

Matière, rayonnement et transformations

Série de 5 émissions sur les **processus d'interactions entre la matière et le rayonnement électromagnétique**

1. Rappels et compléments sur le modèle standard
2. Émission des ondes électromagnétiques
3. Transformations mutuelles de la matière et du rayonnement
4. Action de la matière sur la lumière : diffusion, réfraction, réflexion
5. Absorption et transparence

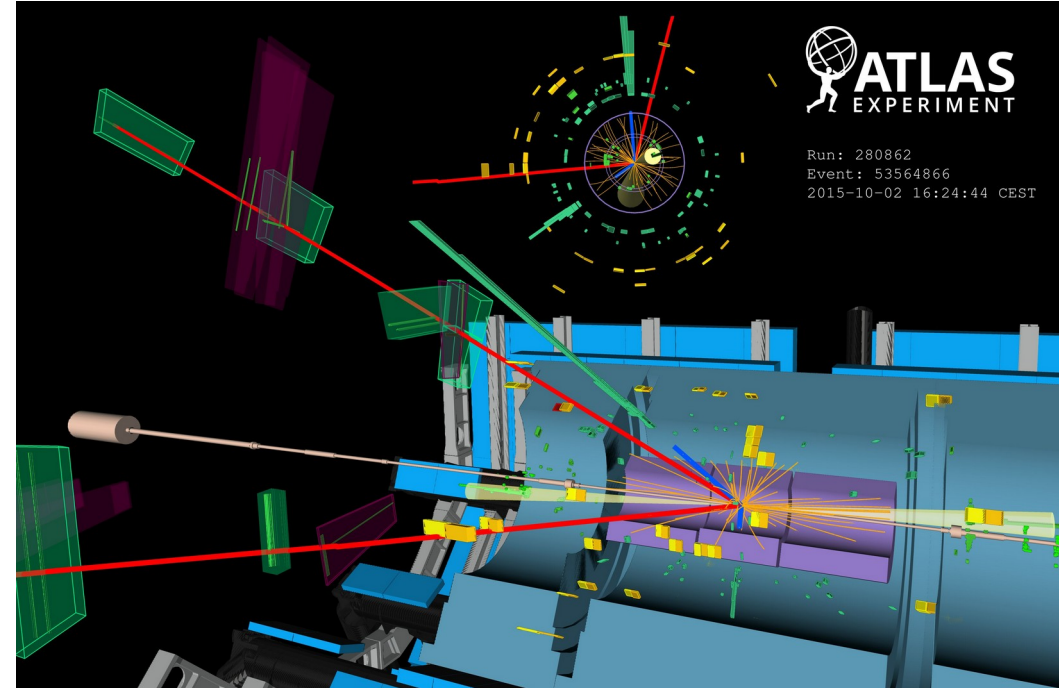
Matière, rayonnement et transformations 1

- Les forces fondamentales
- Le modèle standard
- Les lois de conservation
- Les nombres quantiques

Notions utilisées :

1. Introduction
- 2-3. Structure de la matière
4. Les ondes
10. Mécanique quantique

<https://cds.cern.ch/record/2799213>

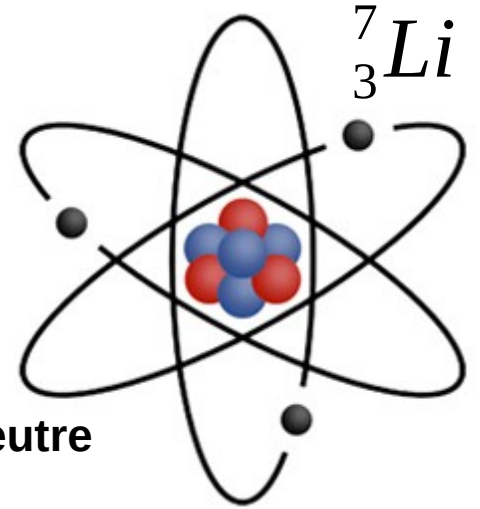


« Higgs en 4 leptons »

Pour une meilleure compréhension,
certaines explications pourront être
légèrement simplifiées/tronquées

Images : Wikipédia sauf mention contraire

Structure de l'atome



Atome de lithium

$$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

- Un **atome** contient un **noyau** (+) et des **électrons** (–)

- Un noyau est caractérisé par 2 nombres :

- **Z = nombre de protons** ($q=+e$) = nature de l'atome

- **Égal au nombre d'électrons** ($q=-e$) – atome **électriquement neutre**

- Exemple : l'atome d'oxygène a 8 protons (et 8 électrons)

- **N = nombre de neutrons** ($q=0$)

- Peut varier à Z constant : différence des « **isotopes** »

(Atomes avec le même Z mais des N différents)

- **A = nombre de masse = Z + N**

- Nombre de **nucléons** (protons + neutrons)

- Permet de nommer les isotopes

- carbone ($Z=6$) 12, 13 et 14

- uranium ($Z=92$) 235 et 238

			A Z	16 8 O	17 8 O	18 8 O
éléments ↑ — nombre de protons	13 7 N	14 7 N	15 7 N			
	12 6 C	13 6 C	14 6 C			
	A – Z			— nombre de neutrons —		
	isotopes (<i>sosies</i>)					

Les forces fondamentales

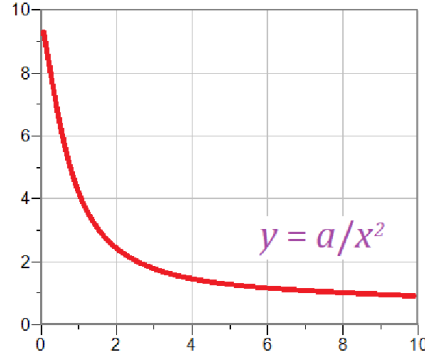
Elles gouvernent les **interactions** entre les particules

Elles sont transmises par des « **bosons vecteurs** »

Interaction	Théorie courante	Médiateurs	Masse (GeV/c ²)	Puissance relative approximative	Rayon d'action (m)	Dépendance de distance
Forte	Chromodynamique quantique (QCD)	huit gluons	0	1	$2,5 \times 10^{-15}$	$\frac{1}{r^7}$
Électromagnétique	Électrodynamique quantique (QED)	photon	0	10^{-2}	∞	$\frac{1}{r^2}$
Faible	Théorie électrofaible	W^+ , W^- , Z^0	80, 80, 91	10^{-5}	10^{-18}	$\frac{1}{r^5}$ à $\frac{1}{r^7}$
Gravitation	Relativité générale	graviton (postulé)	0	10^{-40}	∞	$\frac{1}{r^2}$

La force gravitationnelle

- S'exerce entre 2 objets massifs
- Toujours attractive
- Force en « 1 sur r^2 » : portée infinie
- Responsable de :
 - La gravité terrestre
 - Les marées (différence entre les 2 faces de la Terre)
 - La formation des planètes et des étoiles
 - L'existence de systèmes liés : Terre-Lune, Système Solaire, galaxies
- Très faible intensité mais l'emporte *in fine* sur les autres forces dans les phénomènes astrophysiques
 - Notamment dans la vie d'une étoile
- Théories : **mécanique classique** (Newton, 1687) et **relativité générale** (Einstein, 1915)
- Boson vecteur = **graviton** (hypothétique)



