

Cours de Physique Statistique Avancée

Professeur Mabrouk Benhamou
Faculté des Sciences à Meknès

Public cible
Étudiants de Licence SMP
Semestre 6

Année académique 2020

Chapitre 1

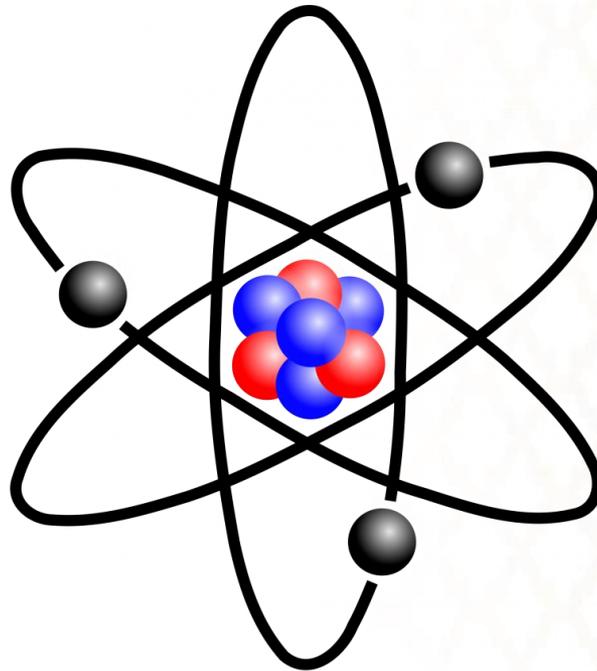
Rôle de la Physique Statistique

Contenu du Chapitre 1

- 1. Constituants élémentaires de la matière.**
- 2. Forces fondamentales.**
- 3. Divers états de la matière.**
- 4. Nature statistique des systèmes.**
- 5. Nature des degrés de liberté.**

1. Constituants élémentaires de la matière.

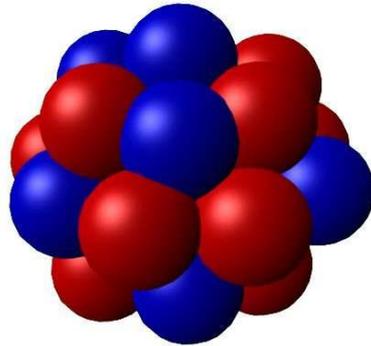
Matière : faite de "briques élémentaires" qui sont les **atomes**.



Atome : constitué d'un **noyau** central, autour duquel "gravitent" des **électrons**.

Différentes matières : se distinguent par la nature de leurs atomes: Propriétés physiques et chimiques différentes.

Noyau : formé par des **nucléons** qui sont les **protons** et les **neutrons**.



Proton : Masse supérieure à celle de l'électron, de charge électrique égale et opposée à celle de l'électron.

Atome est neutre : Autant d'électrons que de protons.

Neutron : une particule **neutre**, de masse rigoureusement identique à celle du proton (symétrie d'isospin).

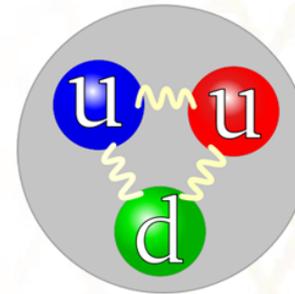
Isotopes : ayant des noyaux de même nombre de protons, mais le nombre de neutrons est différent.

Quarks : Nucléons sont formés par d'entités infimes, appelées "**quarks**" qui sont au nombre de **six** et portent des **charges fractionnaires**.

mass →	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²
load →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
name →	u up	c charm	t top
	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	d down	s strange	b bottom

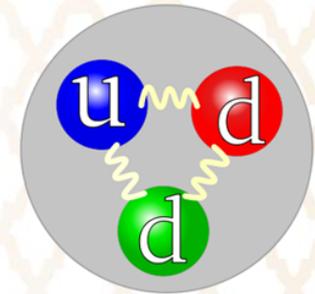
Quark

Proton



2 quarks up
1 quark down

Neutron



1 quark up
2 quarks down

Trois familles de particules élémentaires :

- *Hadrons* (particules lourdes, comme les neutrons et les protons...).
- *Leptons* (particules légères, comme l'électron, le positron, le neutrino, le muon...).
- *Particules instables* (hypérons...).

