Physique générale I

Mécanique Chap. 1 : Introduction

Bjorn Maes, Michel Voué

Université de Mons

Pourquoi étudier la physique ?

Une base scientifique Des principes très généraux, comprendre ce qu'on voit tous les jours.

Modéliser Description qualitative et quantitative des expériences.

Sociétés technologiques Les systèmes complexes.

Contenu du cours

Qu'est ce que la physique ?

La physique (grec ancien : fusiké) est étymologiquement la science de la nature.

Son champ d'application actuel est néanmoins plus restreint : la physique décrit de façon quantitative et conceptuelle la composition et le comportement de la matière et ses interactions au niveau le plus fondamental. Elle développe des théories en utilisant l'outil des mathématiques pour décrire et prévoir l'évolution de systèmes. Elle s'applique des constituants du noyau atomique à la compréhension de l'origine et de l'évolution de l'univers.

2 grandes périodes :

A. Physique classique (1600-1900)
B. Physique moderne (1900-. . .)

Physique classique

Mécanique classique : Etude du mouvement des points matériels et des fluides.

Thermodynamique : Etude de la température, des transferts de chaleur et des propriétés des ensembles constitués de nombreuses particules.

Electromagnétisme : Etude de l'électricité, du magnétisme, des ondes électromagnétiques et de l'optique.

Physique moderne

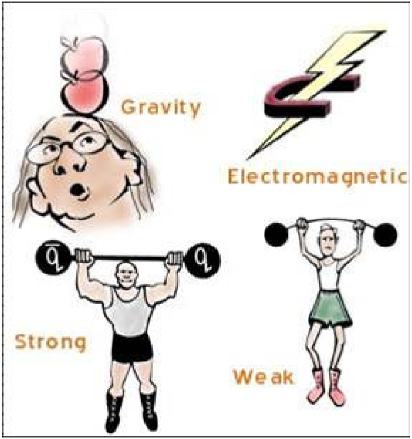
Relativité restreinte : Théorie du comportement des objets animés de grandes vitesses ($v \approx c$). Modification de la notion d'espace, de temps et d'énergie.

Mécanique quantique : Théorie du monde submicronique de l'atome.

Relativité générale : Théorie mettant en relation la force de gravitation et les propriétés géométriques de l'espace.

Les interactions fondamentales

L'explication des phénomènes physiques se fait à partir de **4 interactions fondamentales**.



Interaction gravitationnelle Une force d'**attraction** entre toutes les particules, de longue portée mais d'intensité très faible.

Interaction électromagnétique Une interaction **attractive ou répulsive** de longue portée entre charges électriques.

Interaction nucléaire forte Assure la cohésion du noyau atomique. Intensité bien supérieure à celle de la force électromagnétique pour vaincre la répulsion des protons. La portée est assez courte, de l'ordre des dimensions du noyau atomique.

Interaction nucléaire faible Permet d'établir la désintégration β (la transformation d'un neutron en proton, électron et neutrino). Une interaction faible, de portée très courte.

Intensité relative et portée des interactions fondamentales

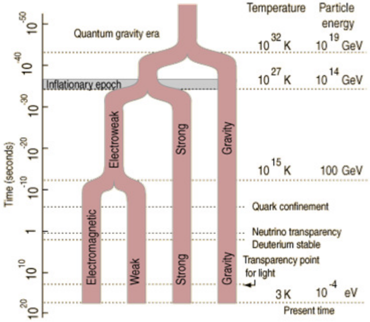
Table – Interactions fondamentales

Interaction	Intensité relative	Portée
Forte	1	10^{-15} m
Electromagnétique	10^{-2}	∞
Faible	10^{-6}	10^{-17} m
Gravitationnelle	10^{-38}	∞

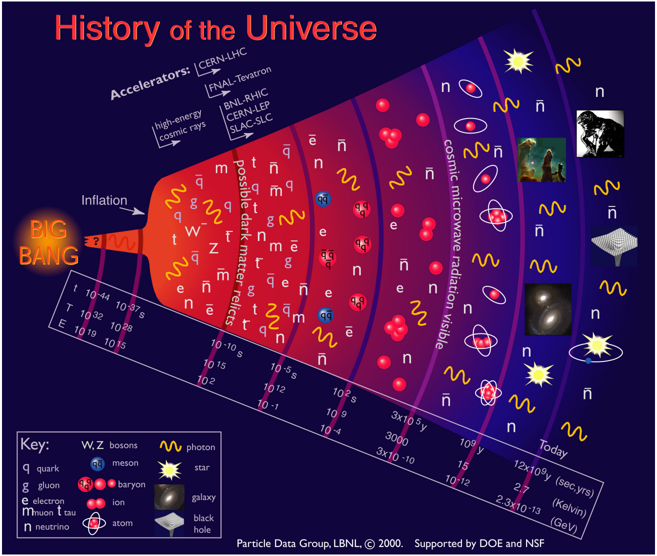
L'unification des interactions

Modèle standard Cadre théorique qui décrit les interactions électromagnétique, faible et forte.

