

Les particules élémentaires

❖ 100 ans d'avancés scientifiques

Aperçu

- ❖ La genèse

 - les particules ordinaires

- ❖ L'âge d'or

 - une foison de nouvelles particules

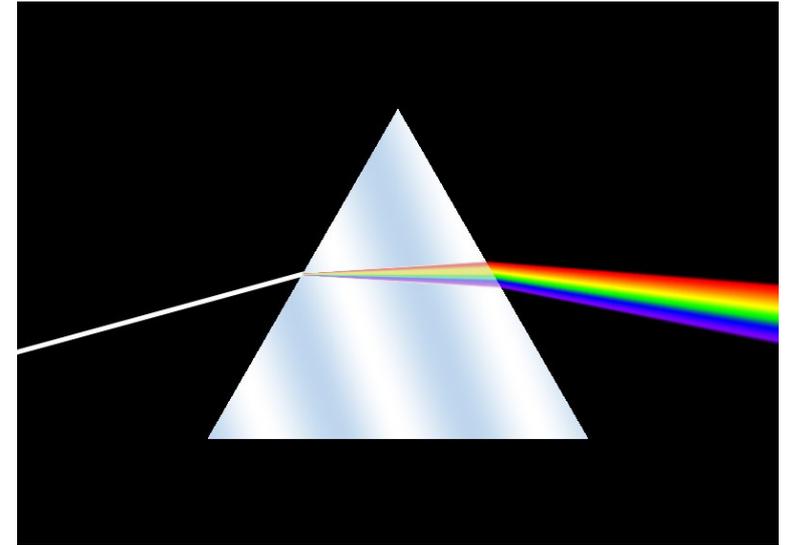
- ❖ L'ère moderne

 - le Modèle Standard des particules et de leur interaction

Préhistoire : état des lieux au XIX^{ème} S

Newton (1643-1727)

- **Mécanique**
- principe d'inertie
- loi fondamentale de la dynamique
- principe d'action-réaction
- **Gravitation**
- loi de la gravitation universelle (terrestre et céleste)
- Travaux sur la lumière
- décomposition par un prisme
- lumière blanche composée de corpuscules colorés



Lagrange (1736-1813)

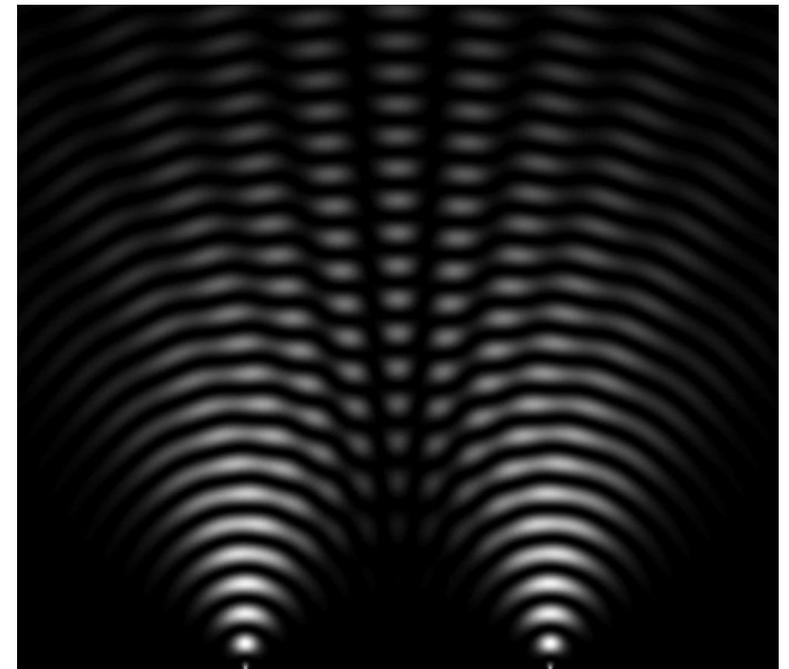
- **Mécanique analytique**
- principe de moindre action

Fresnel (1788-1827) – Young (1773-1829)

- optique ondulatoire
- nature ondulatoire de la lumière

Maxwell (1831 – 1879)

- théorie de l'**électromagnétisme**
- lumière = onde électromagnétique se propageant dans un *éther*



Petit rappel (?) : loi fondamentale de la dynamique

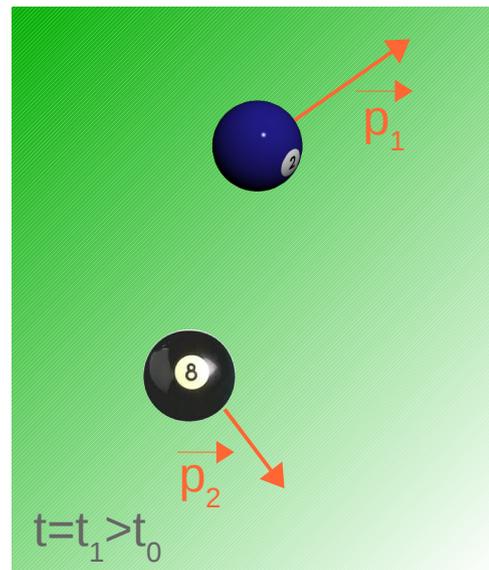
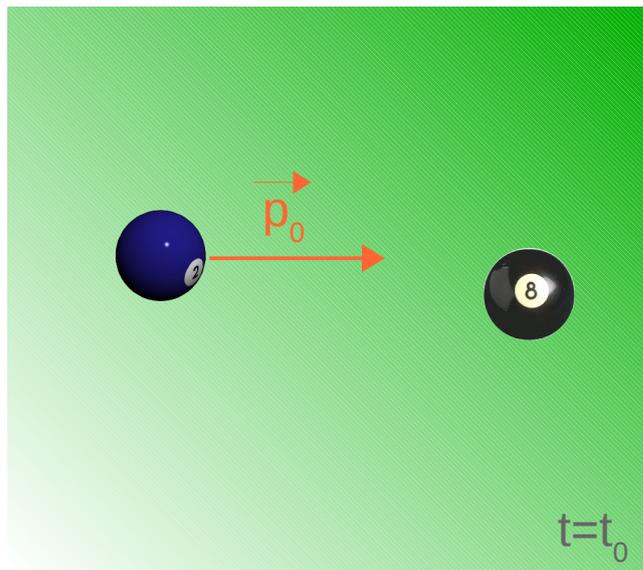
$$\sum_i \mathbf{F}_i = m \mathbf{a}$$

- \mathbf{F}_i : forces exercées sur le système (N)
- m : masse du système (kg)
- $\mathbf{a} = d\mathbf{v}/dt$: accélération du système (m/s^2)

p : quantité de mouvement

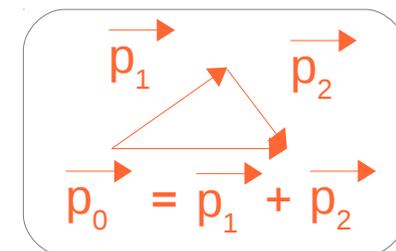
- classiquement : $\mathbf{p} = m \mathbf{v}$ (kg.m/s)

$$\Rightarrow \sum_i \mathbf{F}_i = d\mathbf{p}/dt$$



Dans un système isolé ($\sum_i \mathbf{F}_i = \mathbf{0}$),
la quantité de mouvement est conservée

$$d\mathbf{p}/dt = 0 \Rightarrow \mathbf{p} = \text{cst}$$



La genèse

- ❖ 1905 : « l'année miraculeuse »
- ❖ révolutions théoriques
 - relativité restreinte
 - mécanique quantique
- ❖ les particules ordinaires

1905 : Annus Mirabilis

- ❖ Effet photo-électrique (9 juin)
- ❖ Mouvement brownien (18 juillet)
- ❖ Relativité restreinte (26 septembre)
- ❖ Équivalence masse-énergie (21 novembre)

(articles d'Einstein publiés dans « Annalen der Physik »)

Le mouvement brownien

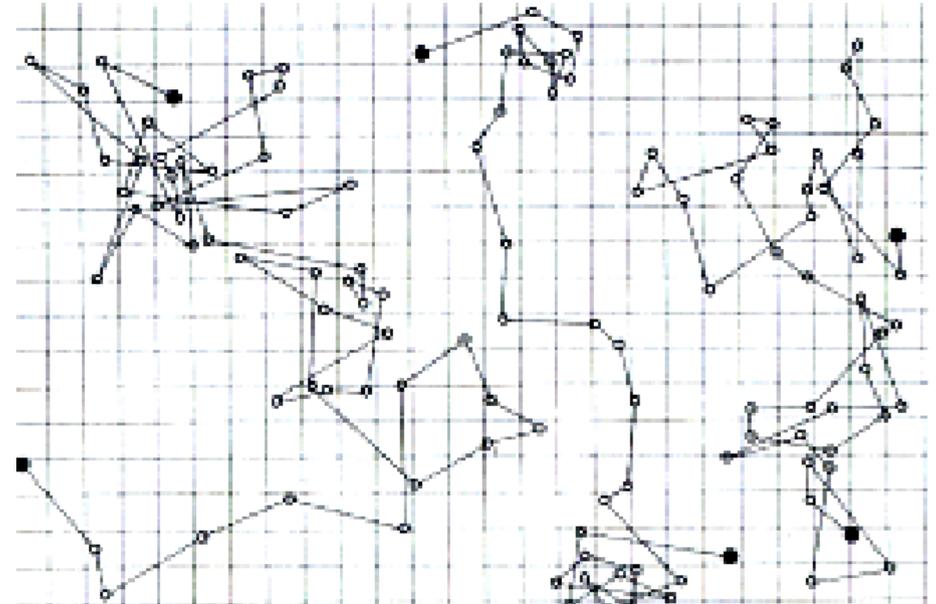
Mouvement de petites particules en suspension dans un fluide

- découvert en 1827 par Brown (botaniste)
- expliqué par Einstein comme la résultante des impulsions transmises à la particule par les molécules du milieu soumis à l'agitation thermique :

$$(\bar{\Delta}x)^2 = \frac{RT}{N_A} \cdot \frac{1}{3\pi\mu a} \tau$$

- formule ayant permis à Jean Perrin de mesurer le nombre d'Avogadro
« Il devient difficile de nier la réalité objective des molécules » J. Perrin

↘ argument en faveur de la théorie atomiste de la matière encore en débat à l'époque



« ce travail a contribué, plus qu'aucun autre, à convaincre les physiciens de la réalité des atomes et des molécules, de la théorie de la chaleur, et du rôle fondamental joué par les probabilités dans les lois de la nature » Max Born

Révolutions théoriques

- ❖ mécanique quantique
- ❖ relativité restreinte

Révolutions théoriques

- ❖ mécanique quantique
- ❖ relativité restreinte

Les quanta

l'**action** [énergie×temps] (Joule×seconde)
 - grandeur caractérisant la trajectoire d'un système
 - *principe de moindre action*: parmi toutes les trajectoires possibles, celle effectivement réalisée est celle qui minimise l'action

Quantum d'action :

1900, Max Planck, rayonnement du corps noir

- $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$: action élémentaire
- $\hbar = h / 2\pi$: moment cinétique élémentaire

Quanta de lumière

1905, Albert Einstein, effet photo-électrique

- $E = h \nu$: le *photon* transporte l'énergie du champ électromagnétique

Longueur d'onde de de Broglie

1924, Louis de Broglie, hypothèse confirmée par Thomson et Davisson (1927)

- $p = h / \lambda$: particule avec une quantité de mouvement p est caractérisée par une longueur d'onde λ

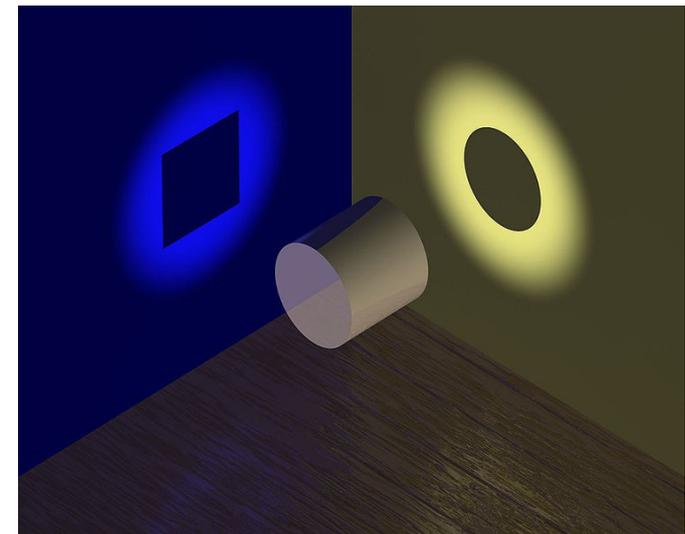
↘ Dualité onde-corpuscule

- $E = \hbar \omega$ (ω : pulsation = $2\pi\nu$)
- $p = \hbar k$ (k : vecteur d'onde $|k|=2\pi/\lambda$)

Ordres de grandeurs

| Échelle | Énergie (J) | Temps (s) | Action (Js) |
|---------|--------------------|----------------------|----------------------|
| macro | 1 | 1 | $1 \ll h$ |
| micro | 10^{-13} (1 MeV) | 10^{-19} (1 Å / c) | $10^{-32} \approx h$ |

| Système (Caractéristiques) | p (Ns) | λ (Å) |
|--|--------------------------------|--------------------|
| Poussière (m= 1g; v= 1m/s) | 10^{-3} | 10^{-20} |
| Électron (T=10 eV $\Rightarrow v \ll c$) | $2 \cdot 10^{-24}$ (3 keV/c) | 4. |
| Électron (T=10 keV $\Rightarrow v = 0.2 c$) | $5 \cdot 10^{-23}$ (100 keV/c) | 0.1 |
| Électron (T=10 MeV $\Rightarrow v \approx c$) | $6 \cdot 10^{-21}$ (10 MeV/c) | 10^{-3} (100 fm) |