Antimatière : Même masse que la matière, mais de charge opposée.

- Matière + Antimatière → *Annihilation*.
- Il y a plus de matière que d'antimatière.

Antiparticules : Les particules élémentaires et les quarks ont leurs propres antiparticules :

- $p \rightarrow \bar{p}$,
- $n \rightarrow \bar{n} = n$,
- $\pi^0 = (u\bar{u})$.

Molécules : {Atomes}, liés chimiquement par des liaisons covalentes :

- **Molécules simples** : O_2 , N_2 , H_2 , CO , H_2O , ...
- **Macromolécules** : Polymères, cellules biologiques....

2. Forces fondamentales.

Quatre forces fondamentales : régissent la cohésion de la matière dans l'Univers :

- **Force nucléaire ou force forte** : Cohésion entre protons et neutrons ou entre quarks; portée de l'ordre de 10^{-13} cm.
- **Force faible** : Radioactivité usuelle et la désintégration des particules élémentaires; portée de l'ordre de 10^{-15} cm.

- **Force électromagnétique** : Phénomènes électromagnétiques; portée infinie.
- **Force gravitationnelle** :
 - ✓ Force gravitationnelle classique : Attraction entre les objets massifs; portée infinie.
 - ✓ Force gravitationnelle quantique : Attraction entre les particules élémentaires; portée de l'ordre de 10^{-30} cm (distance de Planck, h/mc^2).

N.B. : Toutes les autres forces ne sont pas fondamentales (force de frottement...).

Unification : Trouver un cadre mathématique dans lequel on étudie à la fois les forces qu'on cherche à unifier.

Première unification est celle de Maxwell :
Unification des forces électrique et magnétique, et le cadre mathématique est les quatre Équations de Maxwell.

Deuxième unification : Celle de la force électromagnétique et la force faible (*force électrofaible*), et le cadre mathématique est la Théorie de Weinberg-Salam-Glashow.

Troisième unification : Celle des forces forte, faible et électromagnétique, et le cadre mathématique est le Modèle Standard.

Quatrième unification : Inclure la force gravitationnelle à côté des trois autres. C'est la préoccupation actuelle des théoriciens des champs.

3. Divers états de la matière.

Quatre états fondamentaux: *État solide, état liquide, état gazeux, état plasma.*

- **État solide (le plus ordonné) :**
 - ✓ Solides réguliers : *Cristaux périodiques.*
 - ✓ Solides irréguliers : *Amorphes.*
- **État liquide (moins ordonné) :** *Ordre local.*
- **État gazeux (désordonné) :** *État dispersé.*
- **État plasma (très désordonné) :** *" Soupe " de charges positives et négatives.*

États intermédiaires : *Entre l'état solide et l'état liquide.*

- **Cristaux liquides** : Molécules allongées (dipolaires) ou *nématiques* (benzoate...) → Affichage électronique, écrans à cristaux liquides (LCD, *Liquid Crystal Display*)...
- **Pâtes** : *Matériaux mous* (dentifrices, crèmes, gels, yaourts, peintures, enduis...) → ...
- **Milieus granulaires** : Sable, riz, blé, maïs...

N.B. : Ces différents états n'ont pas les mêmes propriétés physiques.