Gravitation Impossibilité d'inclure l'interaction gravitationnelle dans le modèle standard.



Evolution de l’Univers



Le système international d'unités

La valeur d'une grandeur physique s'exprime en fonction d'un étalon ou d'une **unité**. Toute quantité physique peut s'exprimer en fonction de **grandeurs fondamentales**.

Dans le **système international d'unités (SI ou MKSA)**, les grandeurs fondamentales (avec les unités de base) sont :

la longueur	le mètre (*m*)
la masse	le kilogramme (*kg*)
le temps	la seconde (*s*)
l'intensité du courant électrique	l'ampère (*A*)

Pour des raisons pratiques, on a défini d'autres unités fondamentales : le **Kelvin (*K*)** pour la température et le **candela (*Cd*)** pour l'intensité lumineuse.

A chaque unité fondamentale correspond un **étalon** précis.

Mesure de masse

L'unité de masse est le **kilogramme**.

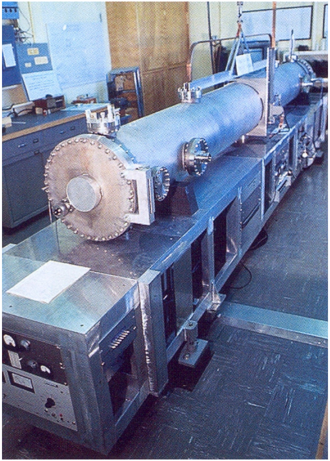
A l'origine, c'est la masse d'un litre d'eau pure à 4°C.
Plus tard, la **masse d'un cylindre de platine iridié** déposé au Bureau international des poids et mesures (Sèvres, FR).
Précision : 10^{-8}

Maintenant (2019), définition avec la constante de Planck.

Mesure de temps

L'unité de temps est la **seconde**.

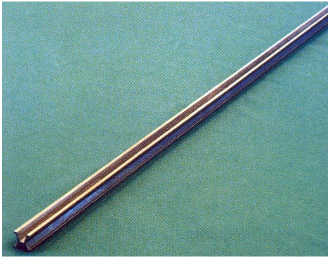
A l'origine, 1/86400 de la durée du jour solaire moyen (1900).
Actuellement, c'est un nombre de vibrations (9 192 631 770) d'une radiation émise par l'atome de césium 133.
Stabilité : 1 seconde sur 300 000 ans.



Mesure de longueur

L'unité de longueur est le **mètre**.

A l'origine (1700), 1/10000000 de la distance entre l'équateur et le pôle nord.
Du 19e siècle : Distance entre deux repères sur une règle de platine iridié.
1960 : Nombre de longueurs d'onde de la radiation orange du Krypton-86.
1983 : Actuellement, la distance parcourue en 1/299792458 seconde par la lumière dans le vide.



Analyse dimensionnelle

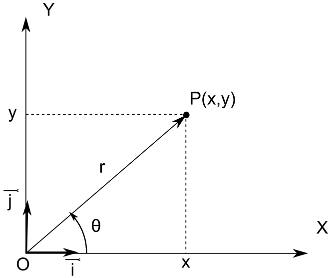
- En mécanique, chaque unité dérivée peut être réduite en facteurs d'unités fondamentales de masse, de longueur et de temps. Ces facteurs sont appelés **dimensions** et sont notés entre crochets.
- Exemple : Une aire A est le produit de deux longueurs. Sa dimension $[A]$ est donc L^2.
- Une équation de type $A = B + C$ n'a de sens que si les dimensions des 3 grandeurs sont identiques. L'équation doit être **homogène en dimensions**.

L'analyse dimensionnelle consiste à vérifier l'homogénéité dimensionnelle des expressions algébriques. Elle ne garantit toutefois pas que l'équation établie soit correcte.

Référentiels et systèmes de coordonnées

- La position d'un corps ne peut être définie que par rapport à un **référentiel**.
- La position est alors exprimée par rapport à un **système de coordonnées**. Ce système est constitué d'un ensemble d'**axes** dont chacun correspond à une **direction de l'espace**.

