

**Physique
Générale :
Mécanique**

**04.02:
Les forces
fondamentales et
autres, forces de
frottements**

**Sections
SC, GC & SIE , BA1**

Version du 05.09.2024

Dr. J.-P. Hogge

Swiss Plasma Center

**École polytechnique
fédérale de
Lausanne**

■ Les forces fondamentales

- Gravitation
- Force électromagnétique
- Interaction forte
 - Interaction faible

■ Forces non fondamentales

■ Modèles:

- Forces de frottements
 - Frottements secs statiques
 - Frottements secs cinétiques
 - Frottements visqueux
- Force de rappel d'un ressort

- Force **attractive** entre les masses M_A et m_B en interaction

$$\vec{F}_{A \rightarrow B} = -G \frac{M_A m_B}{r^2} \hat{r} = -\vec{F}_{B \rightarrow A}$$

 $\vec{F}_{A \rightarrow B}$

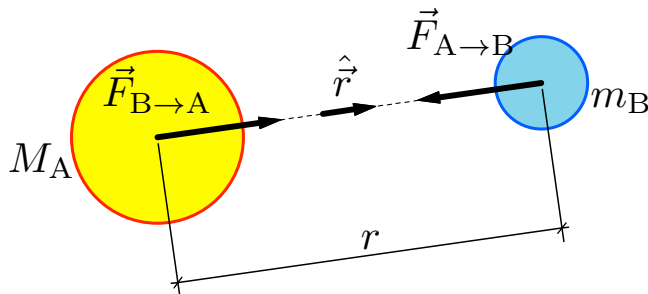
Force exercée par la masse A sur la masse B

 $\vec{F}_{B \rightarrow A}$

Force exercée par la masse B sur la masse A

- G : constante de la gravitation universelle

$$G = 6.6732 \cdot 10^{-11} \left[\frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2} \right]$$



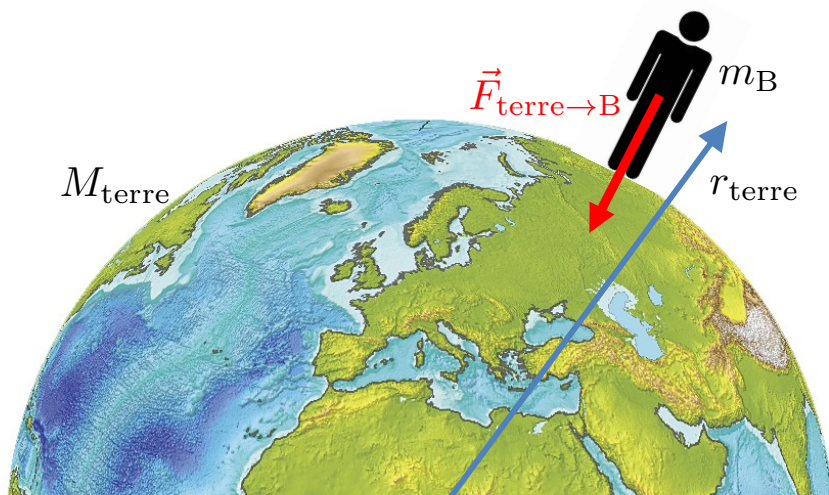
- Force de portée 'infinie' (décroît en $\frac{1}{r^2}$)

- Les forces $\vec{F}_{A \rightarrow B}$ et $\vec{F}_{B \rightarrow A}$ sont **égales en intensité et opposées en direction**

- A la surface de la terre. La force d'attraction terrestre (=poids) ressentie par un objet de masse m_B est:

$$\begin{aligned}\vec{F} &= -G \frac{M_{\text{terre}} m_B}{r_{\text{terre}}^2} \hat{e}_r = -6.6732 \cdot 10^{-11} \frac{5.9722 \cdot 10^{24}}{(6.371 \cdot 10^6)^2} m_B \hat{e}_r \\ &= -m_B 9.81 \hat{e}_r = m_B \vec{g} \quad \left[\frac{\text{kg m}}{\text{sec}^2} \right]\end{aligned}$$