$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = -G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \cdot \vec{e}_{12} = -\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$$

$G = 6,674 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$
constante gravitationnelle

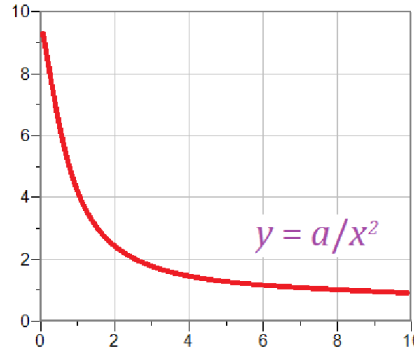


La force électromagnétique

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{4 \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \cdot \vec{e}_{12} = -\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$$

$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ A}^2 \cdot \text{s}^4 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$
permittivité du vide

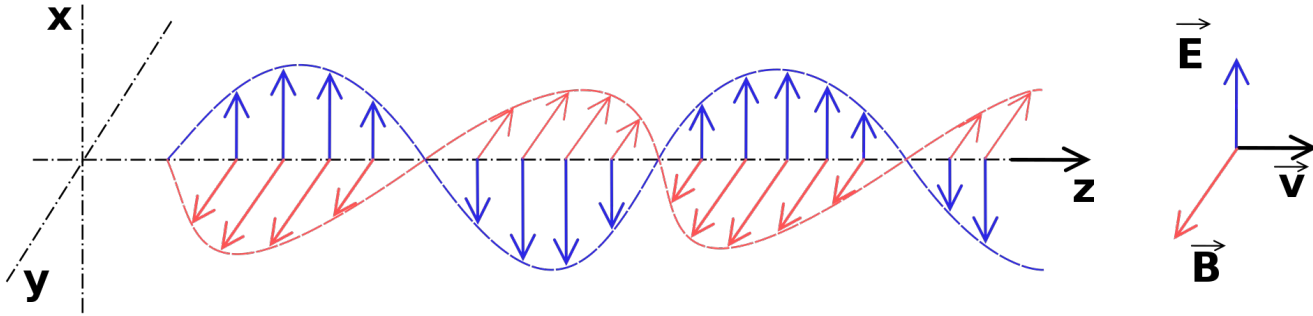
- S'exerce entre charges électriques
- Force en « 1 sur r² » :
 - portée infinie
 - Très intense à courte distance
- Peut être :
 - **Attractive** (charges opposées)
 - **Répulsive** (charges de même signe)



- Responsable de :
 - Phénomènes électriques/électrostatiques
 - La cohésion des atomes (électrons autour des noyaux)
 - L'existence des molécules (liaisons atomiques)
- Théorie : **électrodynamique quantique**
 - 1927 : article fondateur de Dirac : " La théorie quantique de l'émission et de l'absorption du rayonnement "
 - Boson vecteur : photon, masse nulle, portée infinie

Le rayonnement électromagnétique

- On distingue
 - le **rayonnement électromagnétique** (le phénomène étudié)
 - l'onde électromagnétique (une de ses représentations)
 - Autre représentation : **photon** (quantique ou corpusculaire)



- OEM = champ électrique et champ magnétique **orthogonaux** et sinusoïdaux se déplaçant à c

Le spectre électromagnétique

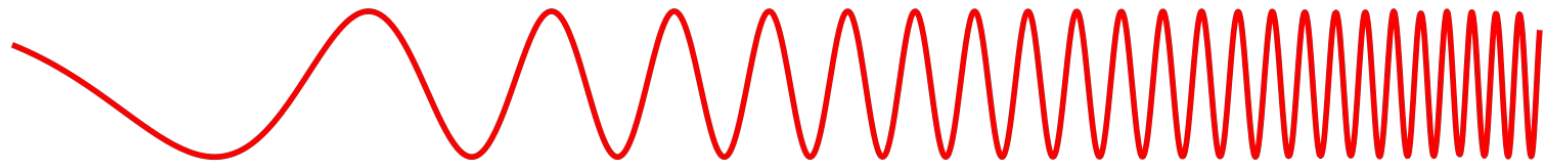
Longueur d'onde

(période spatiale) :

$$\lambda = c.T = c/f$$

Nature totalement différente des ondes :

- Sonores
- Mécaniques
- Gravitationnelles



Type de rayonnement
Longueur d'onde (m)
Échelle approximative

Radio

10^3



Gratte-ciels

Micro-onde

10^{-2}



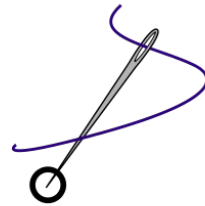
Humains

Infrarouge

10^{-5}



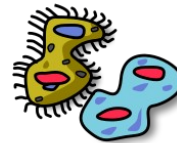
Papillons



Pointes d'aiguille

Visible

$0,5 \times 10^{-6}$



Protozoaires

Ultraviolet

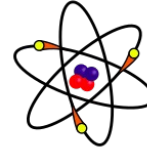
10^{-8}



Molécules

Rayons X

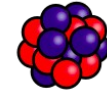
10^{-10}



Atomes

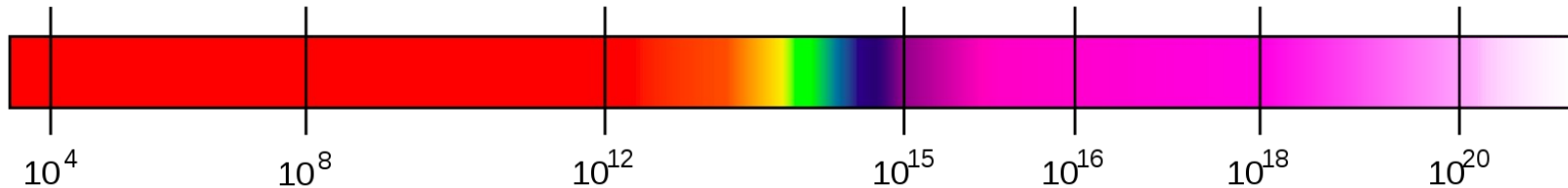
Rayons γ

10^{-12}



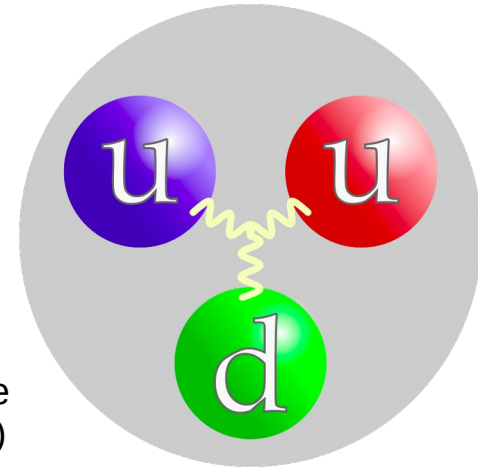
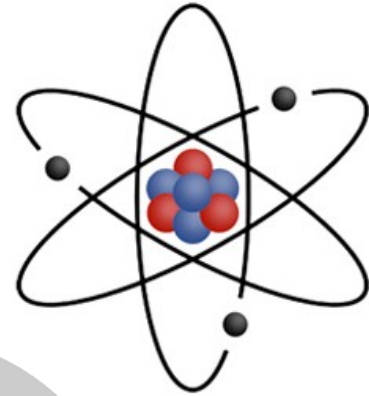
Noyaux atomiques

