : FERMIONS			
QUARKS : CARACTÉRISTIQUES DES 6 « SAVEURS »			
	Particule	Charge	Masse (keV/c ²)
1 ^{ère} génération	Quark up : « u »	$+(2/3) e$	≈ 2500
	Quark down : « d »	$-(1/3) e$	≈ 4500
2 ^{ème} génération	Quark charm : « c »	$+(2/3) e$	$\approx 2\,000\,000$
	Quark strange : « s »	$-(1/3) e$	$\approx 100\,000$
3 ^{ème} génération	Quark top : « t »	$+(2/3) e$	$\approx 173\,100\,000$
	Quark bottom : « b »	$-(1/3) e$	$\approx 4\,200\,000$

Fermions : QUARKS	
HADRONS = ASSOCIATION DE PLUSIEURS QUARKS	
2 catégories	▪ Mésons : composés de 1 quark + 1 anti-quark ○ Exemples : pions, kaons, ... ▪ Baryons : composés de 3 quarks
Exemples : proton et neutron	▪ Sont des particules composites = ne sont pas des particules élémentaires ☼☼☼ ○ Sont composés de 3 quarks = sont des baryons ▪ Neutron : 2 quarks down + 1 quark up ▪ Proton : 1 quark down + 2 quarks up ☼☼
« Charge de couleur »	▪ Tout hadron a la couleur blanche, exemples : ○ Couleur + anti-couleur = blanc ○ Bleu + rouge + vert = blanc ○ Anti-bleu + anti-rouge + anti-vert = blanc

Particules élémentaires : FERMIONS	
LEPTONS	
6 sortes de particules	▪ 3 Leptons chargés : électron ☼☼☼ , muon, tau ○ Charge = - e ▪ 3 Leptons neutres appelé neutrinos : électronique, muonique, tauique ▪ A chaque lepton correspond son anti-lepton
Pas de formation de particules composites	▪ Car leptons insensibles à l'interaction forte

Particules élémentaires : FERMIONS				
LEPTONS ET ANTI-LEPTONS : CARACTÉRISTIQUES				
	Particule	Anti-particule	Masse (MeV/c ²)	Durée de vie (s)
1 ^{ère} génération	Electron e^-	Positon e^+ $\otimes$	0,511	stable
	Neutrino ν_e	Anti-neutrino $\bar{\nu}_e$	$< 14.10^{-6}$	stable
2 ^{ème} génération	Muon μ^-	Anti-muon μ^+	105,66	$2,2.10^{-6}$
	Neutrino ν_μ	Anti-neutrino $\bar{\nu}_\mu$	$< 0,25$	stable
3 ^{ème} génération	Tau τ^-	Anti-tau τ^+	1748,2	$4,6.10^{-13}$
	Neutrino ν_τ	Anti-neutrino $\bar{\nu}_\tau$	< 35	stable

PARTICULES ELEMENTAIRES	
BOSONS	
Graviton	Particule hypothétique : pas encore observée
Photon	Masse et charge nulles
Gluon $\otimes$	Masse et charge nulles
Bosons intermédiaires	- Bosons W^+ et W^- W^+ : Charge = +e W^- : Charge = -e - Masse = 80,4 GeV/c² - Boson Z - Charge nulle - Masse = 91,2 GeV/c²
Boson de Higgs	- Charge et spin nuls - Masse = 126 GeV/c²

LES 4 FORCES FONDAMENTALES	
FORCE DE GRAVITATION	
Boson associé	▪ Graviton
Force attractive	▪ Entre 2 masses m et m' quelle que soit la distance r qui les sépare ○ Portée infinie ∞ ▪ Force dominante à l'échelle humaine et des astres (cosmos)
Intensité de la force	▪ Interaction de type Newtonienne ▪ $F = G \times \frac{m \times m'}{r^2}$ ○ Plus les masses sont éloignées, plus la force est faible ○ Plus la masse est importante, plus l'attraction est forte ○ G = constante universelle de gravitation ○ $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$
Energie potentielle	▪ $E_p = G \times \frac{m \times m'}{r}$