- $\vec{g} = 9.81 \left[\frac{\text{kg m}}{\text{sec}^2} \right]$: **champ de gravitation** de la terre



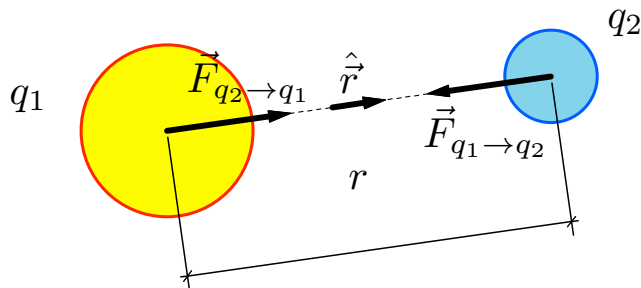
Forces fondamentales:

2. Interaction électromagnétique

- S'exerce sur des particules chargées (électrons, ions), par l'intermédiaire de champs (qu'on appellera **champ électrique** et **champ magnétique**) créés par celles-ci.
- **Force de Coulomb**: s'exerce entre deux particules chargées au repos ou en mouvement.

$$\vec{F}_{q_1 \rightarrow q_2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} = -\vec{F}_{q_2 \rightarrow q_1}$$

- ϵ_0 : constante diélectrique du vide $\epsilon_0 = 8.8542 \cdot 10^{-12} \left[\frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V} \cdot \text{m}} \right]$



- **Champ électrique** $\vec{E}(\vec{r})$ crée par la particule de charge q_1 :

$$\vec{F}_{q_1 \rightarrow q_2} = q_2 \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2} \hat{r}$$

$$\vec{F}_{\rightarrow q_2} = q_2 \vec{E} \quad \text{où} \quad \vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2} \hat{r} \quad \vec{E} \quad \left[\frac{\text{V}}{\text{m}} \right]$$

- Remarques:
 - la force de Coulomb a la même forme que la force de gravitation.
 - Comme dans le cas de la gravitation, chaque particule crée son propre champ
 - La force de Coulomb peut être **attractive** (q_1 et q_2 de signes opposés) ou **répulsive** (q_1 et q_2 de même signe).
- Lorsque les particules sont en mouvement, elles créent un **champ magnétique** $\vec{B}(\vec{r})$ qui est à l'origine de la seconde manifestation de l'interaction électromagnétique: La force de Lorentz

- Composante de force due au champ magnétique:

$$\vec{F}_{\text{mag}} = q(\vec{v} \wedge \vec{B})$$

- S'exerce sur une particule chargée en mouvement, perpendiculairement à sa vitesse. Elle est responsable de la trajectoire hélicoïdale des particules chargées dans un champ magnétique uniforme

- **Force de Lorentz:** Interaction électromagnétique dans un champ électrique et magnétique:

$$\vec{F}_{\text{Lorentz}} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

- L'interaction électromagnétique est la mieux décrite et comprise. La branche de la physique qui lui est dédiée est l'électrodynamique.
- Les sources du champ électrique et du champ magnétique sont les particules chargées. Les équations qui décrivent la relation entre les particules chargées, et les champs qu'elles créent sont les **équations de Maxwell**.

Nous ne traiterons pas les deux autres forces fondamentales: **l'interaction forte et l'interaction faible**. Elles sont brièvement décrites à la fin de ce document.

■ Forces de déformation

- Force de rappel d'un ressort, forces de déformation lors d'un choc mou: origine électromagnétique.

■ Force d'Archimède

- « *Tout corps plongé dans un fluide au repos, entièrement mouillé par celui-ci ou traversant sa surface libre, subit une force verticale, dirigée de bas en haut, égale (et opposée) au poids du volume de fluide déplacé.* »
- Dépend de la variation de la pression du liquide en fonction de la profondeur -> origine gravitationnelle et électromagnétique.

■ Forces de frottements

- Frottements secs, visqueux: origine électromagnétique.