Dans un système de coordonnées **cartésiennes**, les axes sont notés X, Y et Z. Ils sont perpendiculaires entre eux et se coupent à l'origine.



Grandeurs physiques

Dans le cadre de ce cours, nous considérerons *2 types de grandeurs physiques* : les **grandeurs scalaires** et les **grandeurs vectorielles**.

Scalaires
: Uniquement définies par une valeur numérique et une unité. Elles n'ont pas d'orientation. Elles obéissent aux lois de l'algèbre ordinaire. Exemple : la masse.

Vectorielles
: Nécessitent plusieurs valeurs numériques pour être complètement définies (direction, sens, module). Elles obéissent aux lois de l'algèbre vectorielle. Les grandeurs vectorielles sont notées $\vec{v}$. Exemple : la vitesse.

Rappel : Propriétés élémentaires des vecteurs

- Multiplication par un scalaire ($\vec{A} \to \alpha\vec{A}, \alpha \in \mathbb{R}$) : cela revient à modifier le module du vecteur.
  Note : Si le scalaire α est une grandeur physique ayant des unités, le vecteur $\alpha\vec{A}$ correspond à une **grandeur physique différente** de $\vec{A}$.
- L'addition des vecteurs est **commutative** :
  $\vec{A} + \vec{B} = \vec{B} + \vec{A}$
  et **associative** :
  $(\vec{A} + \vec{B}) + \vec{C} = \vec{A} + (\vec{B} + \vec{C})$

Composantes

Dans un référentiel cartésien (OXY), une grandeur vectorielle $\vec{A}$ peut être définie à partir de ses projections sur les axes respectifs comme $\vec{A} = \vec{A}_x + \vec{A}_y$.

Les composantes vectorielles de la résultante $\vec{R} = \vec{A} + \vec{B}$ sont données par

$$\vec{R}_x = \vec{A}_x + \vec{B}_x$$
$$\vec{R}_y = \vec{A}_y + \vec{B}_y$$

Vecteurs unitaires

On introduit des **vecteurs unitaires** (sans dimension) $\vec{i}$, $\vec{j}$ et $\vec{k}$ respectivement alignés suivant l'axe X,Y et Z. Ces vecteurs servent uniquement à définir une **orientation dans l'espace**. Leur module vaut l'unité :

$$\left\|\vec{i}\right\| = \left\|\vec{j}\right\| = \left\|\vec{k}\right\| = 1$$

Un vecteur quelconque $\vec{A}$ peut s'exprimer comme la somme vectorielle de multiples de ces vecteurs unitaires :

$$\vec{A} = A_x\vec{i} + A_y\vec{j} + A_z\vec{k}$$

avec A_x, A_y, et A_z les **composantes scalaires**.
Le module de $\vec{A}$ est obtenu en généralisant le théorème de Pythagore à trois dimensions :

$$\left\|\vec{A}\right\| = A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$$

Egalité vectorielle

L'égalité vectorielle $\vec{A} = \vec{B}$ s'écrit

$$A_x\vec{i} + A_y\vec{j} + A_z\vec{k} = B_x\vec{i} + B_y\vec{j} + B_z\vec{k}$$

Comme les vecteurs $\vec{i}$, $\vec{j}$ et $\vec{k}$ sont perpendiculaires, cette équation est satisfaite uniquement si et seulement si

$$A_x = B_x \qquad A_y = B_y \qquad A_z = B_z$$

L'équation vectorielle dans un espace de dimension n est donc équivalente à n équations scalaires obtenues sur les axes.

Vecteur unitaire quelconque

Il est possible d'associer à un vecteur $\vec{A}$ un **vecteur unitaire** noté $\vec{u}_A$ dont l'orientation est identique à celle de $\vec{A}$ et qui possède un module unité.

$\vec{u}_A$ est obtenu en divisant $\vec{A}$ par son module $\left\|\vec{A}\right\|$:

$$\vec{u}_A = \frac{\vec{A}}{\left\|\vec{A}\right\|} = \frac{A_x}{\left\|\vec{A}\right\|}\vec{i} + \frac{A_y}{\left\|\vec{A}\right\|}\vec{j} + \frac{A_z}{\left\|\vec{A}\right\|}\vec{k}$$

Produit scalaire

Le **produit scalaire** de deux vecteurs $\vec{A}$ et $\vec{B}$ est égal, par définition, à

$$\boxed{\vec{A} \cdot \vec{B} = AB\cos\theta}$$

où A et B sont les modules de $\vec{A}$ et $\vec{B}$ et où θ est l'angle entre les deux vecteurs.