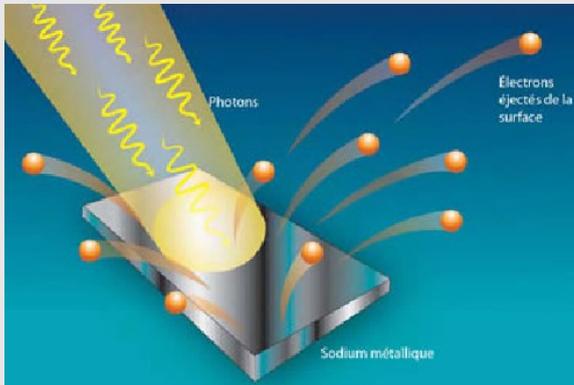
Les quanta

l'**action** [énergie×temps] (Joule×seconde)
 - grandeur caractérisant la trajectoire d'un système
 - *principe de moindre action*: parmi toutes les trajectoires possibles, celle effectivement réalisée est celle qui minimise l'action

Ordres de grandeurs

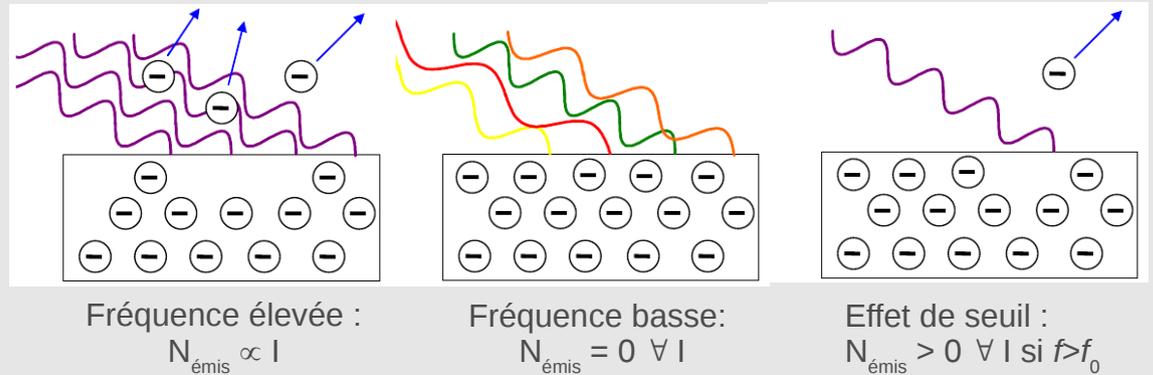
L'EFFET PHOTO-ELECTRIQUE

Un matériau électrique exposé à la lumière peut émettre des électrons



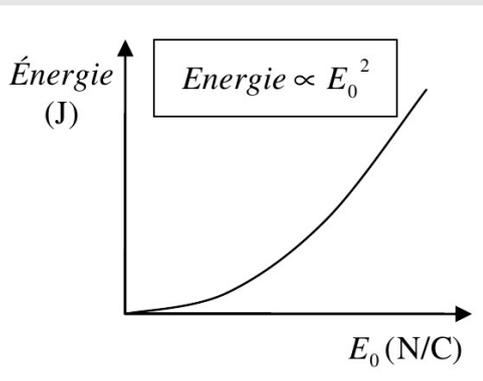
La lumière apporte l'énergie nécessaire pour libérer l'électron de sa structure

Mais la longueur d'onde de la source lumineuse joue un rôle ...

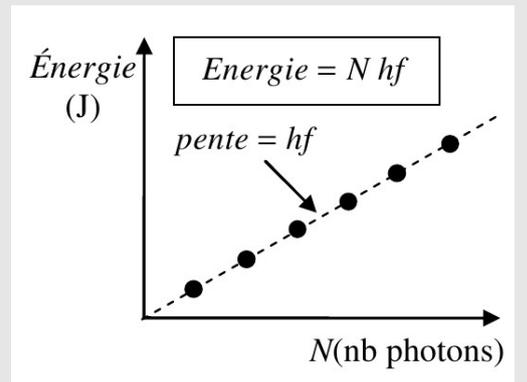


... rôle non expliquée par l'optique ondulatoire ou l'électromagnétisme

INTERPRETATION



La lumière porte l'énergie par quanta
 - nature corpusculaire (grain) : photon
 - quanta d'énergie du photon :
 $E = h \nu$



Dualité onde-corpuscule

paquet d'ondes :
exemples :
- $\varphi(x) = \sum_i A_i \cos(k x)$
- $\Psi(x) = \sum_i A_i e^{ikx}$
note : $e^{ix} = \cos(x) + i \sin(x)$

Description

- paquet d'ondes: $\Psi(\mathbf{r},t) \propto \int A(\mathbf{r}) e^{-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} d\mathbf{k}$
↔ état quantique $|\psi(t)\rangle$
- relations d'Heisenberg: $\Delta P \cdot \Delta x > \hbar/2$; $\Delta E \cdot \Delta t > \hbar/2$

Propagation

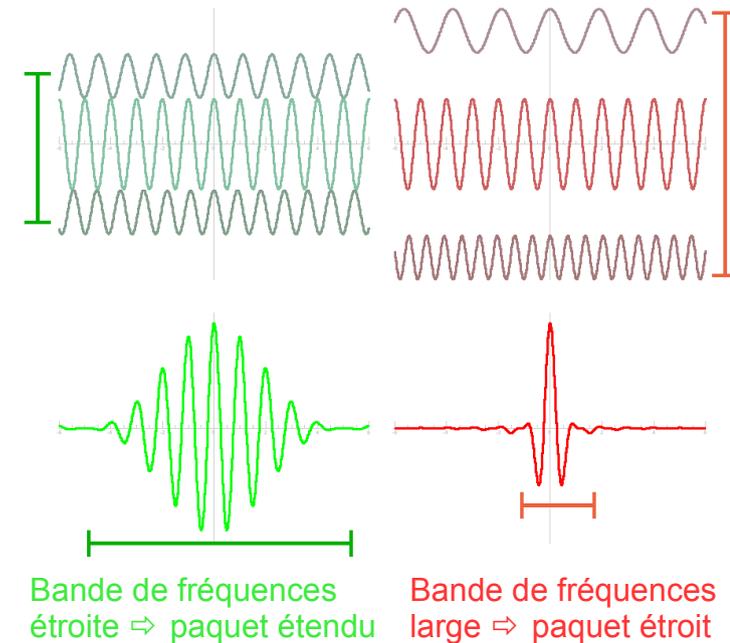
- équation de Schrödinger (déterministe):
- $i\hbar d|\psi(t)\rangle/dt = H(t)|\psi(t)\rangle$ où $H(t)$: opérateur énergie
- solutions: $|\psi(t)\rangle = \sum_a c_a(t) |\psi_a\rangle$
 $|\psi_a\rangle$: état correspondant à la valeur $a \in \{a\}$

Le problème de la mesure

- résultat d'une mesure est probabiliste: $P_a = |c_a|^2$
- réduction du paquet d'onde
mesure donnant 'a' place le système dans l'état $|\psi_a\rangle$

Interprétation ?

- artefact mathématique (Copenhague)
- physique universelle (décohérence) [S. Haroche – nobel 2012]

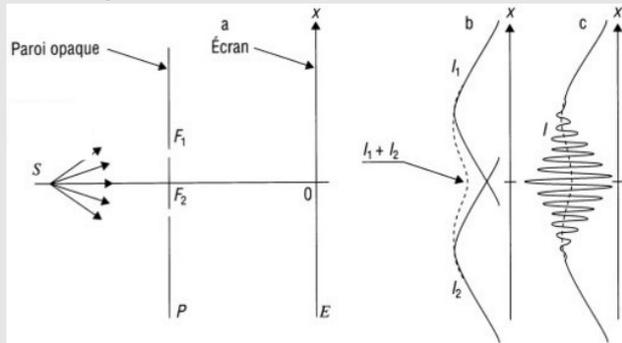


Dualité onde-corpuscule

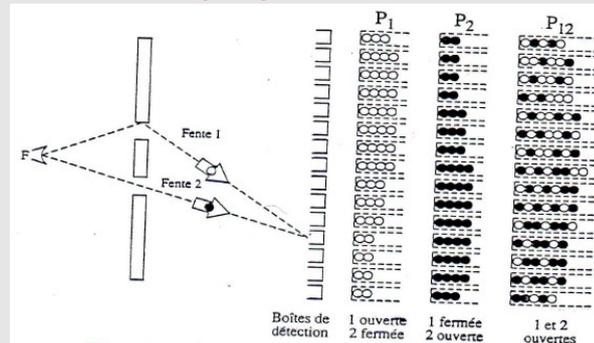
paquet d'ondes :
 exemples :
 - $\varphi(x) = \sum_i A_i \cos(k x)$
 - $\Psi(x) = \sum_i A_i e^{ikx}$
 note : $e^{ix} = \cos(x) + i \sin(x)$

L'EXPERIENCE DES FENTES D'YOUNG

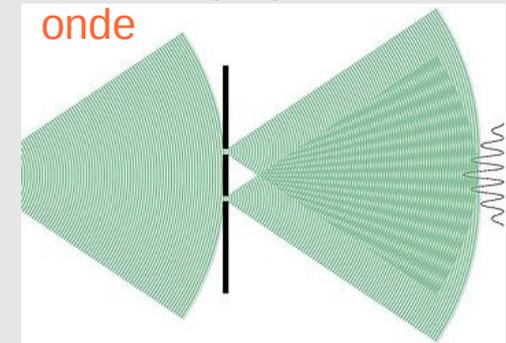
L'expérience :



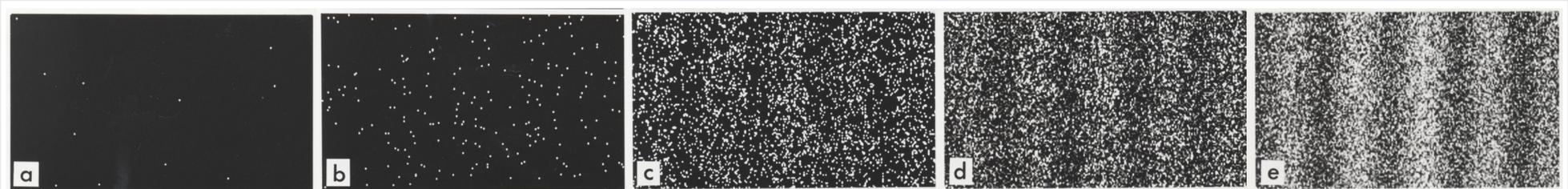
Cas #1: projectile = bille



Cas #2: projectile = onde



Cas #3: projectile = objet quantique (électron, photon)



On peut observer les impacts individuels et les franges d'interférences !

Remarque : si on détecte par quel fente la particule passe, l'interférence disparaît.

→ physique universelle (décohérence) [S. Haroche – nobel 2012]

Dualité onde-corpuscule

paquet d'ondes :
exemples :
- $\varphi(x) = \sum_i A_i \cos(k x)$
- $\Psi(x) = \sum_i A_i e^{ikx}$
note : $e^{ix} = \cos(x) + i \sin(x)$

Description

- paquet d'ondes: $\Psi(\mathbf{r},t) \propto \int A(\mathbf{r}) e^{-i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} d\mathbf{k}$
↔ état quantique $|\psi(t)\rangle$
- relations d'Heisenberg: $\Delta P \cdot \Delta x > \hbar/2$; $\Delta E \cdot \Delta t > \hbar/2$

Propagation

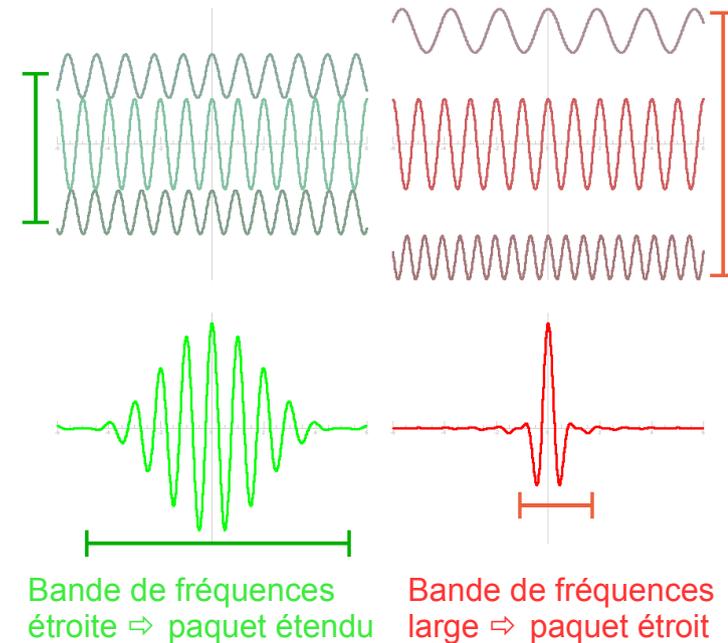
- équation de Schrödinger (déterministe):
- $i\hbar d|\psi(t)\rangle/dt = H(t)|\psi(t)\rangle$ où $H(t)$: opérateur énergie
- solutions: $|\psi(t)\rangle = \sum_a c_a(t) |\psi_a\rangle$
 $|\psi_a\rangle$: état correspondant à la valeur $a \in \{a\}$

Le problème de la mesure

- résultat d'une mesure est probabiliste: $P_a = |c_a|^2$
- réduction du paquet d'onde
mesure donnant 'a' place le système dans l'état $|\psi_a\rangle$

Interprétation ?