Fréquence (Hz)



La force (nucléaire) forte

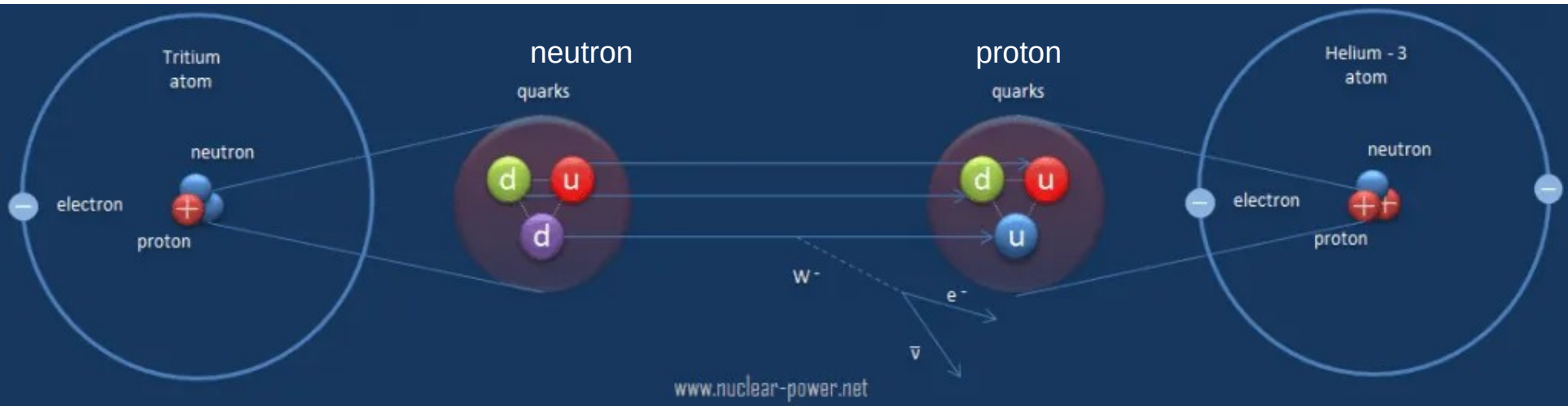
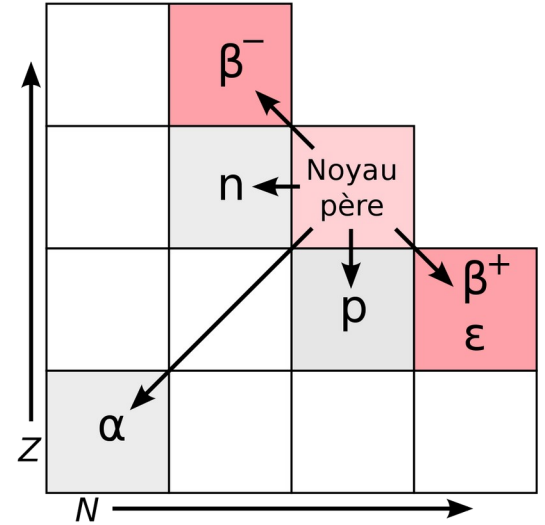
- **Force électrique répulsive très importante** dans un noyau
 - Car protons chargés positivement et très proches (10^{-15} m)
 - \Rightarrow le noyau **ne devrait pas être stable**
- La FF permet la **cohésion des noyaux**
 - et des nucléons (protons et neutrons)
 - S'oppose à la force électrostatique répulsive
- **Très intense**, d'où son nom
- **Très courte portée** : 10^{-15} m (noyau)
- Théorie : **chromodynamique quantique**
 - Gross, Politzer et Wilczek, années 1970 \rightarrow PN 2004
 - Boson vecteur : **gluon**



Représentation de la force forte dans un proton (uud)

La force (nucléaire) faible

- Peut transformer une particule en une autre
- À l'origine de certains types de **radioactivité**
 - Permet la **nucléosynthèse** dans une étoile
- **Très courte portée** : $10^{-17} - 10^{-18}$ m
- Théorie électrofaible (Glashow, Salam et Weinberg, années 1960 → PN 1979)
 - Boson vecteur : Z et W, **masse non nulle**, portée finie



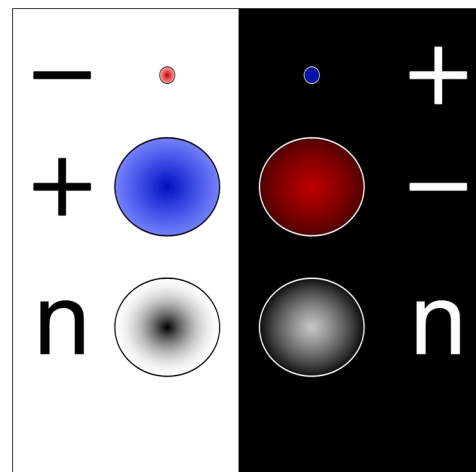
Le « modèle standard »

Ensemble des **particules élémentaires** et des **bosons vecteurs** qui composent toute la matière connue

	<p>masse → $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$</p> <p>charge → $2/3$</p> <p>spin → $1/2$</p> <p>u up</p>	<p>$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$</p> <p>$2/3$</p> <p>$1/2$</p> <p>c charm</p>	<p>$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$</p> <p>$2/3$</p> <p>$1/2$</p> <p>t top</p>	<p>0</p> <p>0</p> <p>1</p> <p>g gluon</p>	<p>$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$</p> <p>0</p> <p>0</p> <p>H boson de Higgs</p>
QUARKS	<p>$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$</p> <p>$-1/3$</p> <p>$1/2$</p> <p>d down</p>	<p>$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$</p> <p>$-1/3$</p> <p>$1/2$</p> <p>s strange</p>	<p>$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$</p> <p>$-1/3$</p> <p>$1/2$</p> <p>b bottom</p>	<p>0</p> <p>0</p> <p>1</p> <p>γ photon</p>	
	<p>$0.511 \text{ MeV}/c^2$</p> <p>-1</p> <p>$1/2$</p> <p>e électron</p>	<p>$105.7 \text{ MeV}/c^2$</p> <p>-1</p> <p>$1/2$</p> <p>μ muon</p>	<p>$1.777 \text{ GeV}/c^2$</p> <p>-1</p> <p>$1/2$</p> <p>τ tau</p>	<p>$91.2 \text{ GeV}/c^2$</p> <p>0</p> <p>0</p> <p>1</p> <p>Z^0 boson Z^0</p>	BOSONS DE JAUGE
LEPTONS	<p>$< 2.2 \text{ eV}/c^2$</p> <p>0</p> <p>$1/2$</p> <p>ν_e neutrino électronique</p>	<p>$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$</p> <p>0</p> <p>$1/2$</p> <p>ν_μ neutrino muonique</p>	<p>$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$</p> <p>0</p> <p>$1/2$</p> <p>ν_τ neutrino tauique</p>	<p>$80.4 \text{ GeV}/c^2$</p> <p>± 1</p> <p>1</p> <p>W^\pm boson W^\pm</p>	