LES 4 FORCES FONDAMENTALES	
FORCE DE COULOMB = INTERACTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE	
Boson associé	▪ Photon ∞
Force attractive ou répulsive	▪ Entre 2 charges q et q' quelle que soit la distance r qui les sépare ○ Portée infinie ▪ Force dominante à l'échelle de l'atome et des molécules ○ Force responsable de la cohésion des atomes en liant les électrons négatifs au noyau positif ○ Permet aux atomes de former des molécules ▪ Force qui régit tous les phénomènes électriques et magnétiques ○ Deux pôles d'aimants de même signe (N ou S) se repoussent ○ Deux pôles d'aimants de signes opposés (N et S) s'attirent
Intensité de la force	▪ $F = K \times \frac{q \times q'}{r^2}$ ○ K = constante fondamentale électrostatique ○ $K = 1/4\pi\epsilon_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N.m}^2.\text{C}^{-2}$
Energie potentielle	▪ $E_p = K \times \frac{q \times q'}{r}$
Théorie de l'électromagnétisme	▪ Par J.C. Maxwell vers 1864 ▪ Explique l'existence d'ondes électromagnétiques : ondes radio, infra-rouge, lumière, ultra-violet, rayons X et gamma, ... ▪ Reformulation au XXe siècle par le physicien Feynman sous la forme de l'électrodynamique quantique ○ Introduction des concepts quantiques ○ Description de l'interaction comme un échange de photon

LES 4 FORCES FONDAMENTALES	
INTERACTION NUCLÉAIRE FORTE = FORCE DE COULEUR	
Boson associé	▪ Gluon ☼
Force attractive	▪ Force dominante dans le noyau ○ Permet la cohésion des noyaux ☼☼ en liant les protons et les neutrons ▪ Force impliquée dans les réactions nucléaires ○ Au sein du soleil par exemple ▪ 100 à 1000 fois plus forte que l'interaction de Coulomb
Effet sur les quarks	▪ Force qui permet de lier et confiner les quarks au sein du proton et du neutron ▪ Interaction attractive entre 2 quarks : échange d'un gluon ○ Provoque un changement de la charge de couleur ○ Sans changement de la saveur du quark
Energie potentielle entre 2 nucléons	▪ $E_p = g \times \frac{e^{-\mu \cdot r}}{r}$ ○ g : constante de couplage
Portée	▪ De l'ordre du femtomètre : 10^{-15} m ☼☼ ▪ Caractérisée par la distance $r_0 = \frac{1}{\mu}$ ○ Pour $r = 2$ ou $3 r_0$: l'interaction devient nulle

LES 4 FORCES FONDAMENTALES	
INTERACTION FAIBLE	
Bosons associés	▪ Bosons intermédiaires : bosons W^+, W^- et Z ☼
Particules affectées	▪ Tous les fermions
Intensité faible	▪ 10^7 fois plus faible que l'interaction forte ☼
Très courte portée : subatomique	▪ De l'ordre de 10^{-17} m ☼ ▪ Peut changer la saveur d'un quark ▪ Peut transformer un proton en neutron et inversement
Responsable de la radioactivité bêta ☼	▪ Exemple d'application : datation au carbone 14 permet de dater des objets de quelques centaines d'années à 50 000 ans environ ▪ Désintégration bêta + : un quark « u » se transforme en un quark « d » par échange d'un boson W^+ ○ Effet : un proton devient un neutron

FORCES INTERATOMIQUES ET INTERMOLECULAIRES	
Forces attractives	- Interaction covalente entre 2 atomes - Attraction entre deux ions : Force ionique - Attraction entre un ion et un dipôle : Force ionique - Interactions dipolaires = forces de Van der Waals - Interaction électrique d'intensité faible à courtes distances entre atomes et/ou molécules ⚡ - Liaison hydrogène - Interaction entre un atome d'hydrogène et un atome électronégatif comme l'oxygène, l'azote et le fluor
Forces répulsives	- Forces de Born ou Pauli - Empêchent l'interpénétration des nuages électroniques
Action résultante	Force d'interaction = $f(r)$ Système stable lorsque $r = r_m$

FORCES INTERATOMIQUES ET INTERMOLECULAIRES FORCES DE VAN DER WAALS	
Entre 2 dipôles permanents	= Forces de Keesom = Force entre molécules polaires
Entre dipôle permanent et dipôle induit	= Forces de Debye = Force entre une molécule polaire et une autre qui peut être polaire ou apolaire
Entre 2 dipôles induits	= Forces de London - Principe : Une légère répartition inhomogène du nuage électronique dans une molécule crée un dipôle induit qui lui-même va entraîner la création d'un dipôle induit sur la molécule voisine = Force qui peut avoir lieu a priori entre une molécule polaire ou apolaire et une autre molécule polaire ou apolaire - Mais qui est prépondérante entre molécules apolaires