- artefact mathématique (Copenhague)
- physique universelle (décohérence) [S. Haroche – nobel 2012]



Dualité onde-corpuscule

paquet d'ondes :
exemples :
- $\varphi(x) = \sum_i A_i \cos(k x)$
- $\Psi(x) = \sum_i A_i e^{ikx}$
note : $e^{ix} = \cos(x) + i \sin(x)$

Desc

→

Propriété purement quantique
(**moment angulaire interne**)

Prop

→

- grandeur vectoriel (\Rightarrow orientation)
- norme = $s \hbar / 2$ où s est entier
- nombre quantique associé : $s/2$

Le pr

→

On distingue les particules portant un spin :
1/2 entier : les fermions

→

- état antisymétrique
- 2 fermions indiscernables ne peuvent être dans le même état quantique

→

- particule de matière
- ex : l'électron

→

entier : les bosons

→

- état symétrique
- les bosons peuvent partager le même état quantique

Interp

→

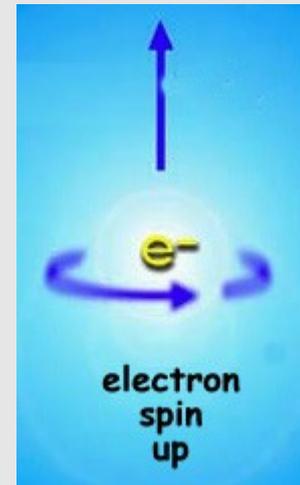
- particule de force
- ex : le photon

→ physique universelle (décohérence) [S. Haroche – nobel 2012]

LE SPIN

Introduit en 1925 pour expliquer la structure fine des raies spectrales

Arrive naturellement quand on traite la mécanique quantique dans le cadre relativiste



Aujourd'hui utilisé par ex dans les IRM



Révolutions théoriques

- ❖ mécanique quantique
- ❖ relativité restreinte

Relativité galiléenne (= Newton)

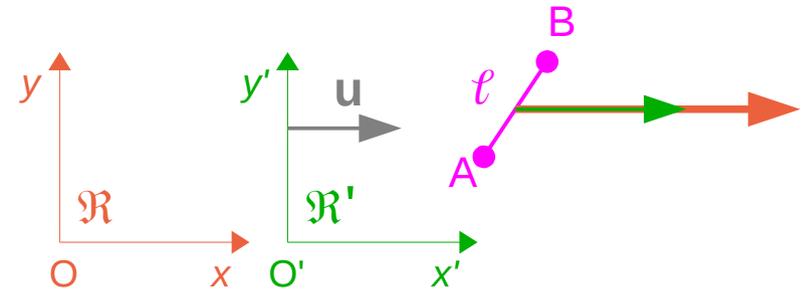
- le mouvement est **relatif**
- $\mathbf{v}_{A/\mathcal{R}} = \mathbf{u}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}} + \mathbf{v}_{A/\mathcal{R}'}$
- lois de Newton (point matériel):
- vrai dans tout réf. inertiel
- temps identique dans tout réf. inertiel = un **temps absolue**
- Lois de transformation

(\mathcal{R} et \mathcal{R}' ont la même origine à $t=0$)

$$\begin{cases} x \rightarrow x' = x - u_x \times t \\ y \rightarrow y' = y - u_y \times t \\ z \rightarrow z' = z - u_z \times t \\ t \rightarrow t' = t \end{cases}$$

les longueurs sont conservées :

$$\ell \rightarrow \ell$$



↳ Les lois de Newton

- basées sur des principes simples
- décrivent tous les phénomènes mécaniques autour de nous

↳ Mais ... et la lumière ?

- ondes électromagnétiques se propagent dans l'*éther luminifère*, une matière fixe liée à un référentiel absolu (?) - pas vérifier !
- vitesse indépendante de la source
- rompt l'invariance galiléenne

Photons ?

Principes de relativité

(1/2)

« Enfermez-vous avec un ami dans la cabine principale à l'intérieur d'un grand bateau et prenez avec vous des mouches, des papillons, et d'autres petits animaux volants. Prenez une grande cuve d'eau avec un poisson dedans, suspendez une bouteille qui se vide goutte à goutte dans un grand récipient en dessous d'elle. Avec le bateau à l'arrêt, observez soigneusement comment les petits animaux volent à des vitesses égales vers tous les côtés de la cabine. Le poisson nage indifféremment dans toutes les directions, les gouttes tombent dans le récipient en dessous, et si vous lancez quelque chose à votre ami, vous n'avez pas besoin de le lancer plus fort dans une direction que dans une autre, les distances étant égales, et si vous sautez à pieds joints, vous franchissez des distances égales dans toutes les directions. Lorsque vous aurez observé toutes ces choses soigneusement (bien qu'il n'y ait aucun doute que lorsque le bateau est à l'arrêt, les choses doivent se passer ainsi), faites avancer le bateau à l'allure qui vous plaira, pour autant que la vitesse soit uniforme [c'est-à-dire constante] et ne fluctue pas de part et d'autre. Vous ne verrez pas le moindre changement dans aucun des effets mentionnés et même aucun d'eux ne vous permettra de dire si le bateau est en mouvement ou à l'arrêt ... »

– Galilée, *Dialogue concernant les deux plus grands systèmes du monde*, 1632

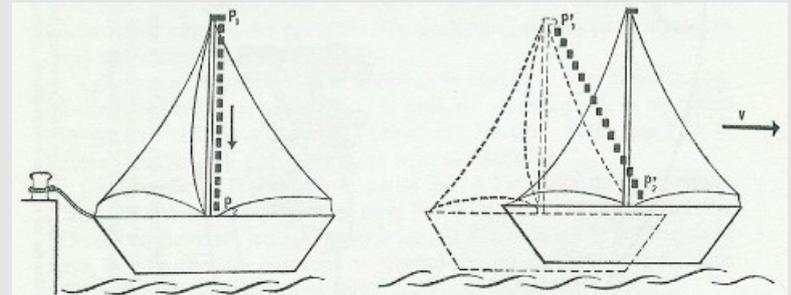


FIG. 7. — La pierre tombant du haut du mât aboutit au pied de celui-ci quel que soit le mouvement du bateau par rapport à la rive.
« Toutes les choses qui se trouvent sur la terre se meuvent avec la terre. La pierre jetée de la hune reviendra en bas de quelque façon que le navire se meuve. »

Giordano BRUNO (*La Cena de le Ceneri*).

(1) Giordano BRUNO (1568-1600), admet le caractère infini de l'univers copernicien. Emprisonné par l'Inquisition en 1593, Bruno est brûlé à Rome le 17 février 1600.

Relativité galiléenne (= Newton)

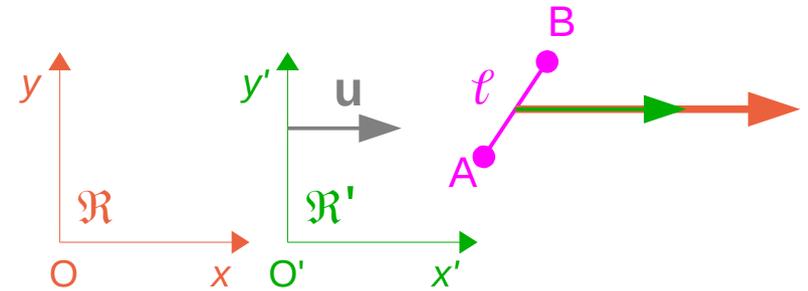
- le mouvement est **relatif**
- $\mathbf{v}_{A/\mathcal{R}} = \mathbf{u}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}} + \mathbf{v}_{A/\mathcal{R}'}$
- lois de Newton (point matériel):
- vrai dans tout réf. inertiel
- temps identique dans tout réf. inertiel = un **temps absolue**
- Lois de transformation

(\mathcal{R} et \mathcal{R}' ont la même origine à $t=0$)

$$\begin{cases} x \rightarrow x' = x - u_x \times t \\ y \rightarrow y' = y - u_y \times t \\ z \rightarrow z' = z - u_z \times t \\ t \rightarrow t' = t \end{cases}$$

les longueurs sont conservées :

$$\ell \rightarrow \ell$$



↳ Les lois de Newton

- basées sur des principes simples
- décrivent tous les phénomènes mécaniques autour de nous

↳ Mais ... et la lumière ?

- ondes électromagnétiques se propagent dans l'*éther luminifère*, une matière fixe liée à un référentiel absolu (?) - pas vérifier !
- vitesse indépendante de la source
- rompt l'invariance galiléenne

Photons ?

Rela

REFERENTIEL INERTIEL (=GALILEEN)

référentiel dans lequel un objet isolé est en translation rectiligne uniforme
⇔ référentiel dans lequel le principe d'inertie s'applique

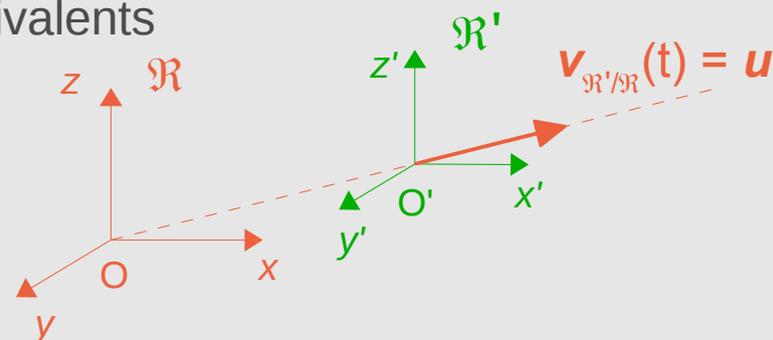
↻ *la principe d'inertie ne s'applique que dans un référentiel inertiel !*

Il existe une famille de référentiels, appelés galiléens ou inertiels, tels que, par rapport à l'un de ces référentiels, tout point matériel isolé (qui n'est soumis à aucune action extérieure) est soit au repos, soit animé d'un mouvement rectiligne et uniforme

⇒ La détermination d'un *bon* référentiel galiléen est expérimentale ; seule la cohérence entre la théorie et la mesure (mouvement rectiligne uniforme) valide le choix a posteriori.

⇒ tous les référentiels galiléens sont équivalents

⇔ pas de référentiel privilégié



Photons ?

Relativité galiléenne (= Newton)

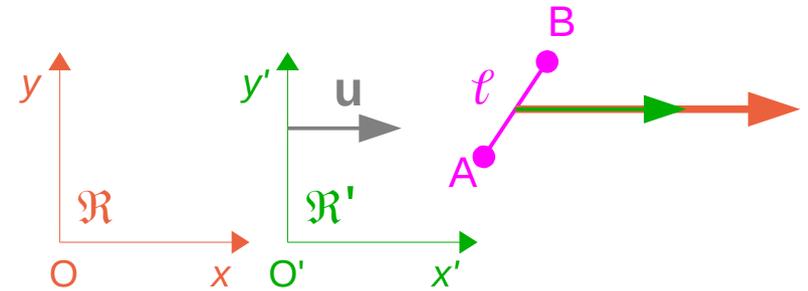
- le mouvement est **relatif**
- $\mathbf{v}_{A/\mathcal{R}} = \mathbf{u}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}} + \mathbf{v}_{A/\mathcal{R}'}$
- lois de Newton (point matériel):
- vrai dans tout réf. inertiel
- temps identique dans tout réf. inertiel = un **temps absolue**
- Lois de transformation

(\mathcal{R} et \mathcal{R}' ont la même origine à $t=0$)

$$\begin{cases} x \rightarrow x' = x - u_x \times t \\ y \rightarrow y' = y - u_y \times t \\ z \rightarrow z' = z - u_z \times t \\ t \rightarrow t' = t \end{cases}$$

les longueurs sont conservées :

$$\ell \rightarrow \ell$$



↳ Les lois de Newton

- basées sur des principes simples
- décrivent tous les phénomènes mécaniques autour de nous

↳ Mais ... et la lumière ?

- ondes électromagnétiques se propagent dans l'*éther luminifère*, une matière fixe liée à un référentiel absolu (?) - pas vérifier !
- vitesse indépendante de la source
- rompt l'invariance galiléenne

Photons ?

Principes de relativité

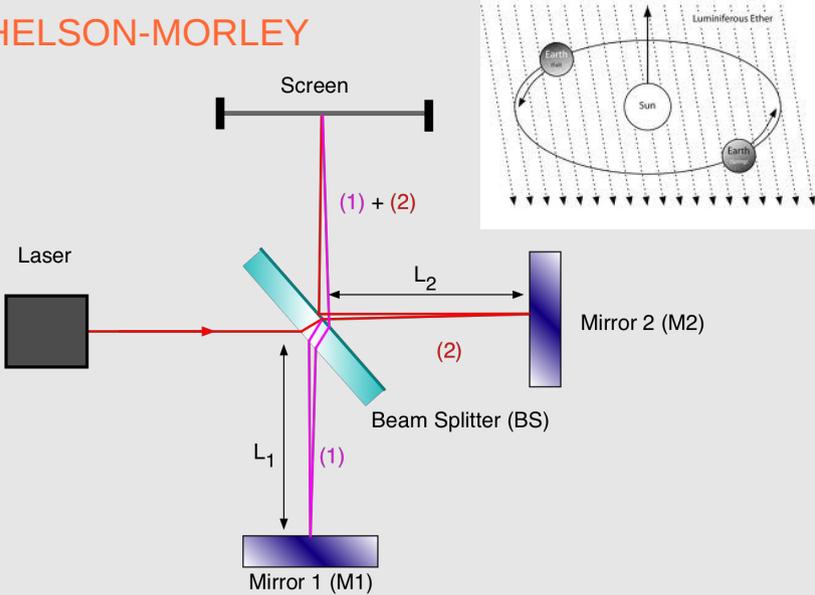
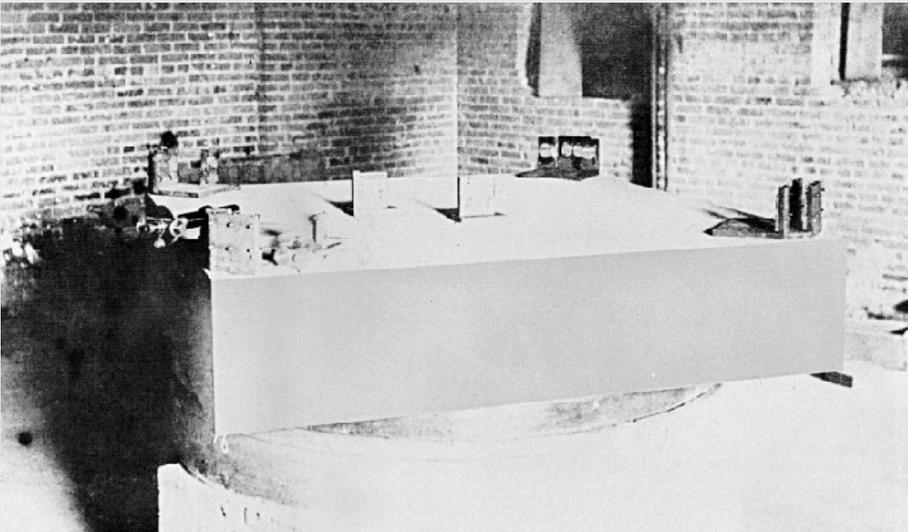
(1/2)

Relativité galiléenne (= Newton)

→ le mouvement est **relatif**



EXPERIENCE DE MICHELSON-MORLEY



Tentative de mesure du mouvement de la terre dans l'éther lumineux
⇒ Pas de direction privilégiée observée

Photons ?