Ne sont pas représentés :

- Les **antiparticules** des quarks et des leptons (charge opposée)

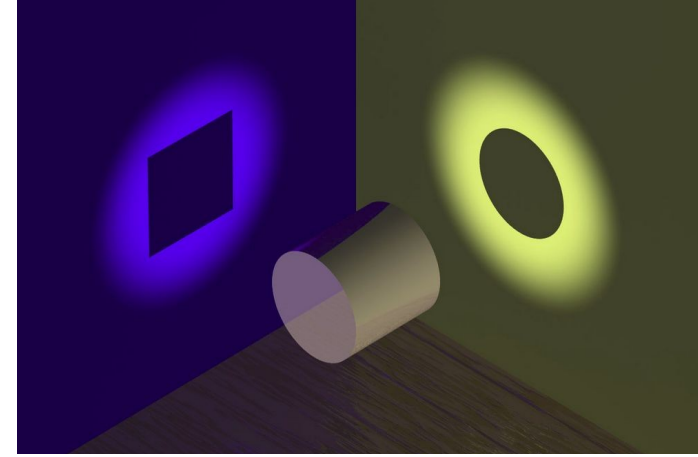


Comparaison de la charge des particules (à gauche) et de celle des antiparticules (à droite) ; avec, de haut en bas : électron et positron, proton et antiproton, neutron et antineutron

- Le **graviton** (pas encore détecté)

Élémentaire = sans structure interne connue 11

La dualité onde-corpuscule



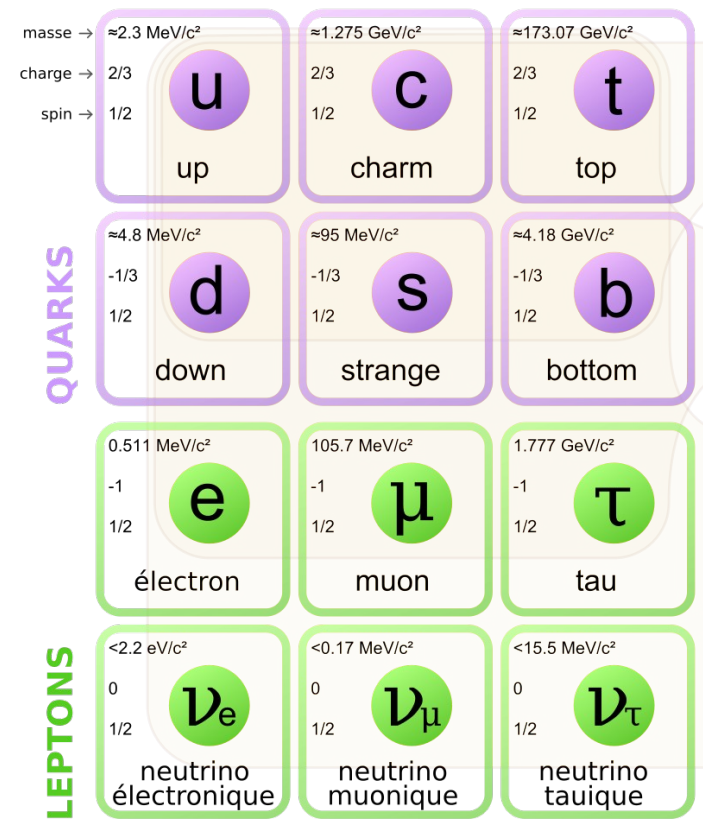
Métaphore du cylindre

- Principe selon lequel **tous les objets physiques** peuvent présenter parfois les **propriétés d'une onde** et parfois les **propriétés d'un corpuscule**
- Expérience des fentes de Young :
 - Les **interférences** montrent un comportement **ondulatoire**
 - La **détection** sur un écran montre un comportement **particulaire**
- Exprimée pour le photon par Einstein en 1905 (effet photo-électrique)
 - **Relation de Planck-Einstein** : $E = h \cdot \nu$
($h = 6,626 \times 10^{-34}$ J.s : constante de Planck, très petite)
- **Généralisée** aux particules par De Broglie en 1924 :
 - Donc tout a une longueur d'onde
 - Exemple : être humain courant le 100 mètres en 10 secondes :
 $\lambda \approx 10^{-36}$ m (< longueur de Planck, ça n'a plus beaucoup de sens...)

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\gamma m v}$$

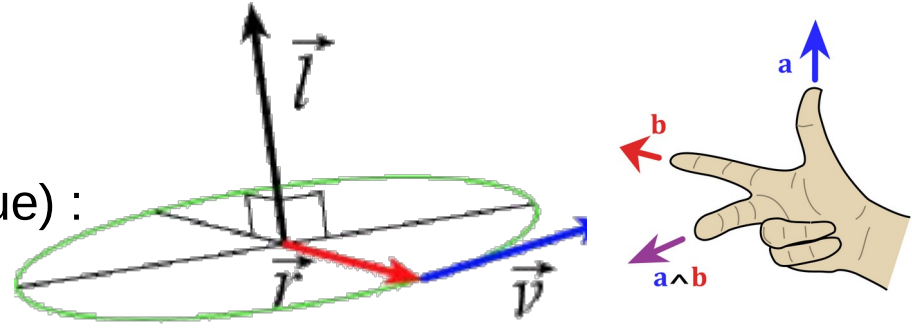
Saveur et couleur

- **Saveur** : caractéristique permettant de distinguer **différents types de leptons et de quarks** :
 - **3 saveurs de leptons** : e, μ , τ
 - **6 saveurs de quarks** : u, d, c, s, t, b
 - 4 sont associées à un **nb quantique** : C, S, T, B
- Charge de **couleur** :
 - **propriété (nombre) quantique** décrite dans la **chromodynamique quantique** (force forte)
 - **3 valeurs** : R, V, B
 - Les antiquarks sont anti-R, anti-V, anti-B
 - On n'observe **jamais de quarks isolés** : toutes les particules sont « blanches »
 - R, V, B pour les baryons (3 quarks)
 - R- \bar{R} , V- \bar{V} , B- \bar{B} pour les mésons (2 quarks)