4. Nature statistique des systèmes.

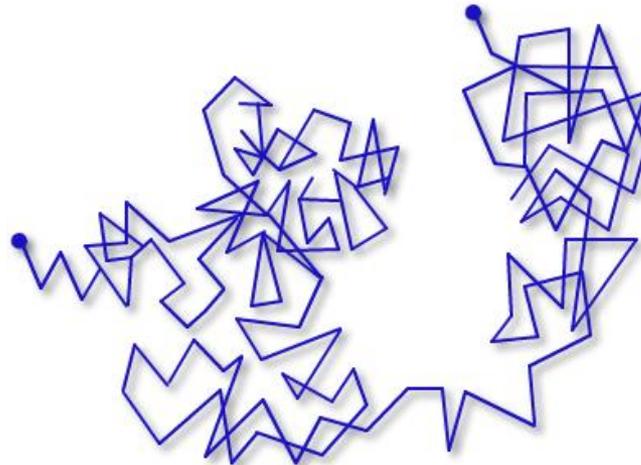
Systemes macroscopiques :

- Les systèmes macroscopiques contiennent un nombre gigantesque de constituants (atomes, molécules, dipôles...) à structure complexe.
- Leur étude microscopique est une tâche ardue, vu l'abondance des degrés de liberté.
- On est amené à résoudre plusieurs équations de Newton ou une équation de Schrödinger dont la solution n'est pas aisée.

- Les **systemes macroscopiques** presentent un **caractere aleatoire**, et ils sont donc de **nature statistique**.

Systemes simples :

- **Mouvement Brownien (Brown, 1826) :**
Une particule en mouvement dans un liquide suit une trajectoire Brownienne.



- **Fou dans un village** : Mouvement aléatoire.
- **Chat errant** : Mouvement aléatoire.
- **Ivrogne** : Mouvement aléatoire.
- **Évadé d'une prison** : Mouvement aléatoire.
- **Individu atteint de la maladie Alzheimer** : Déplacement aléatoire.
- **Voleur dans un souk** : Issue avec probabilité.

N.B.: Le dénominateur commun de ces systèmes simples est qu'ils empruntent une trajectoire aléatoire, donc imprévisible.

Rôle de la Physique Statistique :

- Les deux systèmes statistiques sont gouvernés par une loi de probabilité qui sert à calculer les valeurs moyennes des observables.
- La branche de la Physique qui étudie les systèmes statistiques est la **Physique Statistique**, permettant de relier les propriétés microscopiques aux propriétés macroscopiques.

• **Physique Statistique Classique** étudie les systèmes macroscopiques classiques :

- Objet de base est la densité en phase.
- Espace des états : Espace de phases.

• **Physique Statistique Quantique** étudie les systèmes macroscopiques quantiques :

- Objet de base est l'opérateur densité.
- Espace des états : Espace de Hilbert.

5. Nature des degrés de liberté.

Degrés de liberté : Deux types de degrés de liberté, pour un système macroscopique.

- **Degrés de liberté internes** : *Spin, mouvement relatif des électrons autour du noyau, rotation et vibration des atomes...*

- **Degrés de liberté de translation** :
Opérateurs position et impulsion $\left(\hat{r}_j, \hat{p}_j = \frac{\hbar}{i} \vec{\nabla}_j\right)$, qu'on peut traiter d'une manière classique \rightarrow (\vec{r}_j, \vec{p}_j) .

Effets quantiques : Soit un système physique et soit Φ une de ses grandeurs. On désigne par Φ_c la valeur classique de cette grandeur :

$$\Phi = \Phi_c + \Delta\Phi$$



Correction quantique

Soit $\delta\Phi$ l'incertitude commise dans la mesure de Φ :

- $\delta\Phi \gg \Delta\Phi$; système est classique.
- $\delta\Phi \ll \Delta\Phi$; système est quantique.

Nomenclatures :

- **Physique Statistique Quantique** : On ne peut ignorer les degrés de liberté internes.
- **Physique Statistique Classique** : On peut ignorer les degrés de liberté internes et traiter les degrés de liberté de translation d'une manière classique. ■