Relativité galiléenne (= Newton)

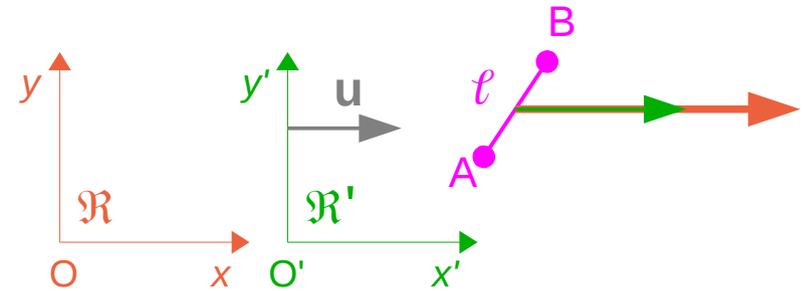
- le mouvement est **relatif**
- $\mathbf{v}_{A/\mathcal{R}} = \mathbf{u}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}} + \mathbf{v}_{A/\mathcal{R}'}$
- lois de Newton (point matériel):
- vrai dans tout réf. inertiel
- temps identique dans tout réf. inertiel = un **temps absolue**
- Lois de transformation

(\mathcal{R} et \mathcal{R}' ont la même origine à $t=0$)

$$\begin{cases} x \rightarrow x' = x - u_x \times t \\ y \rightarrow y' = y - u_y \times t \\ z \rightarrow z' = z - u_z \times t \\ t \rightarrow t' = t \end{cases}$$

les longueurs sont conservées :

$$\ell \rightarrow \ell$$



↳ Les lois de Newton

- basées sur des principes simples
- décrivent tous les phénomènes mécaniques autour de nous

↳ Mais ... et la lumière ?

- ondes électromagnétiques se propagent dans l'*éther luminifère*, une matière fixe liée à un référentiel absolu (?) - pas vérifier !
- vitesse indépendante de la source
- rompt l'invariance galiléenne

Photons ?

1905, A. Einstein se référant seulement à Newton, Maxwell, Hertz, Doppler and Lorentz

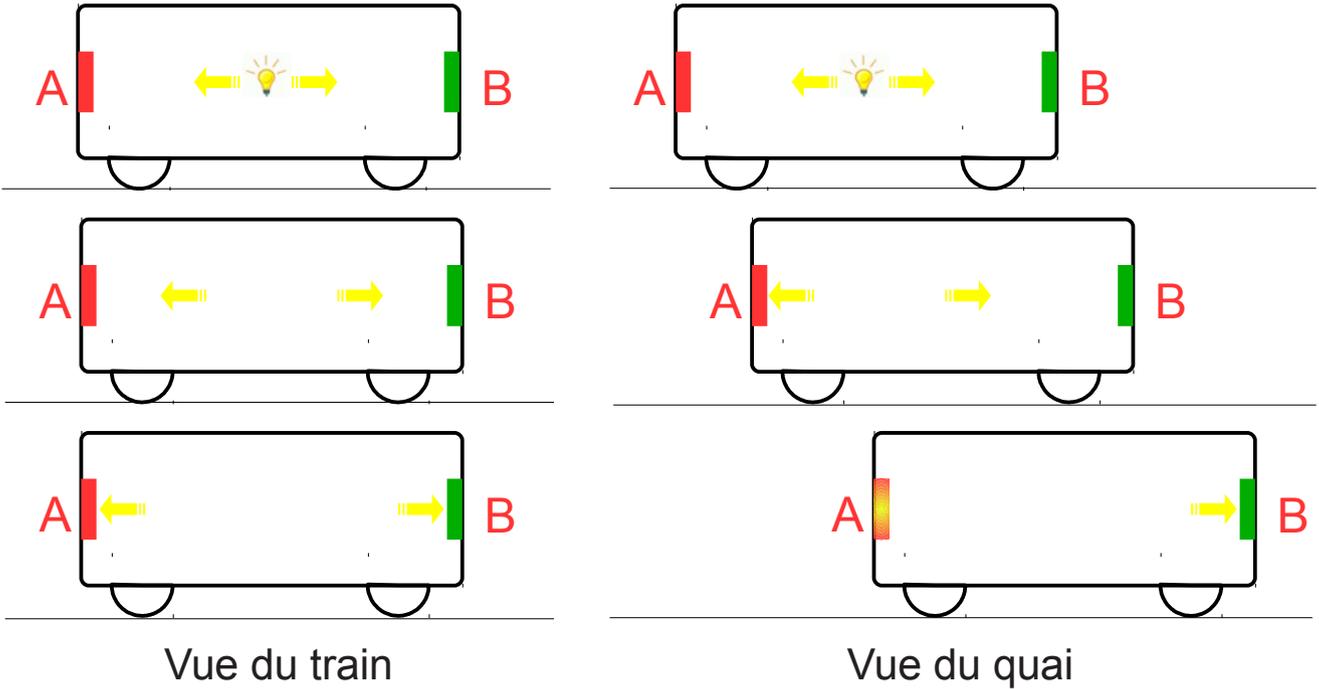
Postulats de la relativité restreinte

- les lois de la physique ont la même forme dans tous les réf. inertiels
- plus seulement les lois de la mécanique !
- « restreinte » aux référentiels inertiels
(étendue à tous les référentiels en relativité générale)
- la vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tous les réf. inertiels
- abandon de l'éther

Conséquences

- simultanéité et causalité
- contraction des longueurs et dilatation du temps
- équivalence masse – énergie

Simultanéité – causalité

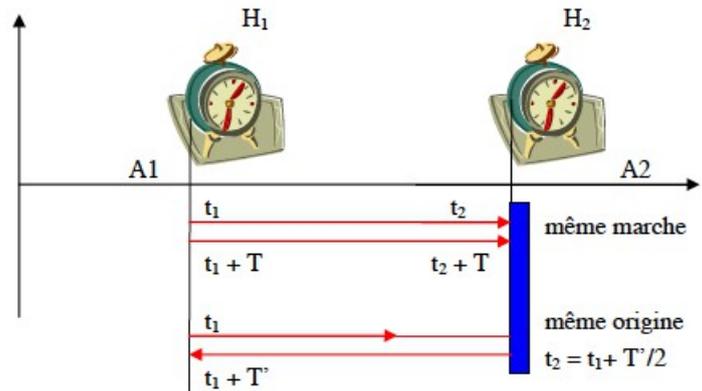


Vue du train :
A et B atteints simultanément

Vue du quai :
A atteint avant B

⇒ Relativité de la simultanéité
Paradoxe du train piégé

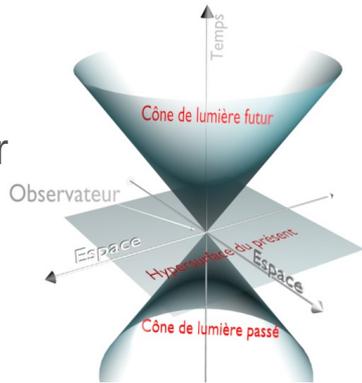
Synchronisation des horloges



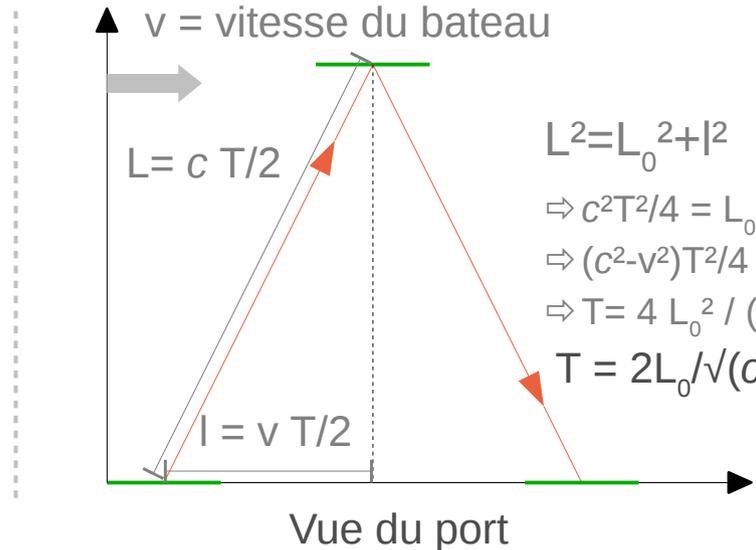
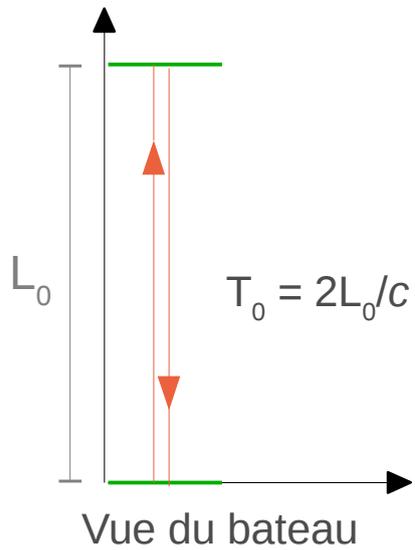
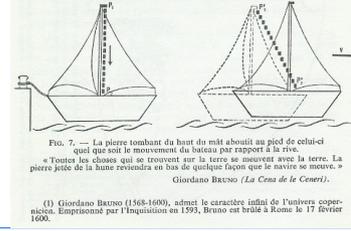
Causalité

- effet postérieur à la cause
- temps de propagation de la lumière
- une cause produite à $t=0$ ne peut avoir d'effet à $t=\Delta t$ que dans périmètre avec $r=c\Delta t$

↘ vitesse de la lumière = vitesse maximale



Espace-temps



$$L^2 = L_0^2 + l^2$$

$$\Rightarrow c^2 T^2 / 4 = L_0^2 + v^2 T^2 / 4$$

$$\Rightarrow (c^2 - v^2) T^2 / 4 = L_0^2$$

$$\Rightarrow T = 4 L_0^2 / (c^2 - v^2)$$

$$T = 2L_0 / \sqrt{c^2 - v^2}$$

$$\Rightarrow T = T_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2} = \gamma T_0$$

où : $\gamma = 1 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$

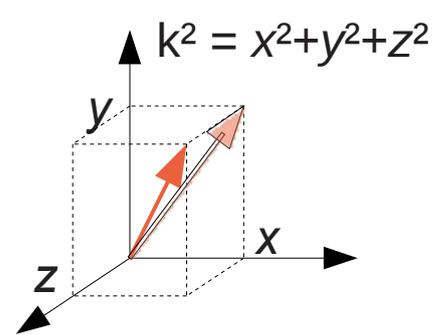
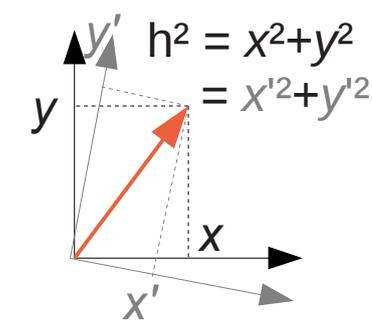
- $v \ll c \Rightarrow \gamma \approx 1$
- $v \rightarrow c \Rightarrow \gamma \rightarrow \infty$

- ↘ Dilatation du temps
- ↘ Contraction des longueurs

Lois de transformation de Lorentz (boost le long de x) :

$$\begin{cases} x \rightarrow x' = \gamma (x - v \times t) \\ y \rightarrow y' = y \\ z \rightarrow z' = z \\ t \rightarrow t' = \gamma (t - v \times x / c^2) \end{cases}$$

Espace-temps de Minkowski :

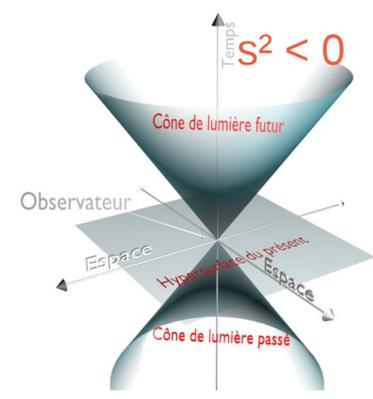


$s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - (ct)^2$

s : intervalle d'espace-temps invariant par rotation

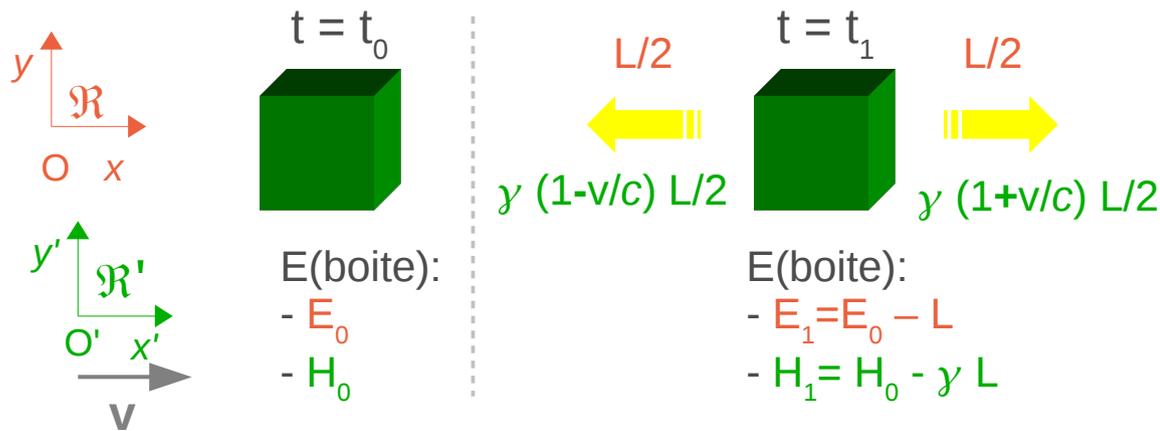
rotation dans l'espace-temps ⇔ changement de réf. inertiel

Espace-temps (4D)



Équivalence masse-énergie

« Does the inertia of a body depend upon its energy content ? »



$$\Rightarrow (H_0 - E_0) - (H_1 - E_1) = L(\gamma - 1)$$

Seule l'énergie cinétique (K) dépend du mouvement :

$$H_0 - E_0 = K_0 + C$$

$$H_1 - E_1 = K_1 + C$$

$$\Rightarrow K_0 - K_1 = \Delta K \approx \frac{1}{2} [L/c^2] v^2 \equiv \frac{1}{2} \Delta m v^2$$

$$\Rightarrow \Delta m = L/c^2$$

Δm : changement de la masse
 L : énergie émise par radiation

→ si un corps perd une énergie E par radiation, sa masse diminue par E/c^2

↘ la masse d'un corps est une mesure de son contenu en énergie

↘ les radiations transportent de l'inertie

Généralisation :

→ $E_0 = mc^2$: énergie au repos (dans le ref. où le corps est immobile)

→ $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$: énergie totale (cas relativiste)

Les particules *ordinaires*

- ❖ Quelles sont-elles ?