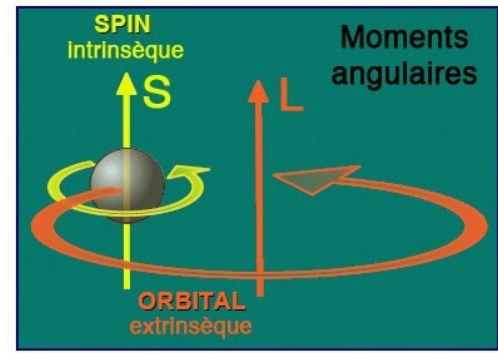
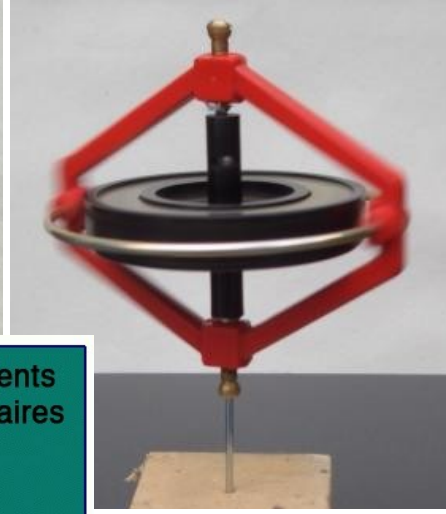


Particule	Saveur	Charge de saveur
c / \bar{c}	Charm (C)	1 / -1
s / \bar{s}	Strange (S)	-1 / 1
t / \bar{t}	Truth (T)	1 / -1
b / \bar{b}	Beauty (B)	-1 / 1

Le moment cinétique



En mécanique classique



- **Moment cinétique** – « angulaire » – (extrinsèque) :

$$\vec{L} = \vec{OM} \wedge \vec{p} = \vec{r} \wedge m \vec{v}$$

- Théorème : **quantité conservée pour un système isolé**

→ gyroscope, patinage artistique

- Moment angulaire **intrinsèque** dû à la **rotation de l'objet sur lui-même**

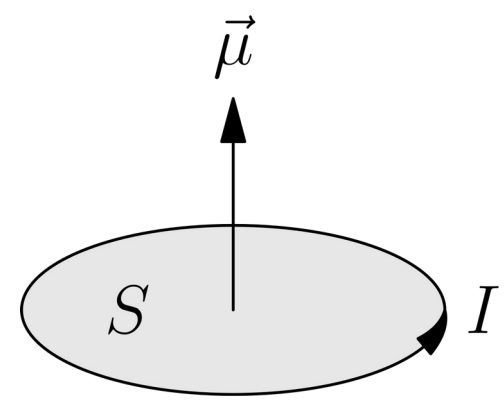
- Théorème de König : moment cinétique = **moment cinétique « extrinsèque »** + **moment cinétique propre** du système

- Il est donc possible de séparer le **mouvement du centre d'inertie** du **mouvement propre** du système (ex : Terre & Soleil)

Le moment magnétique

- Grandeur **vectorielle** caractérisant l'intensité d'une source magnétique, notée M ou μ (boucle de **courant électrique** ou **objet aimanté**)
 - **courant** ou **déplacement d'une particule chargée**
- Manifestation : tendance à s'aligner avec le champ magnétique
 - Ex : aiguille d'une boussole
- Tout système possédant un moment magnétique produit un champ magnétique

$$\vec{\mu} = I \vec{S}$$

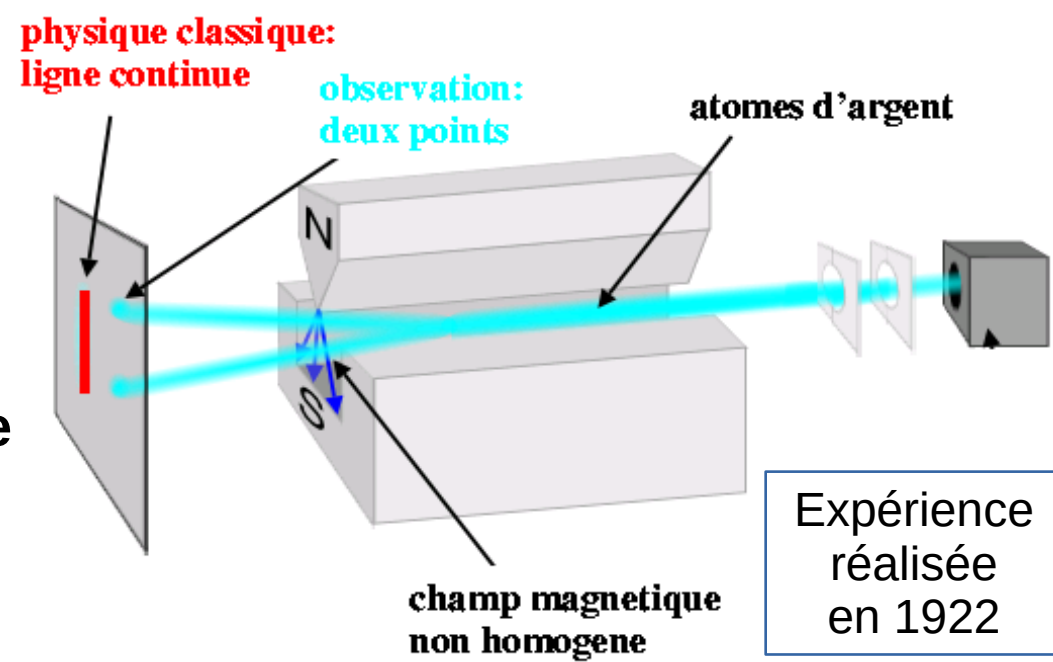


- Le **moment magnétique** orbital μ_L d'une particule de charge q et de masse m est lié au **moment cinétique** orbital L :
$$\vec{\mu}_L = \frac{q}{2m} \vec{L}$$
- Il s'agit ici du moment cinétique orbital « **extrinsèque** », dû au mouvement de la particule chargée

Une surprise de taille attendait les physiciens...

L'expérience de Stern et Gerlach

- On envoie des **atomes d'argent** dans un **champ magnétique non uniforme**
 - À l'état fondamental, les atomes d'argent
 - Sont **neutres** → pas déviés par un champ magnétique
 - Ont un **moment cinétique orbital nul** → **moment magnétique orbital nul**
 - Ont une config. électronique particulière : un nuage symétrique de $46 e^- + 1 e^-$
 - → selon les connaissances de l'époque, le **faisceau ne devrait pas être dévié par le champ magnétique**