■ Forces de contraintes

- Réduisent les possibilités de mouvement du système. Exemples: «la longueur de la ficelle du pendule est constante» -> force de traction dans la corde.

■ Forces d'inertie

- Force centrifuge, force de Coriolis: Forces **fictives** (**non physiques**) introduites pour maintenir la forme de la seconde loi de Newton dans des référentiels non-inertiels (i.e. accélérés).

Modèle: Force de rappel d'un ressort

En régime de déformation élastique, la force de rappel d'un ressort est proportionnelle à sa variation de longueur ($\vec{x} - \vec{x}_0$):

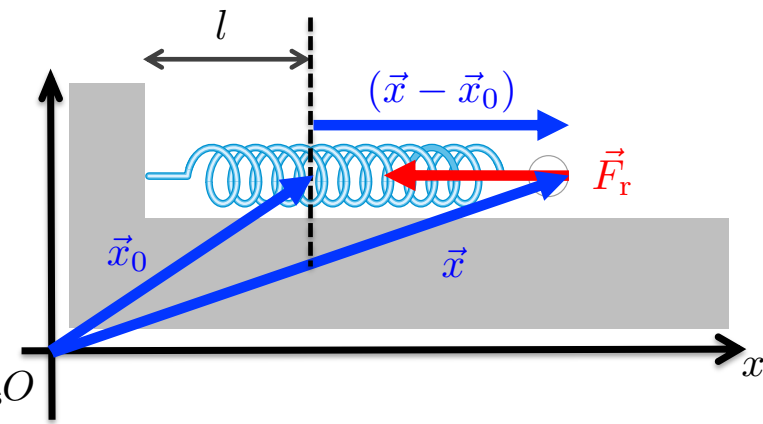
$$\vec{F}_r = -k(\vec{x} - \vec{x}_0)$$

- $\vec{x}$: Position de l'extrémité du ressort
 $\vec{x}_0$: Position de l'extrémité du ressort si il était libre
 l : longueur du ressort au repos

Unités: $[k] = \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}^2} \right]$



Robert Hooke (1635 – 1703)
(Rita Greer 2004)

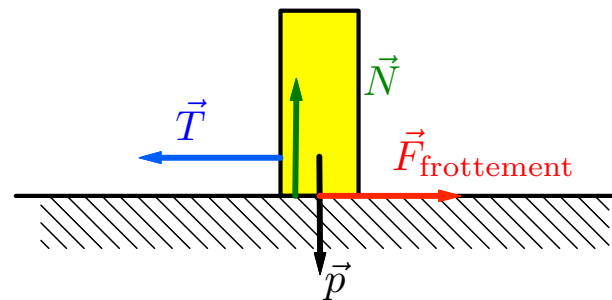
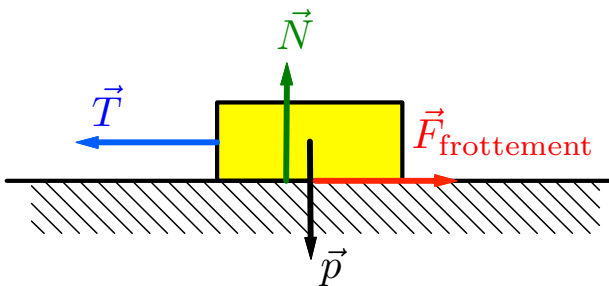


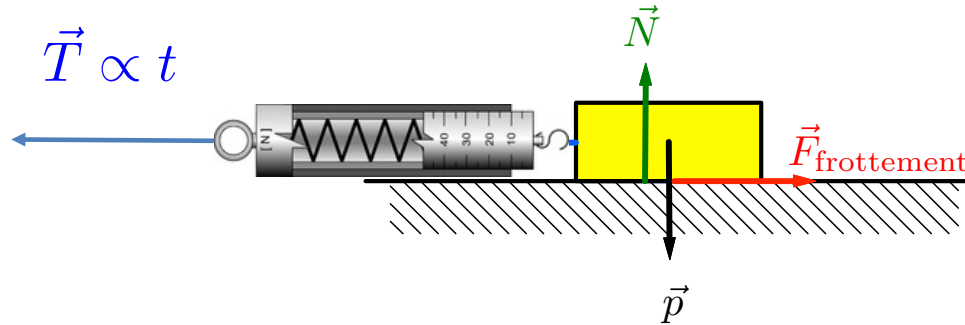
Si on place l'origine du repère de coordonnées à l'extrémité du ressort en position de repos alors la formule se simplifie:

$$\vec{F}_r = -k\vec{x}$$

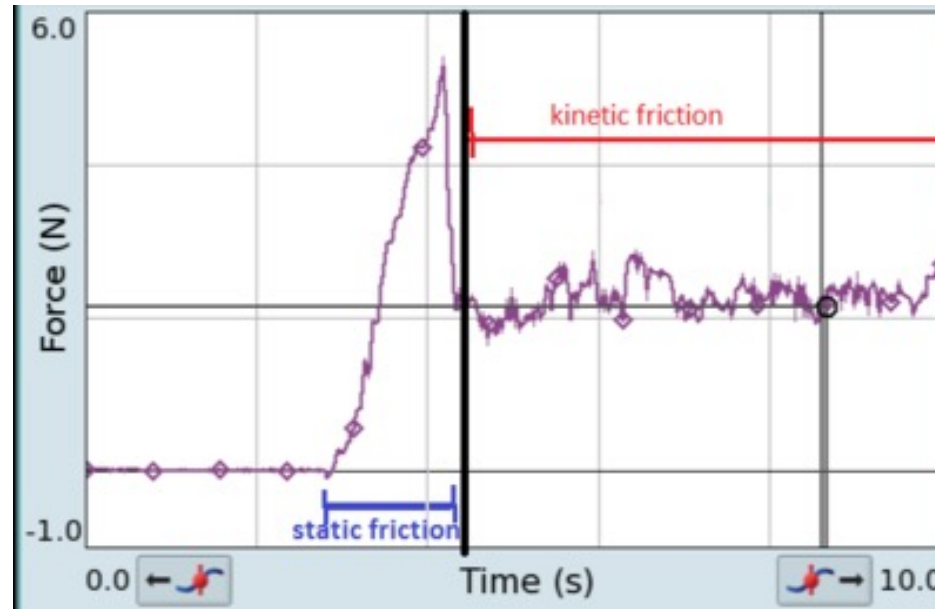
Constatations expérimentales

- Il est difficile de déplacer une caisse en bois sur du béton.
- Plus la caisse est lourde, plus c'est difficile.
- En-dessous d'un certain seuil, la caisse ne bouge pas.
- C'est moins difficile si on la déplace sur de la glace.
- Une fois que la caisse est en mouvement, c'est également plus facile, et le frottement ne dépend pratiquement pas de la vitesse.
- La taille de la surface de contact ne joue quasiment pas de rôle.

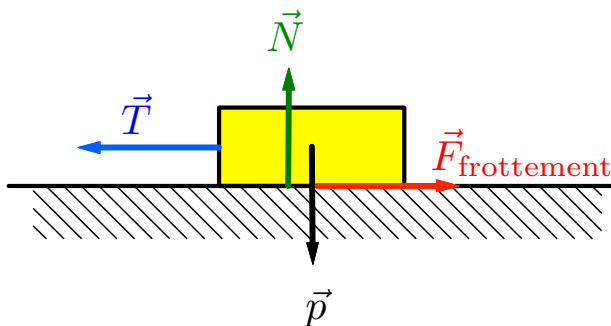




On tire avec une force proportionnelle au temps et on relève la force indiquée par le dynamomètre.