LES UNITES

Les unités usuelles sont souvent inadaptés à la physique des particules

On utilisera :

- Energie : eV (*électron-volt*)

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

énergie acquise par un électron dans un champ électrique de 1V

Et, en vertu de l'équivalence masse-énergie ($E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$) :

- Impulsion : eV/c

- Masse : eV/c²

$$1\text{eV}/c^2 = 1.8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$$

Multiples usuels : keV (10³), MeV(10⁶), GeV(10⁹), TeV (10¹²)

Pour les distances (peu utiliser en physique des particules), on verra :

- l'ångström : 1 Å = 10⁻¹⁰ m

- le *fermi* (ou *femtomètre*) : 1 fm = 10⁻¹⁵ m

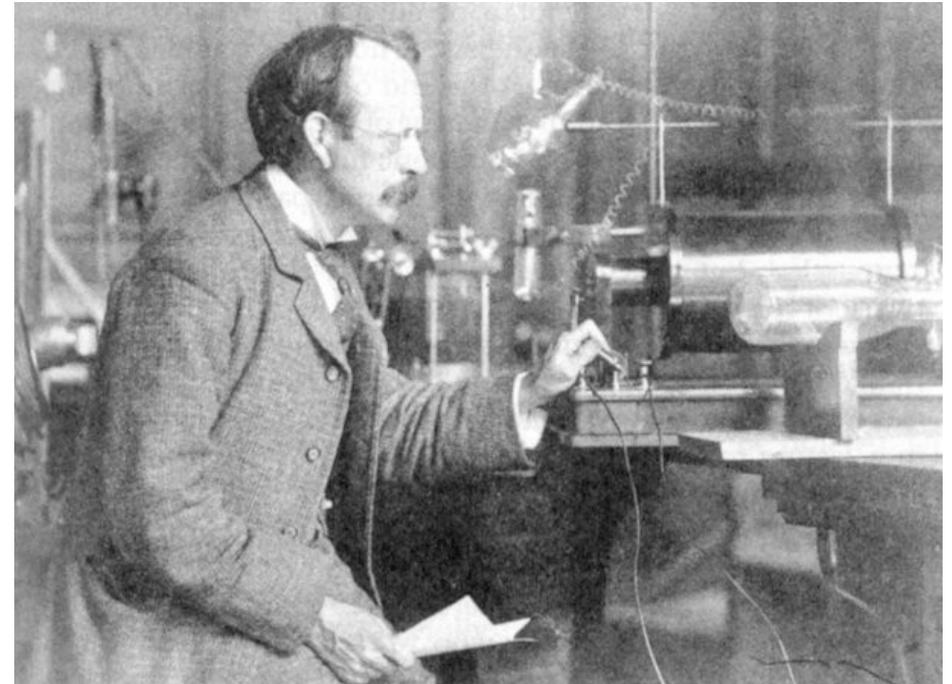
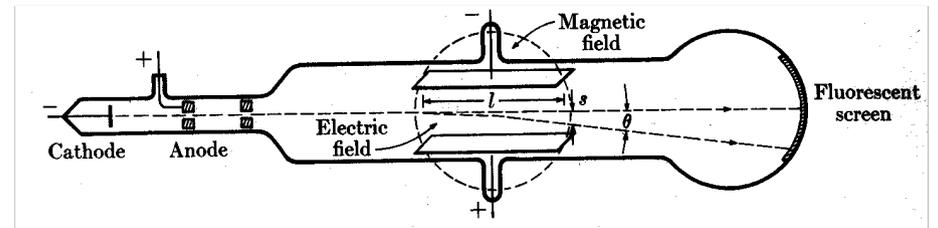
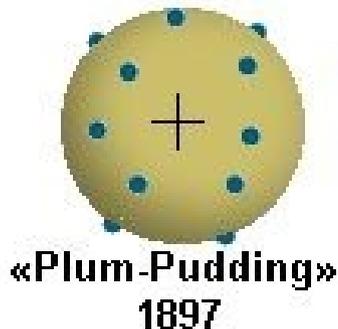
L'électron

Découvert par J-J Thomson en 1897

- charge électrique $= -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- **charge électrique élémentaire** = -1
- mesure sa masse
 $m_e = 1/1800 m_{\text{Hydrogène}}$

L'atome selon Thomson

- « plum-pudding »
- électrons plongés dans un atome lourd composé de charges positives de nature inconnue



↘ l'électron est aujourd'hui encore considéré comme élémentaire

Le noyau atomique

Expérience de Rutherford (1911)

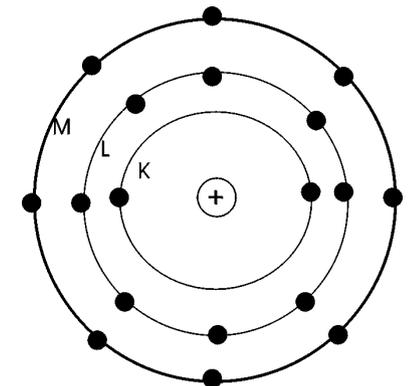
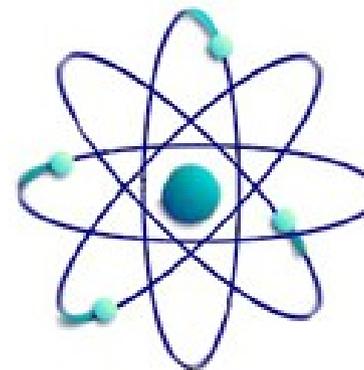
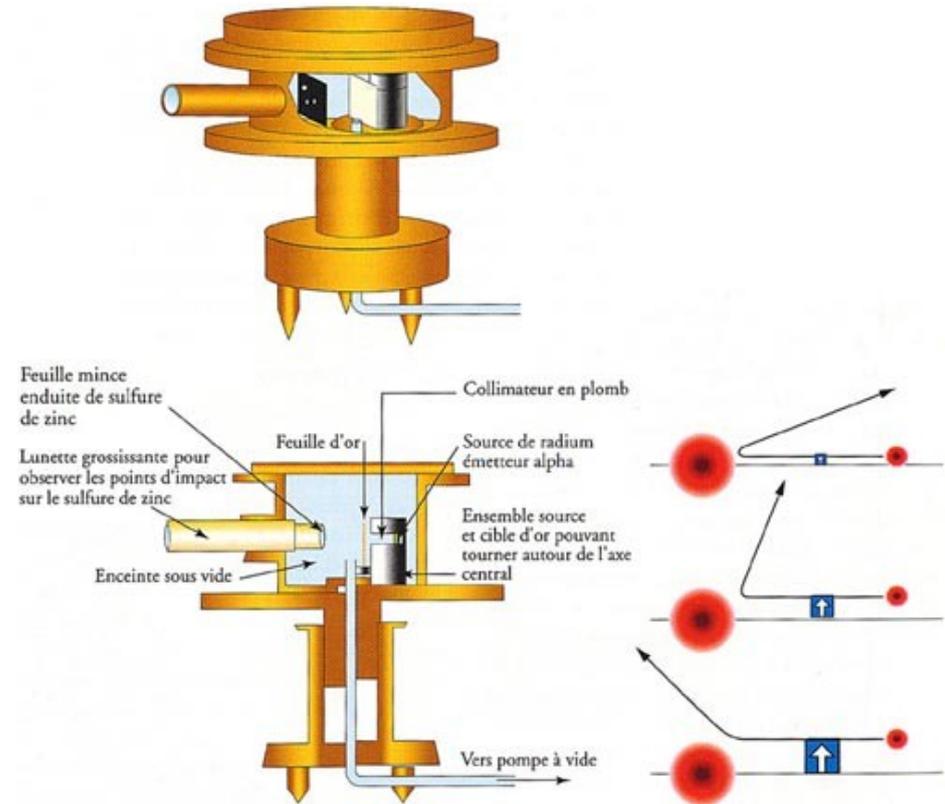
- la masse est concentrée au cœur d'un atome composé de vide
- « c'est comme si vous bombardiez un buvard avec un obus de 75 et que vous le voyez rebondir »

Nouveau modèle atomique

- L'atome est essentiellement vide
- noyau extrêmement petit
- nuage d'électrons qui orbitent très loin du noyau

Modèle atomique de Bohr (1913)

- atome en couche
- électrons assujettis à des orbites quantifiées



Le noyau atomique

Expe

SONDE ET LONGUEUR D'ONDE

Particule alpha :
masse = 3.7 MeV (7.10^{-27} kg)

Désintégration α du radium

$$E_{\alpha} = 4.6 \text{ MeV}$$

$$\Rightarrow v = 5\% c$$

Nouv

Du point de vue quantique :
 $\lambda = \sim 0.07 \text{ \AA}$
($\sim 10\%$ de la taille de l'atome)

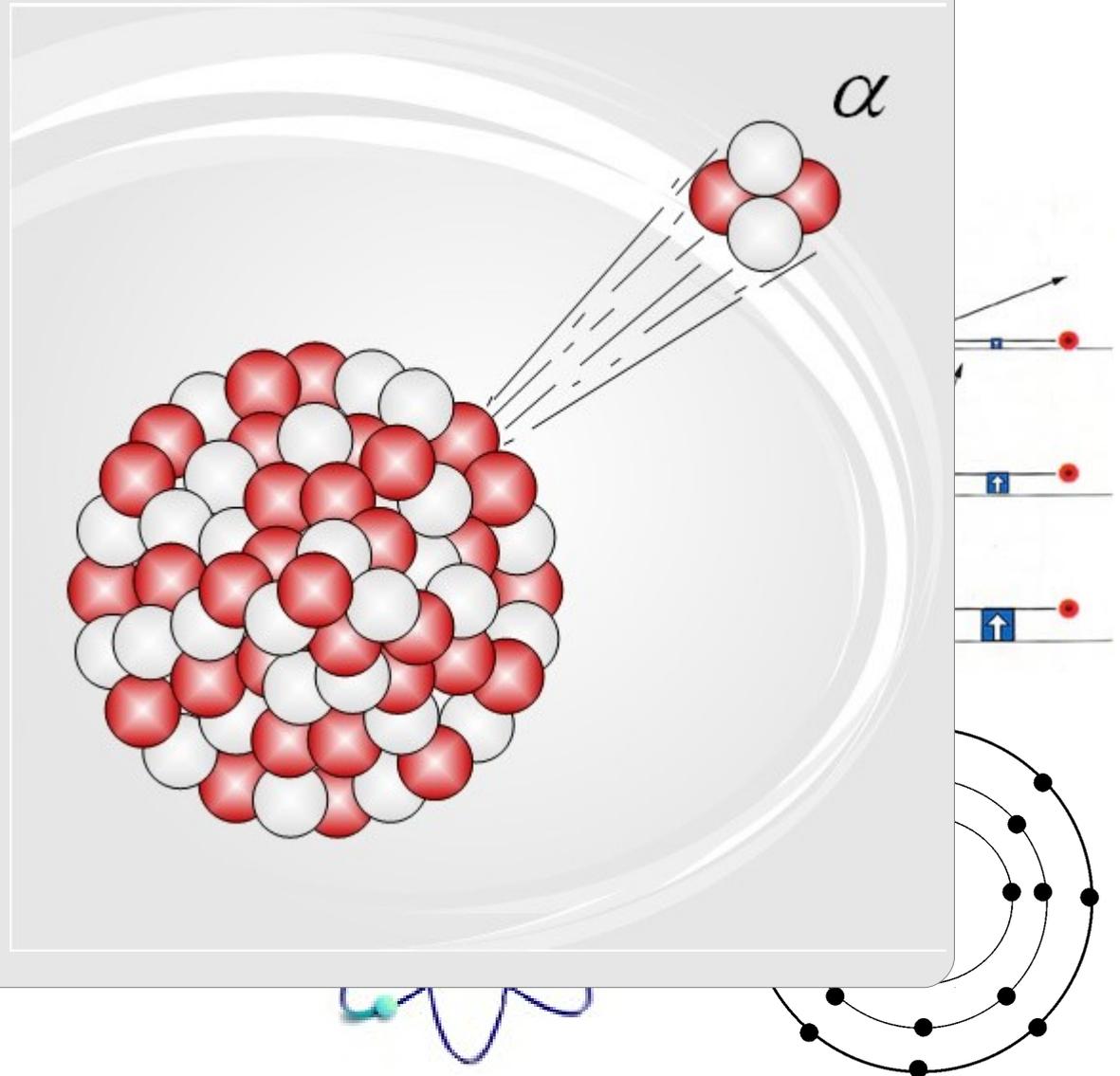
\Rightarrow longueur d'onde permettant
de sonder l'intérieur de l'atome !