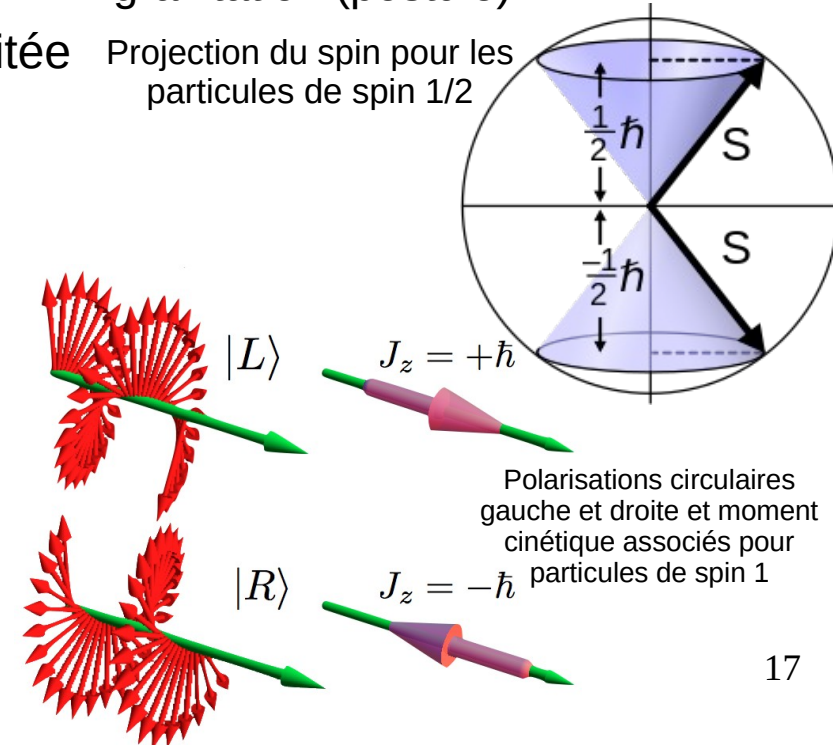
- Mais !!!
 1. **Le faisceau est dévié** malgré l'absence de moment cinétique (et donc magnétique) orbital → **l'électron se comporte intrinsèquement comme un aimant**
 2. On observe **deux points d'impact séparés** → **le moment magnétique est quantifié**

Le spin

- On introduit un **observable quantique** : le « **spin** »
 - **Pas d'équivalent classique** mais comparable à un **moment cinétique intrinsèque**
= moment cinétique sans rotation (!)
 - Analogie « électron tournant sur lui-même » très limitée
 - l'électron, ponctuel, ne tourne pas sur lui-même
 - Un calcul classique donnerait un électron plus gros qu'un atome ou une rotation plus rapide que c (Pauli)
- **Propriété fondamentale**, comme la masse ou la charge (mais **purement quantique**)
- Pour l'électron, 2 valeurs : $\pm \hbar/2 \rightarrow$ « spin $\pm 1/2$ »
- Note : le spin apparaît naturellement dans les solutions à l'équation de Dirac
 \rightarrow « **spineurs de Dirac** »

- Particules élémentaires : $0 \leq s \leq 2$
 - **Spin 0** : le boson de Higgs
 - **Spin 1/2** : e^-/e^+ , quarks, neutrinos
 - **Spin 1** : **photon**, gluon, bosons W^\pm et Z^0 = bosons vecteurs
 - **Spin 2** : le graviton, vecteur de la gravitation (postulé)

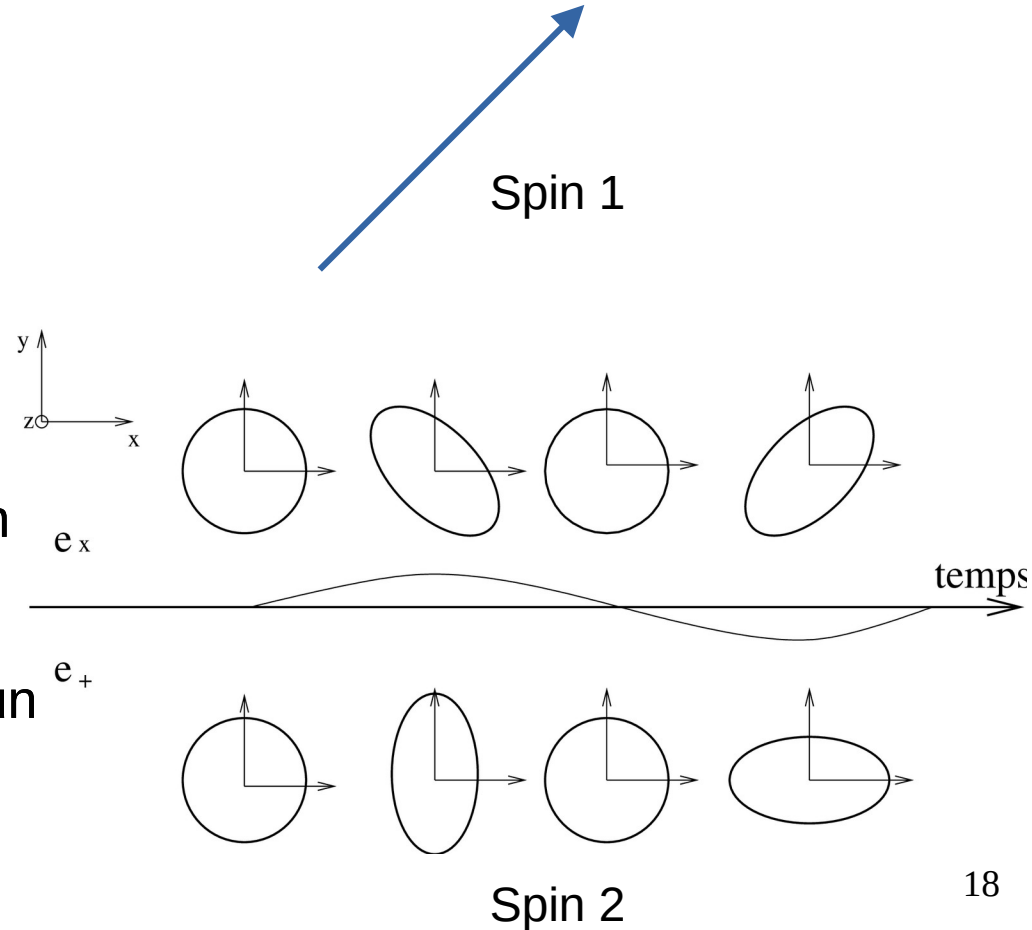
Projection du spin pour les particules de spin 1/2



Symétries (1)

Un objet de spin s est invariant par rotation d'un angle $2\pi/s$

- Les **symétries** sont **très importantes en physique** pour la description des systèmes
- Le boson de Higgs a un **spin 0** : **champ « scalaire »** (nombres) → **invariant par rotation**
- Le photon a un **spin 1** : une onde électromagnétique est représentée par un **vecteur** : une **rotation d'angle 2π** (360° , tour complet) le laisse inchangé
- Le graviton a un **spin 2** : il est décrit par un **tenseur de rang 2** : invariant lors d'une **rotation de π** (180° , demi-tour)

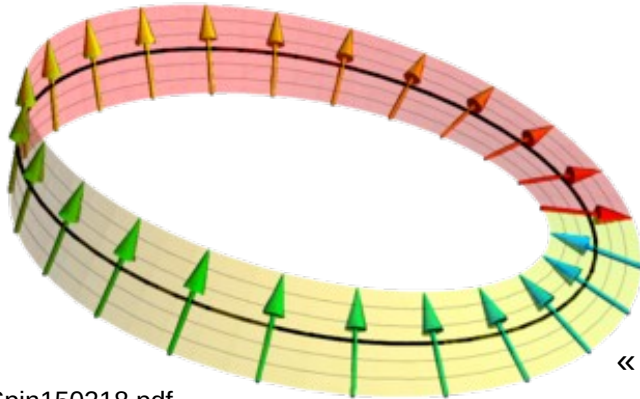


Symétrie du spin 1/2

Un objet de spin s est invariant par rotation d'un angle $2\pi/s$

- Électrons & posit(r)ons représentés par des « **spineurs** » à 4 dimensions (solutions de l'équation de Dirac) : électron spin $\uparrow\downarrow$ et positron spin $\uparrow\downarrow$
- Un tour complet (2π , 360°) transforme le spineur en son **opposé** ! Il faut une **rotation de 4π** ($720^\circ = 2$ tours) pour qu'un spineur retrouve ses coordonnées initiales.