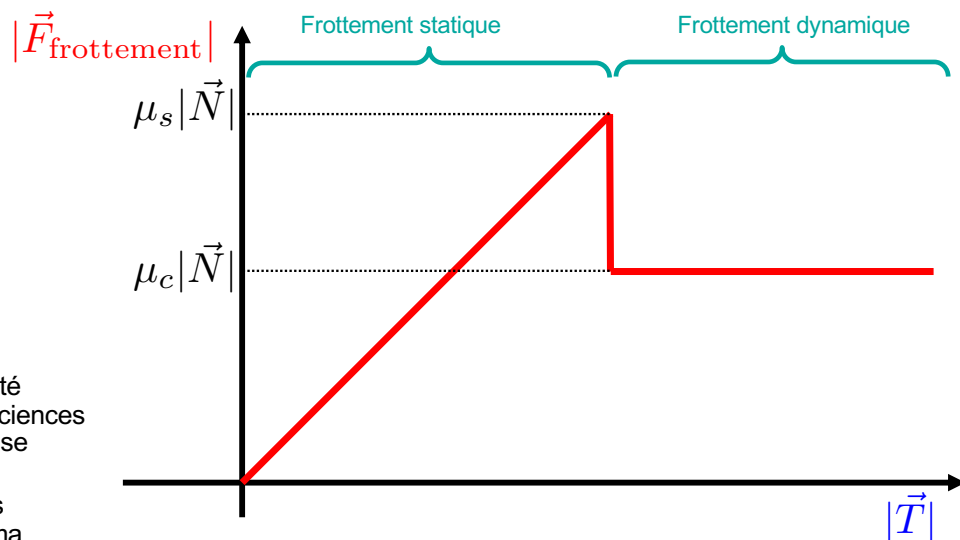


Source: Wikipedia

Modèle: Frottements secs ($\equiv$ qui ne dépendent pas de la vitesse)

$$|\vec{F}_{\text{frottement}}| = \begin{cases} |\vec{T}| & \text{si } |\vec{T}| < \mu_s |\vec{N}| \\ \mu_c |\vec{N}| & \text{si } |\vec{T}| \geq \mu_s |\vec{N}| \end{cases}$$

μ_s : Coefficient de frottement statique
 μ_c : Coefficient de frottement cinétique

Frottement statique:

- Pas de déplacement de l'objet,
- la force de frottement est égale à la force de traction.

Frottement dynamique:

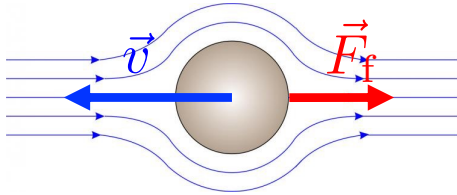
- L'objet se déplace,
- La force de frottement est proportionnelle à la force de soutien exercée par le support, et indépendante de la vitesse

Surface	Coefficient de frottement statique	Coefficient de frottement cinétique
Bois sur bois	0.4	0.2
Glace sur glace	0.1	0.03
Métal sur métal (avec lubrifiant)	0.15	0.07
Acier sur acier (sans lubrification)	0.7	0.6
Pneu sur route sèche	1	0.8
Pneu sur route mouillée	0.7	0.5
Téflon sur Téflon	0.04	0.04
Articulation genou	0.01	0.01

Le coefficient de frottement statique est toujours plus grand que le coefficient de frottement dynamique

Modèle: Frottements visqueux ($\equiv$ qui dépendent de la vitesse)

A **faible vitesse**, (i.e. pour un écoulement laminaire), la force de frottement visqueux exercée par un fluide sur un objet est **proportionnelle à la vitesse** (avec un coefficient b) et elle s'oppose au mouvement.



$$\vec{F}_f = -b\vec{v}$$

$$[b] = \frac{[\text{Force}]}{[\text{vitesse}]} = \left[\frac{\text{kg m}}{\text{s}^2} \right] \left[\frac{\text{s}}{\text{m}} \right] = \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

Le facteur b dépend de la viscosité η du fluide et de la géométrie de l'objet considéré (à travers un coefficient k). Pour une sphère de rayon R :

$$\vec{F}_f = -\overbrace{k\eta}^b \vec{v}$$

Facteur géométrique viscosité

$$k = 6\pi R$$

$$[\eta] = \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right]$$

A **plus grande vitesse** l'écoulement devient turbulent et la force de frottement est **proportionnelle au carré de la vitesse**.