Mod

augmenter l'énergie

\Rightarrow diminuer la longueur d'onde

\Rightarrow accès à des détails plus fins



Le noyau atomique

Expérience de Rutherford (1911)

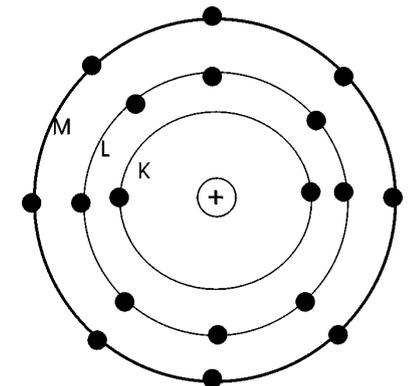
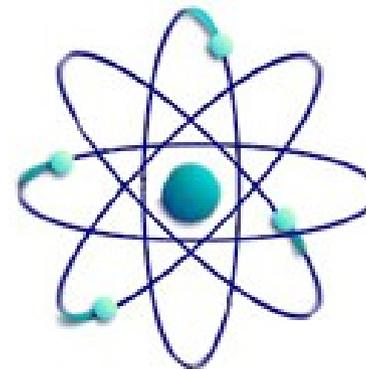
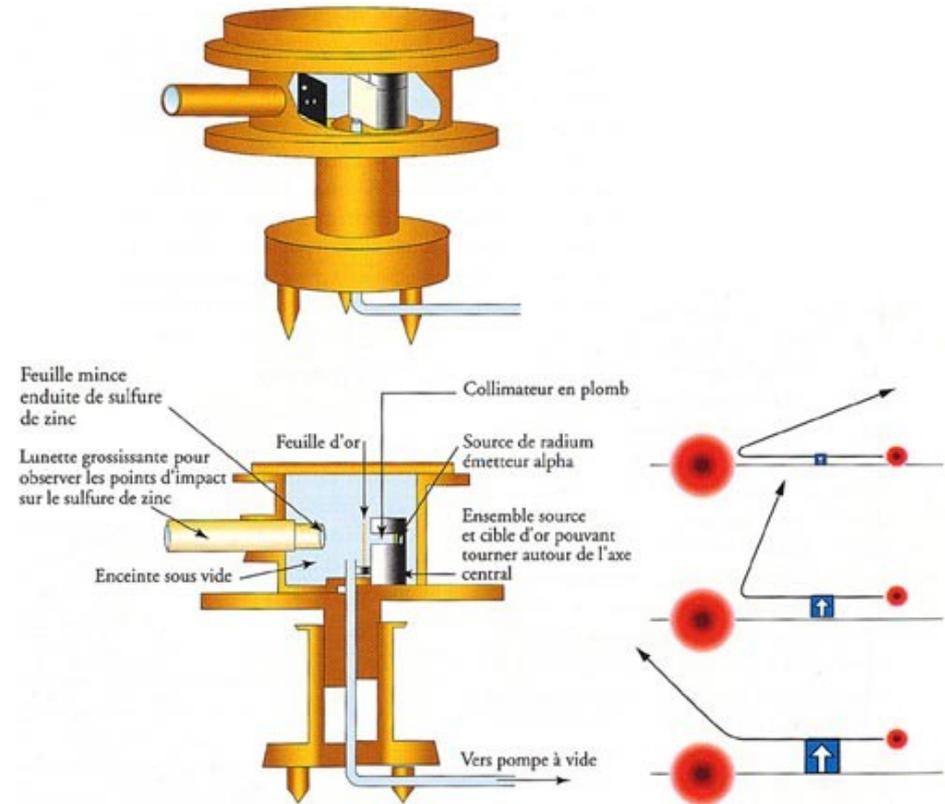
- la masse est concentrée au cœur d'un atome composé de vide
- « c'est comme si vous bombardiez un buvard avec un obus de 75 et que vous le voyez rebondir »

Nouveau modèle atomique

- L'atome est essentiellement vide
- noyau extrêmement petit
- nuage d'électrons qui orbitent très loin du noyau

Modèle atomique de Bohr (1913)

- atome en couche
- électrons assujettis à des orbites quantifiées

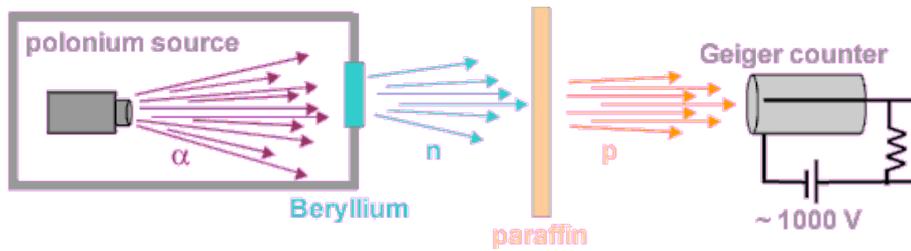


Les nucléons, constituants du noyau

Mise en évidence du **proton** (1919, Rutherford)

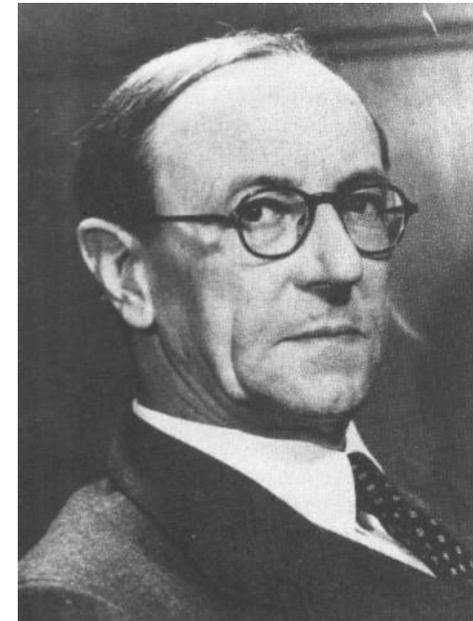
→ charge +1

Découverte du **neutron** (1932, Chadwick)



→ neutre : charge = 0

→ ~ même masse que le proton



Les particules *ordinaires*

- ❖ Les constituants de l'atome :
 - nucléons (proton & neutron), électron
 - et ... ?

La radioactivité

Fluorescence des sels d'uranium

1896 - Henri Becquerel

L'uranium émet un rayonnement qui lui est propre

Pierre & Marie Curie

→ ce n'est pas une réaction chimique

3 types de radioactivité selon leur degré de pénétration :

- **rayon α** : identifié à des noyaux d'hélium
- **rayon β** : identifié à des électrons
- **rayon γ** : identifié à des photons énergétiques émis par les noyaux



Pierre & Marie Curie

Les désintégrations β

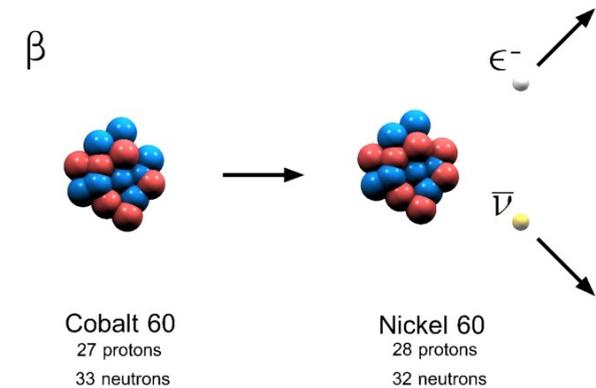
Les désintégrations β posent problème :

→ de l'énergie semble manquer

Hypothèse d'une nouvelle particule

1930, Pauli

→ le **neutrino**



→ 1956 : 1ère mise en évidence d'un neutrino

- Première expérience auprès d'un réacteur nucléaire (Savannah River, USA)
- Cowan et Reines observent la capture d'un (anti-)neutrino par un proton

(Aparté) les interactions : principe

(1/2)

Interaction :

→ résultat d'une force exercée entre 2 corps

Caractéristiques :

→ **nature des corps** sur lesquels elles s'exercent

→ **intensité**

→ **porté**

Exemples :

→ interaction électrostatique

$$- \mathbf{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \times q_1 q_2 / r^2 \times \mathbf{u}_{12}$$

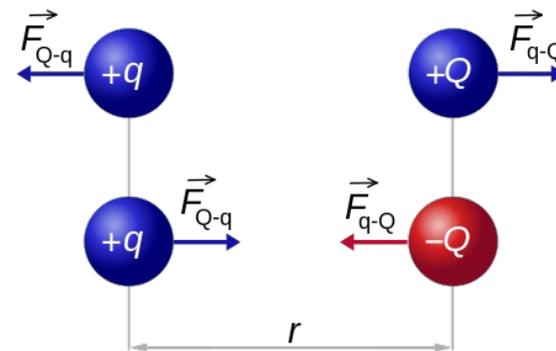
$$- \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9,0 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2 / \text{C}^2$$

→ interaction gravitationnelle

$$- \mathbf{F}_{12} = -G \times m_1 m_2 / r^2 \times \mathbf{u}_{12}$$

$$- G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2 / \text{kg}^2$$

⇒ trop faible pour jouer un rôle en physique des particules



$$|\vec{F}_{Q-q}| = |\vec{F}_{q-Q}| = k \frac{|q \times Q|}{r^2}$$



(Aparté) les interactions : principe

(1/2)

Interaction :

→ résultat

Caractéristique

→ nature

→ intensité

→ portée

Exemples :

→ interaction gravitationnelle

- $\mathbf{F}_{12} = 1/(4\pi\epsilon_0) \times \dots$

- $1/(4\pi\epsilon_0) \times \dots$

→ interaction électrostatique

- $\mathbf{F}_{12} = -G \times m_1 m_2 / r^2 \times \mathbf{u}_{12}$

- $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2 / \text{kg}^2$

⇒ trop faible pour jouer un rôle en physique des particules

LOIS DE CONSERVATION

Les interactions respectent certaines lois de conservation

⇔ Certaines grandeurs sont conservées

⇒ Elles sont les mêmes avant et après l'interaction

Exemples :

- l'impulsion

- l'énergie

- la charge électrique

- ...

Les interactions sont déterminées par des lois de conservation

$$|\vec{F}_{Q-q}| = |\vec{F}_{q-Q}| = k \frac{|q \times q'|}{r^2}$$



La force électrostatique entre 2 électrons e_1 et e_2 :

- comment e_1 sait-il que e_2 existe et qu'il est donc soumis à une force ?
- échange d'information à la vitesse de propagation du champ électromagnétique
- ⇔ échange d'un photon *virtuel*



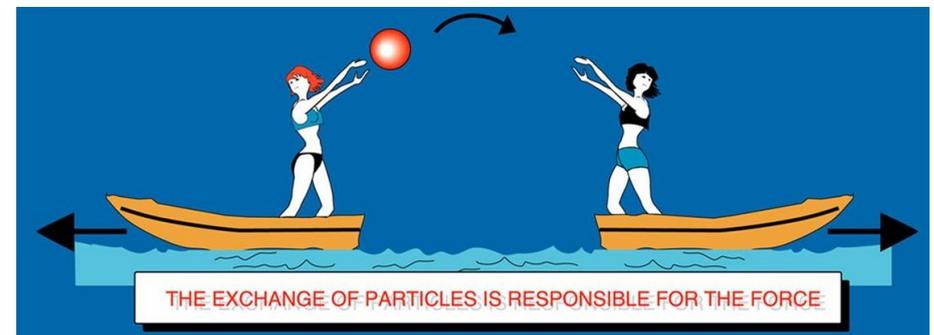
$E' > E$!! OK si $\Delta t < \hbar/E_\gamma \Rightarrow \Delta t_{\max} = \hbar/E_\gamma$

$\Delta t_{\max} = d_{\max}/c \Rightarrow d_{\max} = \hbar c/E_\gamma$

$m_\gamma = 0 \Rightarrow E_\gamma$ aussi petit qu'on veut $\Rightarrow d_{\max} = \infty$

↳ Interaction fondamentale:

- échange de particules
- particule échangée = vecteur de l'interaction
- portée de l'interaction $\propto 1/m_{\text{vecteur}}$



Interactions dans l'atome

Interaction électromagnétique

→ électrons (-) \leftrightarrow noyau (+)

Interaction nucléaire forte

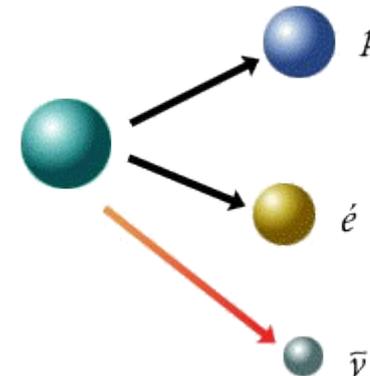
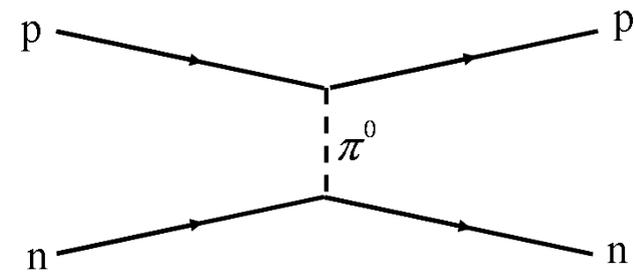
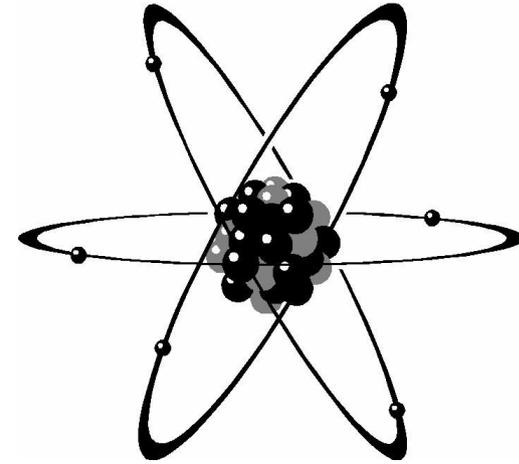
- entre les nucléons du noyau
- opposée à la répulsion coulombienne
- portée : $\sim 2 \text{ fm}$ ($= 2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$)
- vecteur (prédiction):

1934, Hypothèse de Yukawa

pion (π), masse $m_{\pi} \approx 3 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$

Interaction faible

- nucléons, électron & neutrino
- $n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}$
- intensité $\approx 10^{-7} - 10^{-6}$ int. forte
- portée très limitée
- vecteur ? ponctuelle ?