Ce produit est un scalaire. Physiquement, il correspond à multiplier le module d'un des deux vecteurs (A ou B) par la projection du second sur l'orientation du premier ($B\cos\theta$ ou $A\cos\theta$).

Le produit scalaire est **commutatif** ($\vec{A} \cdot \vec{B} = \vec{B} \cdot \vec{A}$) et **distributif** ($\vec{A} \cdot (\vec{B} + \vec{C}) = \vec{A} \cdot \vec{B} + \vec{A} \cdot \vec{C}$).

Note : le produit scalaire entre deux vecteurs perpendiculaires est 0.

Produit scalaire et composantes

Les produits scalaires des vecteurs unitaires $\vec{i}$, $\vec{j}$ et $\vec{k}$ sont

$$\vec{i}\cdot\vec{i} = \vec{j}\cdot\vec{j} = \vec{k}\cdot\vec{k} = 1$$
$$\vec{i}\cdot\vec{j} = \vec{j}\cdot\vec{k} = \vec{k}\cdot\vec{i} = 0$$

En décomposant les vecteurs $\vec{A}$ et $\vec{B}$ suivant les axes de coordonnées, on trouve que

$$\vec{A}\cdot\vec{B} = A_x B_x + A_y B_y + A_z B_z = \sum_{j=1}^{n} A_j B_j$$

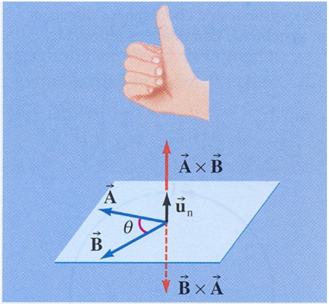
Remarque : Si $\vec{B} = \vec{A}$, on a $\boxed{\vec{A}\cdot\vec{A} = A^2}$

Produit vectoriel

Le **produit vectoriel** de deux vecteurs $\vec{A}$ et $\vec{B}$ est égal, par définition, à

$$\boxed{\vec{A} \times \vec{B} = AB \sin\theta \ \vec{u}_n}$$

où A et B sont les modules de $\vec{A}$ et $\vec{B}$ et où θ est l'angle entre les deux vecteurs.
$\vec{u}_n$ est un vecteur unitaire normal au plan formé par les vecteurs $\vec{A}$ et $\vec{B}$, et dont le sens est donné par la **règle de la main droite**.



Le produit vectoriel est **anti-commutatif** :

$$\vec{A} \times \vec{B} = -\vec{B} \times \vec{A}$$

Le produit vectoriel est **distributif** :

$$\vec{A} \times (\vec{B} + \vec{C}) = \vec{A} \times \vec{B} + \vec{A} \times \vec{C}$$

Note : le produit vectoriel entre deux vecteurs parallèles est 0.

Produit vectoriel et composantes

Dans un système direct, les produits vectoriels des vecteurs unitaires $\vec{i}$, $\vec{j}$ et $\vec{k}$ sont

$$\vec{i} \times \vec{i} = \vec{0} \qquad \vec{j} \times \vec{j} = \vec{0} \qquad \vec{k} \times \vec{k} = \vec{0}$$
$$\vec{i} \times \vec{j} = \vec{k} \qquad \vec{j} \times \vec{k} = \vec{i} \qquad \vec{k} \times \vec{i} = \vec{j}$$
$$\vec{i} \times \vec{k} = -\vec{j} \qquad \vec{k} \times \vec{j} = -\vec{i} \qquad \vec{j} \times \vec{i} = -\vec{k}$$

L'égalité vectorielle $\vec{C} = \vec{A} \times \vec{B}$ s'écrit en termes des composantes :

$$\begin{aligned} C_x &= A_y B_z - A_z B_y \\ C_y &= A_z B_x - A_x B_z \\ C_z &= A_x B_y - A_y B_x \end{aligned}$$

Symboliquement, il peut être écrit sous forme d'un déterminant :

$$\vec{A} \times \vec{B} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ A_x & A_y & A_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} = \vec{i} \begin{vmatrix} A_y & A_z \\ B_y & B_z \end{vmatrix} - \vec{j} \begin{vmatrix} A_x & A_z \\ B_x & B_z \end{vmatrix} + \vec{k} \begin{vmatrix} A_x & A_y \\ B_x & B_y \end{vmatrix}$$