Analogie avec le ruban de Möbius



Feynman, dans son discours de prix Nobel (1965) : « Dirac a obtenu son équation décrivant l'électron par une proposition quasiment purement mathématique. Il nous manque toujours une image simple permettant de visualiser tous les éléments de cette équation. »

Personne ne comprend complètement les spineurs. Leur algèbre est comprise formellement mais leur signification géométrique est mystérieuse.

Dans un certain sens ils décrivent la "racine carrée" de la géométrie et, de même que comprendre le concept de la racine carrée de -1 a pris des siècles, la même chose pourrait être vraie des spineurs.

Michael Atiya, Médaille Fields 1996



« Comme si les électrons étaient connectés à tous les points de l'Univers par des liens invisibles »

Fermions et bosons

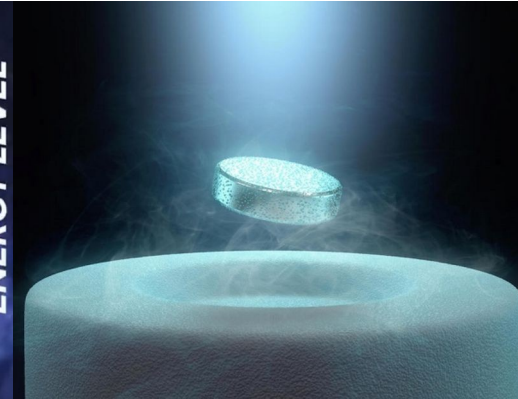
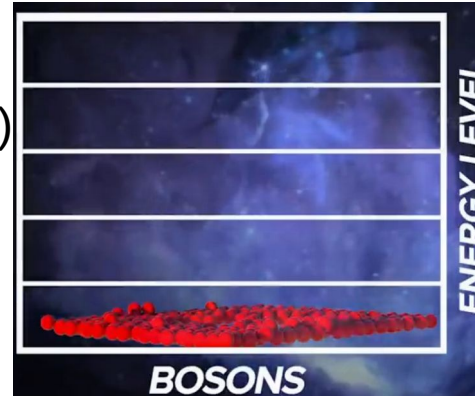
Fermions

- Particules de **spin demi-entier**
 - $\pm 1/2, 3/2, 5/2, \dots$
 - **Leptons** et **quarks**
 - Particules élémentaires ou non
 - **Représentent la matière**
- **Statistique de Fermi-Dirac**
 - Comportement individualiste : **deux fermions n'occupent jamais le même état quantique** (principe d'exclusion de Pauli)

« Théorème spin-statistique »

Bosons

- Particules de **spin entier**
 - **Bosons** de jauge, **boson** de Higgs
 - **Véhiculent les forces**
- **Statistique de Bose-Einstein**
 - Comportement grégaire, tendent à **occuper le même état quantique** (« état fondamental ») à basse température
 - « **Condensat de Bose-Einstein** », lié à la **supraconductivité** et **superfluidité**

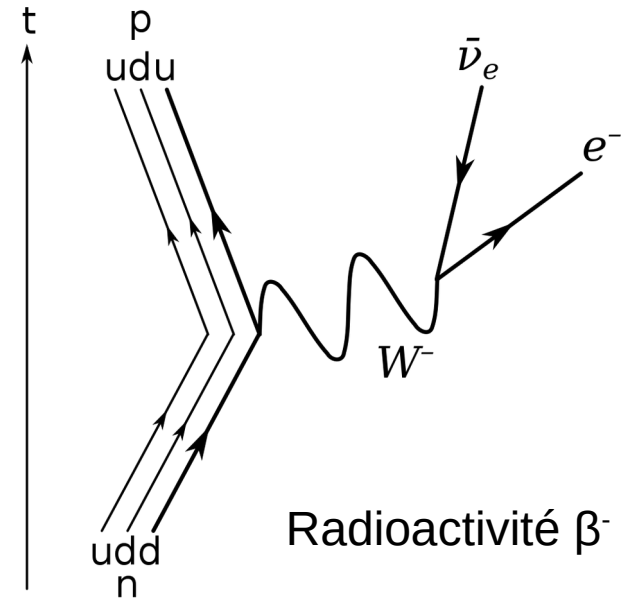


Lois de conservation

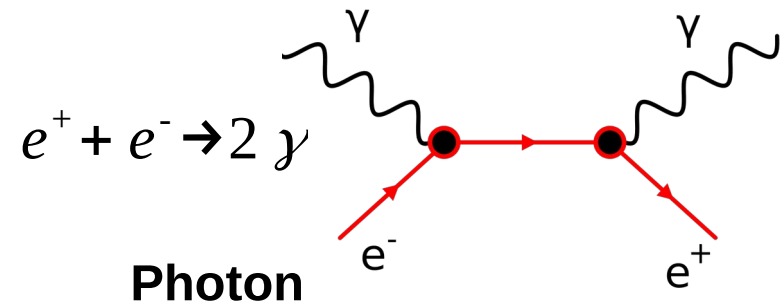
- Expriment qu'une propriété d'un système reste **constante** lors de son évolution
- Certaines lois de conservation n'ont **jamais été mises en défaut** :
 - **Énergie*** : énergie de masse, quantité de mouvement et moment cinétique
 - **charge électrique (Q)**
 - **nombre leptonique** $L = n_l - n_{\bar{l}}$
 - **nombre baryonique** $B = \frac{1}{3}(n_q - n_{\bar{q}})$
 - **produit des symétries C.P.T**
 - C : charge (particule / antiparticule)
 - P : parité (après réflexion dans un miroir)
 - T : temps (inversion de la flèche du temps)

* **Théorème de Noether** : l'invariance par translation dans le temps des lois de la mécanique quantique est mathématiquement équivalente à la conservation de l'énergie

- Certaines quantités ne sont **pas toujours conservées** par l'**interaction faible** :
 - **Conjugaison de charge C**
 - **Parité d'espace P**
 - **Produit C.P (donc T!)**
 - **Saveur** (leptons et quarks)