Interactions dans l'atome

Interaction e

→ électro

Interaction n

→ entre l

→ oppos

→ portée

→ vecteu

1934, H

pion (π)

Interaction f

→ nuclé

n → p

→ intensi

→ portée

→ vecteur ? ponctuelle ?

| PARTICULE DE MATIERE | | | | | | |
|----------------------|--------|----|----------------------|--------------------|--------|------|
| | M | Q | agit par interaction | | | Obs. |
| | | | forte | électro-magnétique | faible | |
| proton | 1 | +1 | ✓ | ✓ | ✓ | 1919 |
| neutron | 1 | 0 | ✓ | ✗ | ✓ | 1932 |
| électron | 1/2000 | -1 | ✗ | ✓ | ✓ | 1897 |
| neutrino | 0 ? | 0 | ✗ | ✗ | ✓ | 1930 |

| VECTEUR D'INTERACTION | | | |
|-----------------------|------|--------------------|------|
| vecteur | M | interaction | |
| photon | 0 | électro-magnétique | 1905 |
| pion | 1/10 | nucléaire forte | 1934 |
| ?? | 1000 | faible | ✗ |

p

n



Le positon

Equation du mouvement d'un électron

1928, Dirac

- mécanique quantique
- cas relativiste
- Equation de Dirac
- $i\hbar \frac{d|\psi(t)\rangle}{dt} = H(t) |\psi(t)\rangle$
où $H(t) = mc^2\alpha_0 - c\alpha.p$
- 2 solutions :
- énergie positive \Rightarrow électron
- énergie négative \Rightarrow positon

Observation :

1932, Anderson

- enregistre dans une chambre de Wilson, une particule avec les mêmes caractéristiques que l'électron mais une charge opposée

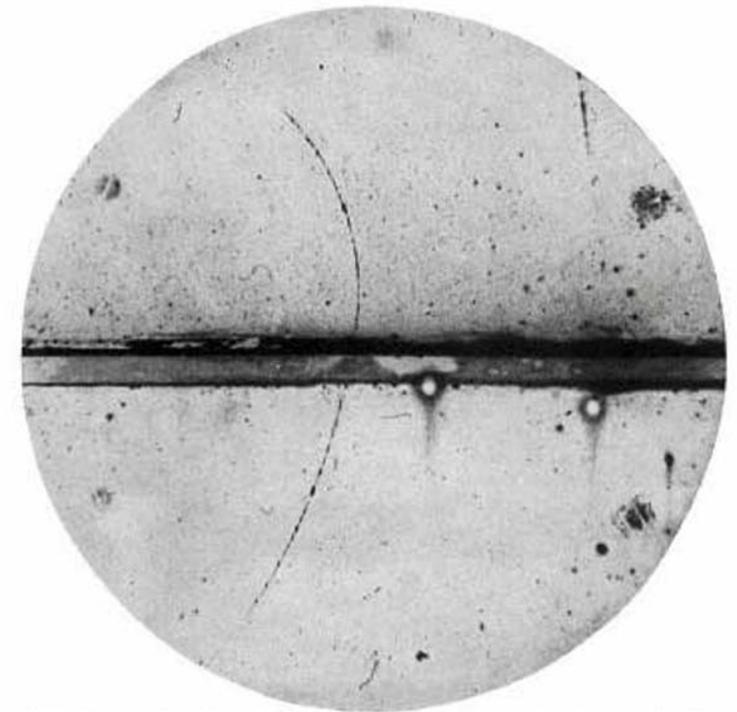
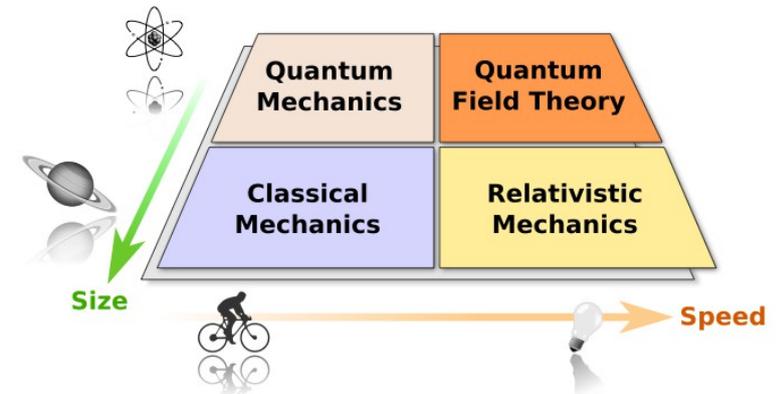


Fig. 1. A 65 million volt positron ($H_p = 2.1 \times 10^6$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H_p = 1.5 \times 10^6$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

Le positon

Equation du

1928, Dirac

- mécanique
- cas rel
- Equatio
- $i\hbar \nabla^2 \psi = H(t)\psi$
- où $H(t)$
- 2 solut
- énergie
- énergie

Observation

1932, Anderson

- enregistre dans une chambre de Wilson, une particule avec les mêmes caractéristiques que l'électron mais une charge opposée

L'ANTI-MATIERE

spin : moment angulaire interne d'une particule.

positon = anti-électron
la découverte de l'anti-électron marque la naissance de l'**anti-matière**

Le concept peut-être généralisé à toute particule.

Ainsi à chaque particule correspond une anti-particule :

- de même masse
- de même *spin*
- de charge opposée

Par convention, l'anti-particule de x est notée : \bar{x}

Quantum Theory

Relativistic mechanics

Speed

FIG. 1. A 65 million volt positron ($H_D = 2.1 \times 10^6$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H_D = 1.5 \times 10^6$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

L'âge d'or

- ❖ Une foison de nouvelles particules
- ❖ Le modèle des quarks

Le muon

« Who ordered this ? » (I. Rabi – Nobel 1944)

- découverte du muon par Anderson en 1936
- charge électrique -1
- beaucoup plus lourd que l'électron
- à peu près la masse attendue pour le méson de Yukawa
... mais pas les bonnes propriétés
- n'interagit pas par interaction forte ⇒ **lepton** (comme l'électron et le neutrino)
- caractéristiques :
 - $m = 105 \text{ GeV}/c^2$
 - instable : $\tau = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$

Le muon

leptons : particules n'interagissant pas par interaction forte par opposition aux **hadrons**

Avec de l'énergie cinétique :
 $E = mc^2$

équivalence masse-énergie

Pour produire une particule de masse m , il faut :

$$E_1 + E_2 > mc^2$$

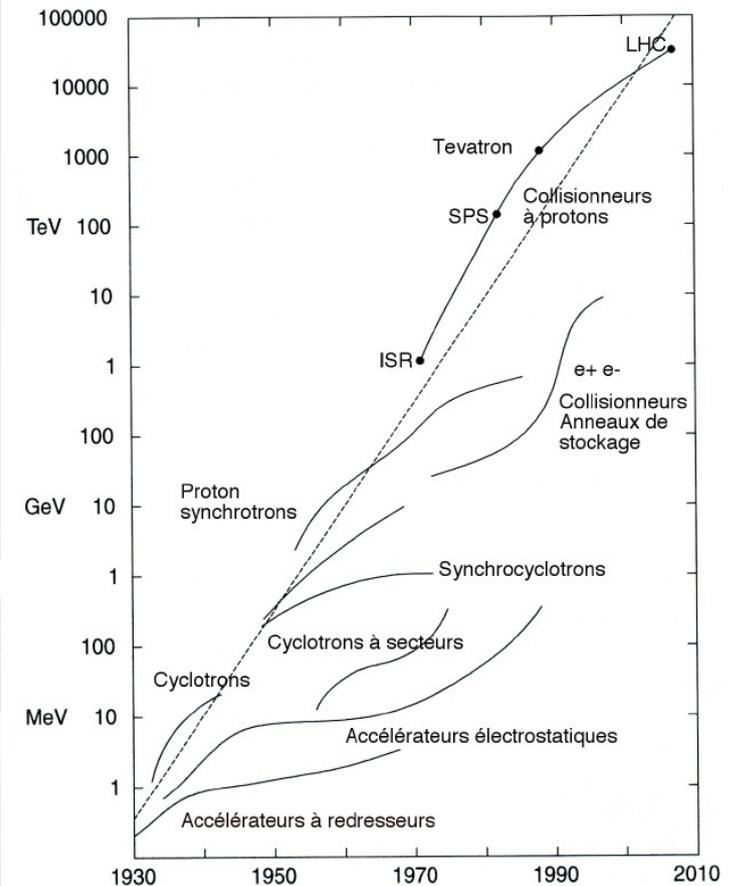
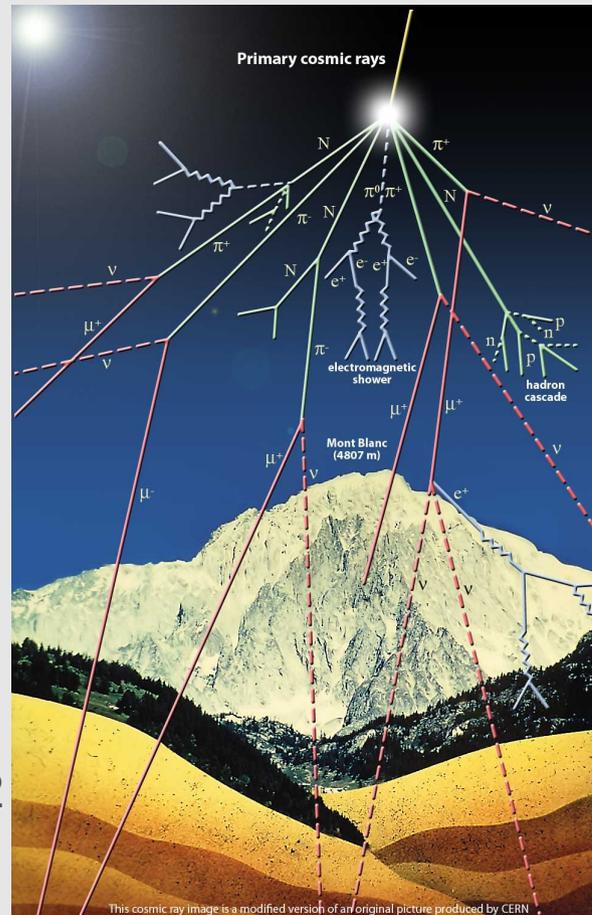


SOURCES D'ENERGIE

rayons cosmiques

- source « naturelles »
- découvert par Hess en 1912
- accélérateurs de particules
- de + en + puissants

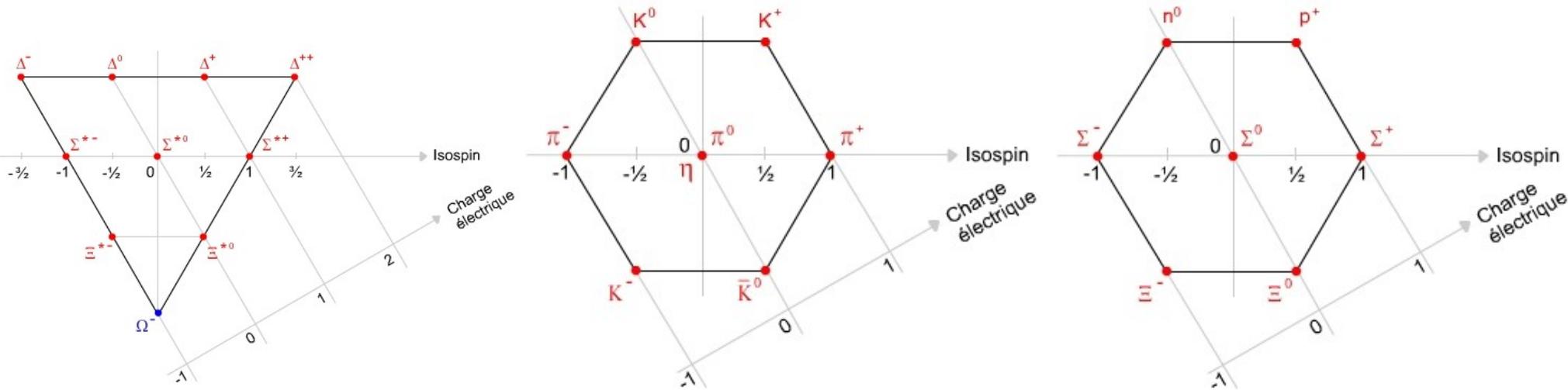
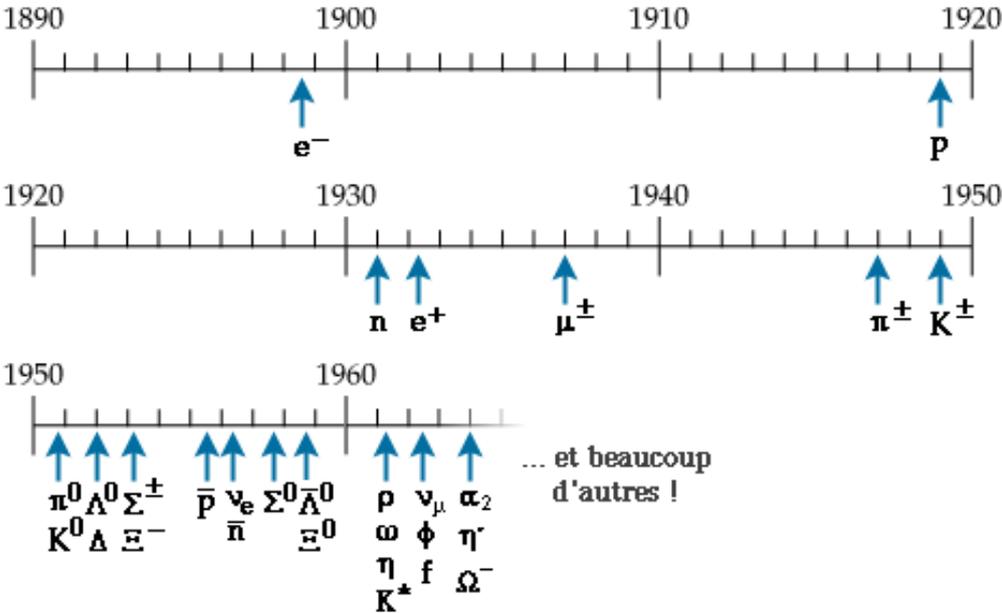
NOUVELLES PARTICULES : COMMENT SONT-ELLES PRODUITES ?