MATIÈRE = CE QUI COMPOSE TOUT CORPS AYANT UNE RÉALITÉ TANGIBLE	
Etat de la matière	Correspond à un ensemble de grandeurs macroscopiques induisant des propriétés physiques
3 états physiques fondamentaux	- Etat solide : molécules ordonnées, en contact, immobiles mais vibrent sur place - Etat liquide : molécules désordonnées, glissant les unes sur les autres - Etat gazeux : molécule désordonnées, espacées, agitées - Cas particulier : plasma = gaz dont les atomes, sous l'effet et de la température, ont été dissociés
Exemples d'autres états	- Cristal liquide - Etat superfluide
Du macroscopique au microscopique	- Dimension du macroscopique : 10^{-2} m - Dimension d'un atome : 10^{-10} m

3 ETATS PHYSIQUES FONDAMENTAUX SOLIDE	
Energie liaison >>> Energie cinétique moyenne ☼	- Interactions atomiques/ moléculaires bien plus fortes que l'agitation thermique - Particules liées les unes aux autres par des liaisons chimiques qui fixent leurs positions relatives - Etat condensé
Etat cohérent	Organisation selon un motif spatial répété
Incompressible : état compact	- Volume propre - En fait : très difficilement compressible
Forme propre rigide	- Etat non fluide - Déformation possible sous l'effet de contraintes - Déformations dépendent de l'élasticité et de la ductilité - Pas de rupture à l'étirement

3 ETATS PHYSIQUES FONDAMENTAUX LIQUIDE	
Energie liaison $\approx$ Energie cinétique moyenne	- Forces de cohésion insuffisantes pour réaliser un état solide mais suffisantes pour réaliser un état dense - Etat désordonné - Energie de liaison : rassemblement - Energie cinétique d'agitation thermique : dispersion
Etat cohérent	= Non dispersé - Les molécules sont capables de quitter leur voisine mais tombent rapidement sous l'emprise d'une autre molécule proche = cohérence
Incompressible : état compact	- Volume propre - En fait : très difficilement compressible
Pas de forme propre	- Etat fluide - La forme du liquide prend celle du récipient qui le contient avec une surface libre au repos plane et horizontale

3 ETATS PHYSIQUES FONDAMENTAUX GAZ	
Energie liaison $\lll$ Energie cinétique moyenne	- L'agitation thermique est très largement supérieure aux interactions atomiques ou moléculaires Forces de cohésion nulles - Etat désordonné
Etat non cohérent	- Les particules sont très faiblement liées les unes aux autres : indépendantes - Etat dispersé
Etat compressible et fluide	- Pas de forme propre ni de volume propre : un gaz occupe tout le volume disponible - Masse volumique faible

AUTRES CARACTÉRISATION DES ÉTATS DE LA MATIÈRE	
Matière condensée non fluide	▪ Matière condensée se différenciant des gaz par la densité ▪ Exemples : ○ Cristaux solides : caractérisés par la répétition périodique dans l'espace d'un motif atomique ou moléculaire ○ Cristaux liquides : les molécules ne sont pas fixées, on définit une sorte de moyenne d'orientation des molécules
Matière condensée fluide	▪ Matière condensée se différenciant des solides par la capacité de mouvements moléculaires de translation et des gaz par la densité
Etat plasma	▪ Pas de forme propre ni de volume propre ▪ Forme fluidique ▪ Pas d'énergie stable mesurable ▪ Gaz hautement ionisé
Matière molle	▪ Définit par Pierre-Gilles de Gennes lors de son prix Nobel 1991 ▪ Liquides complexes ou liquides simples dans un état complexe ▪ Cristaux liquides ou matériaux composites ▪ Mélanges hétérogènes d'au moins 2 constituants à qui le mélange confère un caractère paradoxal ou ambigu ○ Exemples : sable, mousse à raser, pétrole, ...

MATIÈRE : 2 CATÉGORIES	
Corps pur = matière qui contient une seule espèce chimique	▪ Très rares dans la nature ▪ Corps pur simple = matière constituée d'un seul type d'atome ○ Exemple : une barre de fer est uniquement constituée d'atomes de fer ▪ Corps pur composé = matière constituée d'un seul type de molécule ○ Exemple : la molécule d'eau H_2O est constituée de 2 atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène
Mélanges = matière qui contient plusieurs espèces chimiques	▪ Mélange homogène ▪ Mélange hétérogène