L'électron et le photon



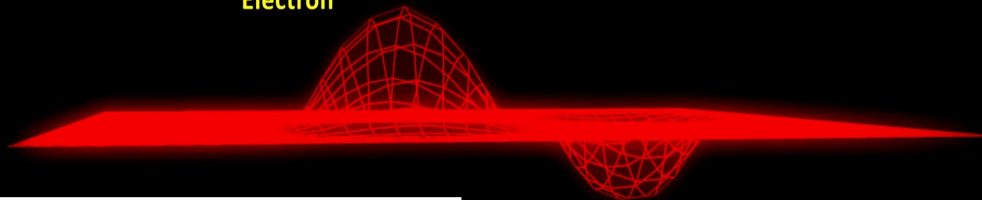
Électron

- Particule élémentaire de matière
- Quantum du champ des électrons
- Fermion : spin 1/2
- Masse $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$ kg
 $= 511$ keV/c²
- Charge élémentaire
 $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C
- Peut être ~ immobile

Photon

- Boson vecteur
- Quantum du champ électromagnétique
- Boson : spin 1
- Masse nulle ($< 10^{-54}$ kg soit
 5×10^{-19} eV/c², $> 10^{24}$ moins que e^-)
- Pas de charge électrique
- Vitesse de la lumière (pas de référentiel dans lequel il est au repos – $v=c$ qq soit le référentiel)

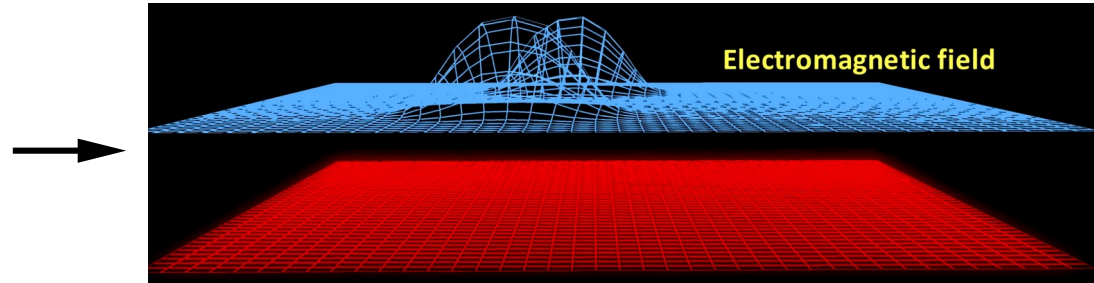
Electron



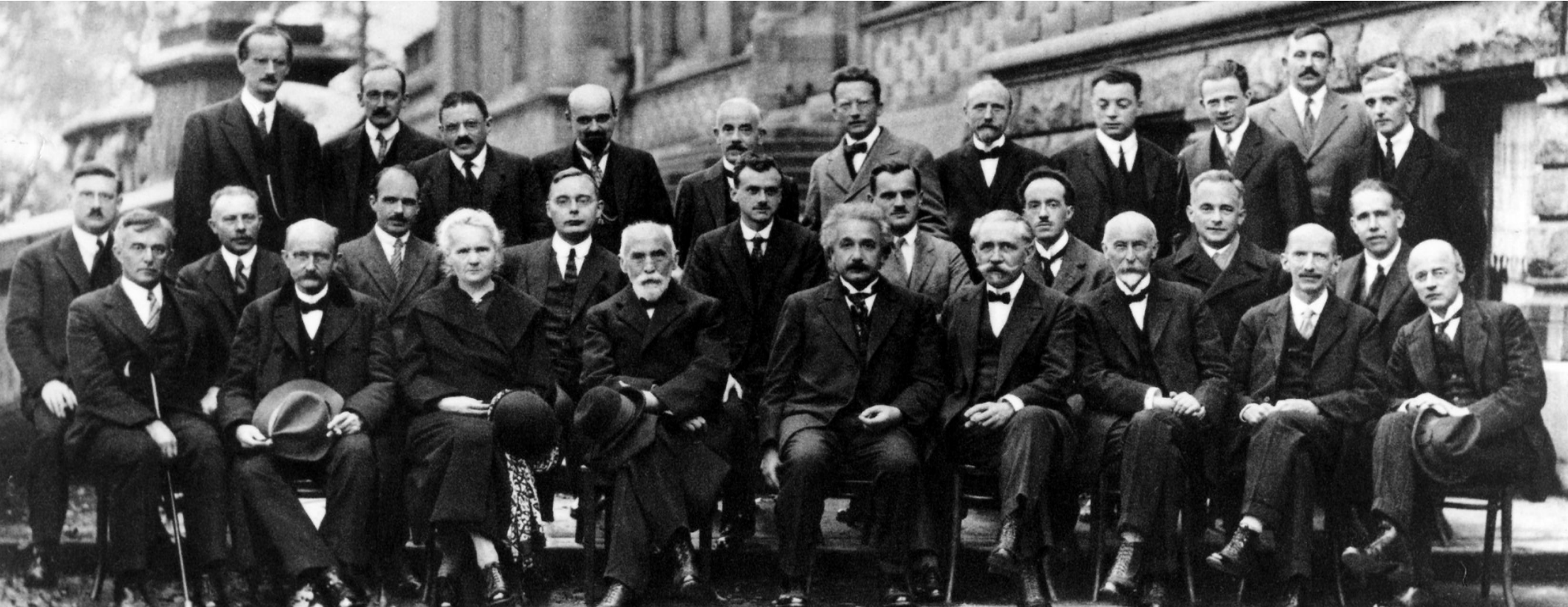
Positron (anti-electron)

[youtube.com/watch?v=jlEovwE1oHI](https://www.youtube.com/watch?v=jlEovwE1oHI)

Electromagnetic field



Congrès de Solvay 1927 « électrons et photons »



De l'arrière vers l'avant et de gauche à droite :

17 titulaires du prix Nobel sur 29 (**physique & chimie**)

A. Piccard, É. Henriot, P. Ehrenfest, É. Herzen, T. de Donder, **Erwin Schrödinger**, J-É. Verschaffelt, **Wolfgang Pauli**, **Werner Heisenberg**, R. H. Fowler, Léon Brillouin, Peter Debye, Martin Knudsen, **William Lawrence Bragg**, Hendrik Kramers, **Paul Dirac**, **Arthur Compton**, **Louis de Broglie**, **Max Born**, **Niels Bohr**, Irving Langmuir, **Max Planck**, Marie Curie, **Hendrik Lorentz**, **Albert Einstein**, Paul Langevin, Charles E. Guye, **Charles Thomson Rees Wilson**, **Owen W. Richardson**

Pour aller plus loin

- Spin :
 - [youtube.com/watch?v=Br7tE3OtbQo](https://www.youtube.com/watch?v=Br7tE3OtbQo)
 - [youtube.com/watch?v=pWlk1gLkF2Y](https://www.youtube.com/watch?v=pWlk1gLkF2Y)
 - [youtube.com/watch?v=cd2Ua9dKEI8](https://www.youtube.com/watch?v=cd2Ua9dKEI8)
- Spineur :
 - vimeo.com/62228139
 - [youtube.com/watch?v=JFSU9X11wyY](https://www.youtube.com/watch?v=JFSU9X11wyY)
 - <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Antitwister.ogv>
 - https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Belt_Trick.ogv