■ 4 forces fondamentales:

■ Force gravitationnelle

$$\vec{F}_{A \rightarrow B} = -G \frac{M_A m_B}{r^2} \hat{r} \quad G = 6.6732 \cdot 10^{-11} \left[\frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2} \right] \quad \text{Constante gravitationnelle}$$

$$\vec{F}_{\rightarrow B} = \vec{F}_{\text{poids}} = -G \frac{M_{\text{terre}}}{r_{\text{terre}}^2} \hat{e}_z m_B = m_B \vec{g}$$

■ Force électromagnétique

Force de Coulomb:

$$\vec{F}_{q_1 \rightarrow q_2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \quad \epsilon_0 = 8.8542 \cdot 10^{-12} \left[\frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V} \cdot \text{m}} \right] \quad \text{Constante diélectrique du vide}$$

$$\vec{F}_{\rightarrow q_2} = q_2 \vec{E} \quad \text{où} \quad \vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2} \hat{r}$$

Force de Lorentz sur une particule de charge q et de vitesse $\mathbf{v}$ dans un champ électrique $\mathbf{E}$ et un champ magnétique $\mathbf{B}$:

$$\vec{F}_{\text{Lorentz}} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$

■ Interaction forte et interaction faible.

■ Force de rappel d'un ressort:

$$\vec{F} = -k \Delta \vec{x}$$

k : Constante du ressort [N/m]
 $\Delta \vec{x}$: Ecart par rapport à la longueur au repos [m]

■ Frottements secs:

$$|\vec{F}_f| = \begin{cases} |\vec{T}| & \text{si } |\vec{T}| < \mu_s |\vec{N}| \\ \mu_c |\vec{N}| & \text{si } |\vec{T}| \geq \mu_s |\vec{N}| \end{cases}$$

μ_s : Coeff. de frottement statique []
 μ_c : Coeff. de frottement cinétique []

■ Frottements visqueux:

$$\vec{F}_f = -b\vec{v}$$

$$[b] = \left[\frac{\text{kg m}}{\text{s}^2} \right] \left[\frac{\text{s}}{\text{m}} \right] = \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

Coeff. de frottement visqueux, dépend de la forme de l'objet

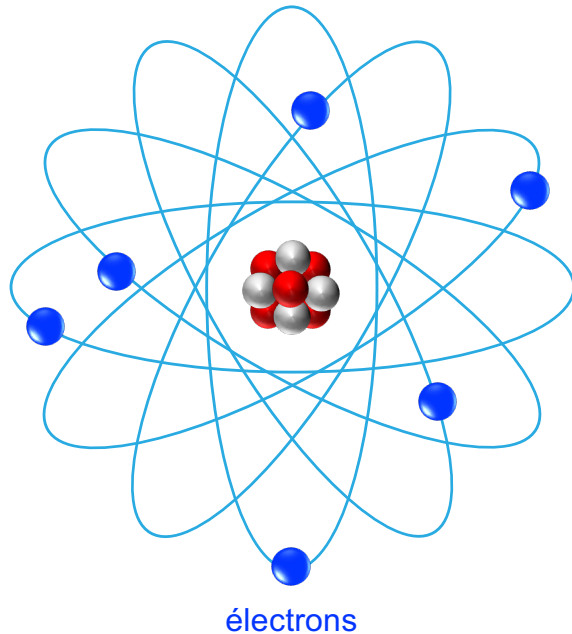
■ Force de rappel d'un ressort:

$$\vec{F}_r = -k(\vec{x} - \vec{x}_0)$$

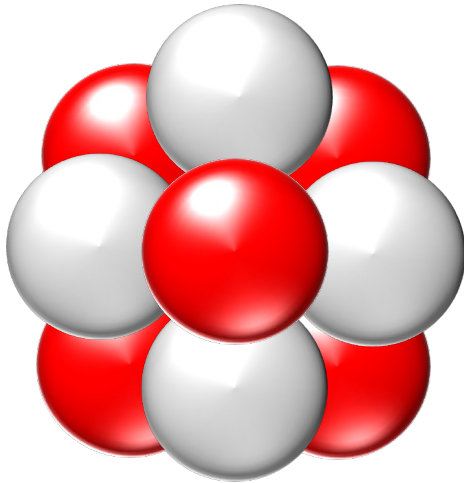
$[k] = \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}^2} \right]$
 $\vec{x}$: Position de l'extrémité du ressort
 $\vec{x}_0$: Position de l'extrémité du ressort si il était libre

Forces fondamentales:

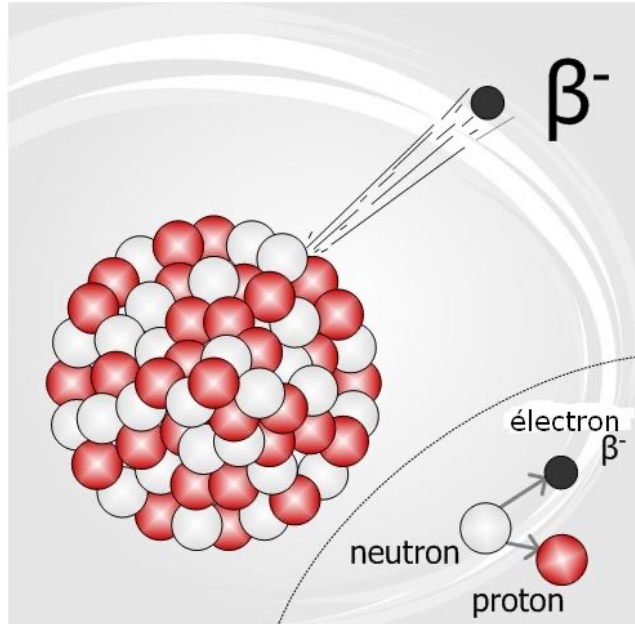
2. Interaction électromagnétique



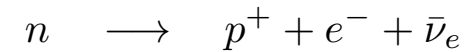
- L'interaction em est responsable de la cohésion des atomes, et de l'agencement des atomes entre eux par des liaisons chimiques.
- Particule messagère: le photon γ
- Nous ne la ressentons pas car les atomes sont globalement neutres.
- Beaucoup de forces que nous ressentons sont d'origine électromagnétique.



- Responsable de la cohésion du noyau atomique.
- Portée très courte
- Très intense
- L'intensité augmente avec la distance.
- Ne dépend pas de la charge
- Particule messagère: le gluon.

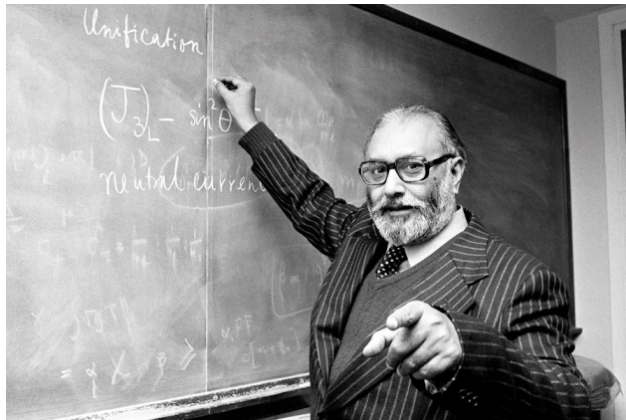


- Responsable d'une forme de radioactivité (β)
- Responsable également de la désintégration du neutron en proton + électron + anti-neutrino



- Particules messagères:
Bosons W^+ , W^- , Z^0

Interaction	Portée [m]	Intensité relative
Forte	10^{-15}	1
Electromagnétique	Infinie	$\sim 10^{-2}$
Faible	10^{-18}	$\sim 10^{-14}$
Gravitation	Infinie	$\sim 10^{-39}$



Abdus Salam (1926 – 1996)
Prix Nobel en 1979 (avec Glashow et Weinberg)
pour la théorie électrofaible (unification des
interactions électromagnétique et faible)