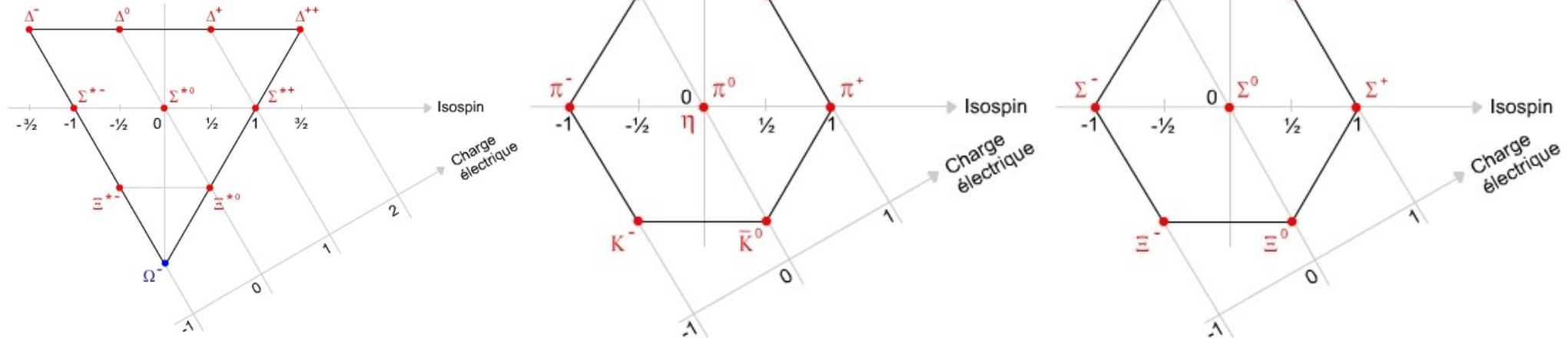
Une pluie de nouvelles particules

1957-1965 : les chambres à bulles

- pluie de nouvelles particules
- K^0 , Λ^0 semblent produits par paire ... étrange
- quand on ne comprend pas, on classe



Le modèle des quarks



« Three quarks for Munster Mark » ([Finnegans Wake](#), James Joyce)

1964, Gell-Mann et Nee'mann

- tous les *hadrons* alors connus peuvent être formés à partir de 3 quarks **u** (up), **d** (down) et **s** (strange !) et 3 anti-quarks : $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$
- n'est-ce qu'un simple artifice mathématique ?

Mise en évidence

1968, Slac (grand accélérateur d'électron) (Stanford)

- répétition l'expérience de Rutherford (à plus haute énergie)
- mise en évidence de « points durs » à l'intérieur des *hadrons*

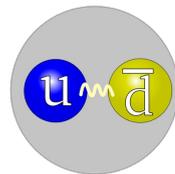
Les quarks

Charge électrique

- les quarks portent des charges fractionnaires :
- $-1/3$ ou $+2/3$ pour les quarks
- $+1/3$ ou $-2/3$ pour les anti-quarks

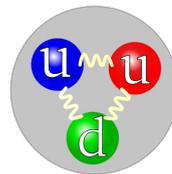
Les quarks ne se déplacent pas librement

- on ne peut pas les observer seuls
- ils sont confinés à l'intérieur de hadrons
- 2 types de hadrons :
- les *baryons* contiennent 3 quarks; ex : protons, neutrons, ...
- les *mésons* contiennent 1 quarks et 1 anti-quark; ex : pion (π), Kaon (K),...



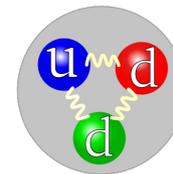
π^+

Un méson léger :
le *pion* chargé



p

Des baryons « ordinaires » :
le proton et le neutron



n

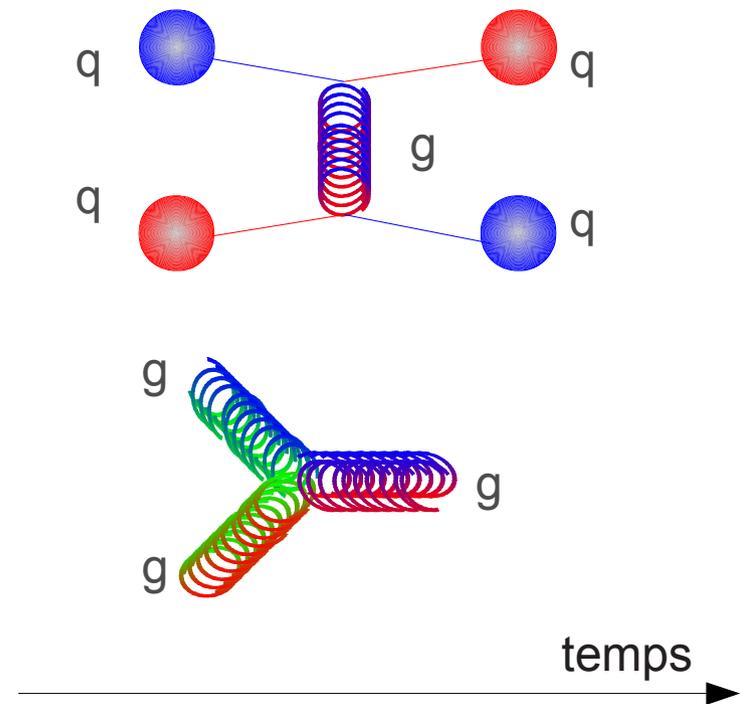
Les quarks et l'interaction forte

Charges de couleur

- nouveau type de charge porté par les quarks
- 6 charges différentes :
 - rouge, vert, bleu pour les quarks
 - $\overline{\text{rouge}}, \overline{\text{vert}}, \overline{\text{bleu}}$ pour les anti-quarks
- combinaisons blanches :
 $rvb = \overline{rvb} = \overline{rr} = \overline{vv} = \overline{bb} = \text{BLANC}$

L'interaction forte

- agit sur les charges de couleur par échange de couleurs
- conserve la saveur
 - saveur totale : avant = après
- vecteur : 8 gluons ($m_g = 0$)
- eux-même porteurs de couleurs
- ils peuvent interagir entre eux



Hadronisation

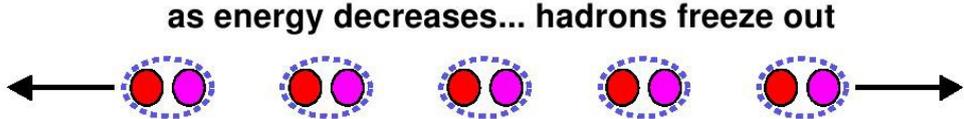
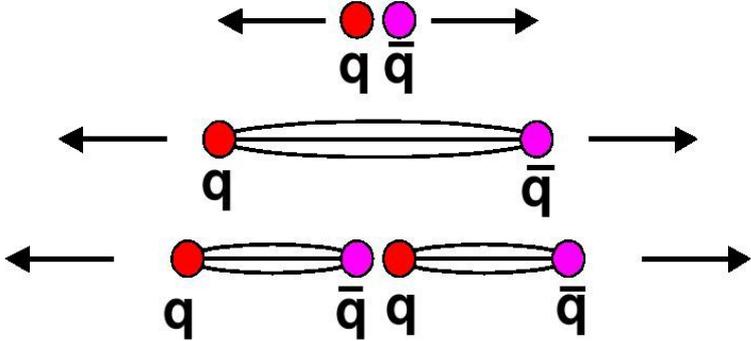
L'interaction forte agit comme un élastique :

- son intensité augmente avec la distance (1 GeV/fm)
- quand l'énergie disponible est suffisante des nouvelles paires de quarks sont créées ($E > 2m_q$)

Seules les objets blancs circulent

- le vide est opaque à la couleur

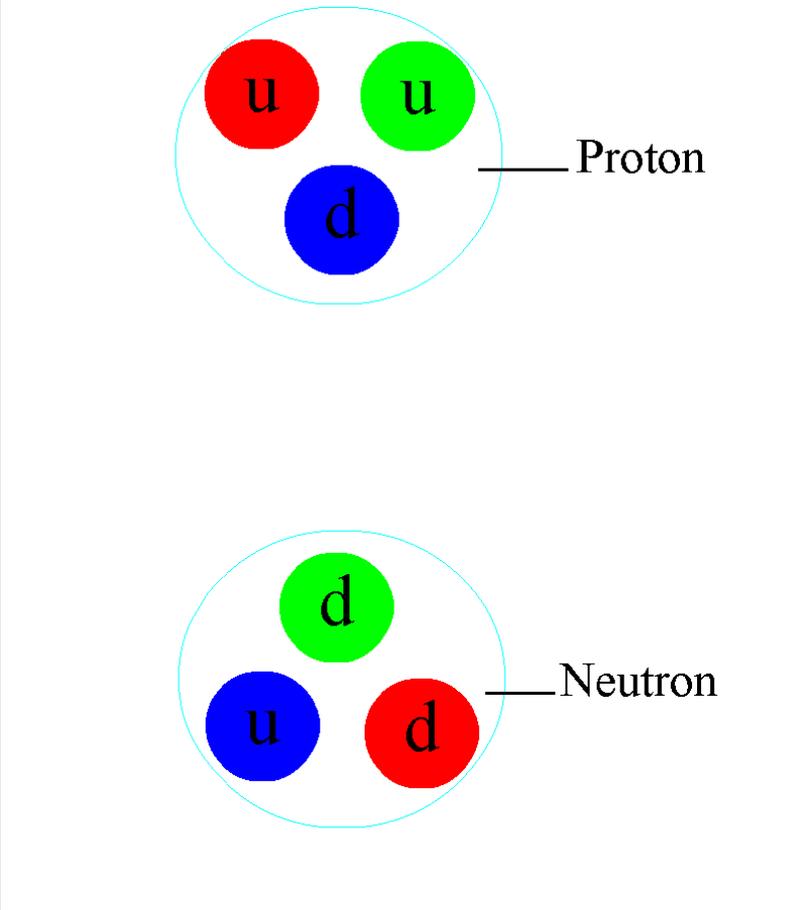
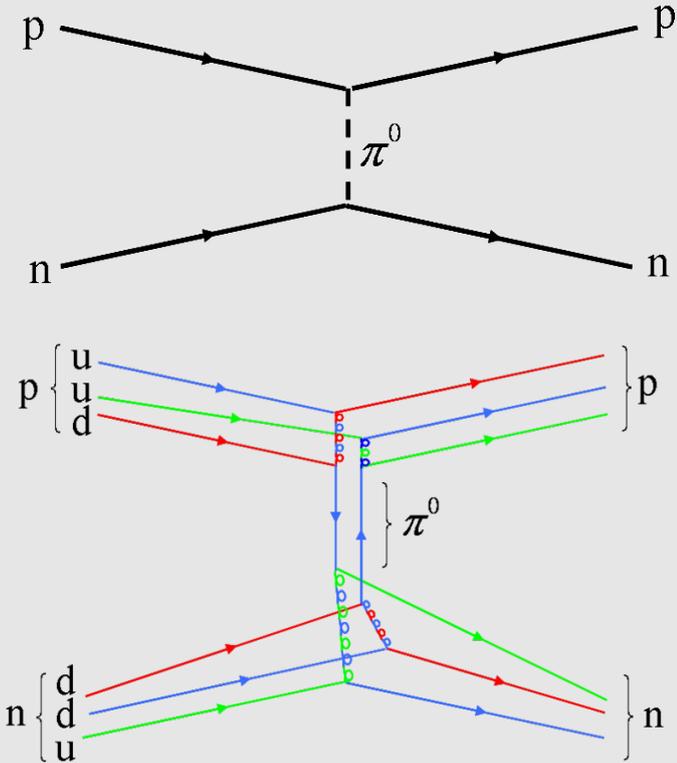
↘ on n'observe pas les quarks isolément



Hadronisation

L'INTERACTION NUCLEAIRE FORTE ?

Une résultante de l'interaction forte entre les quarks



Les découvertes continuent

1962 : découverte d'une nouvelle espèce de neutrino (ν_μ)

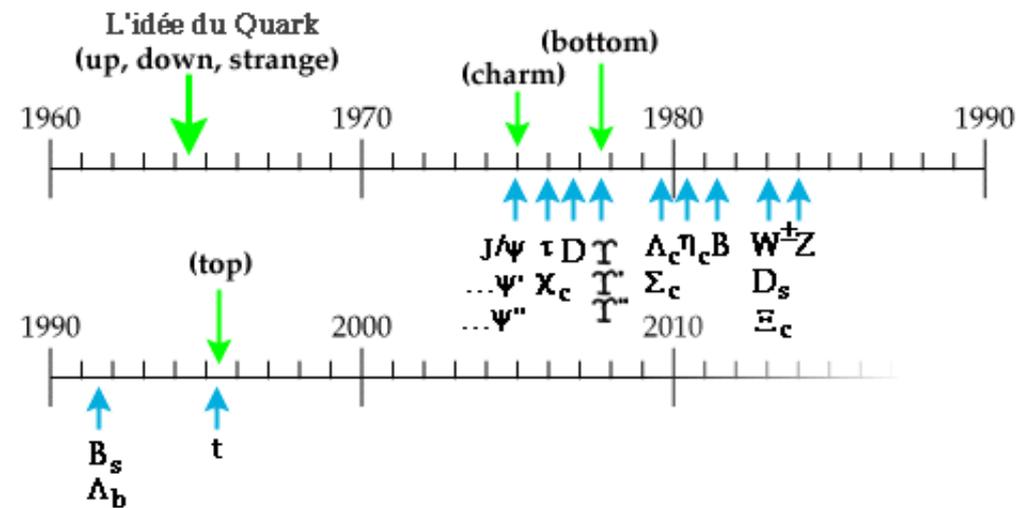
1970 : prédiction du quark charmé (c)
découvert en 1974

1973 : prédiction de l'existence de 2 nouveaux quarks :

- **b** (beau ou bottom)
- découvert en 1976
- **t** (top)
- découvert en 1995

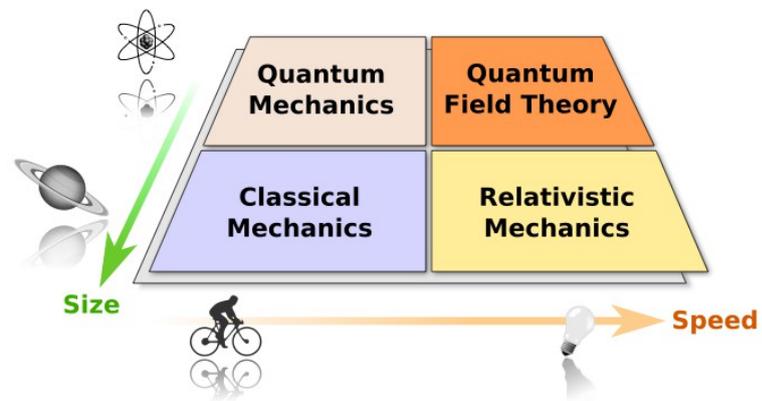
1977 : tau (τ)

2000 : neutrino tauique (ν_τ)



L'ère moderne

❖ Le Modèle Standard



Les particules de matière

| | | | | | | | |
|---------|------|----------|---------|---------------|-----------|-----------------|------------|
| Quarks | +2/3 | up | u | charm | c | top | t |
| | -1/3 | down | d | strange | s | bottom (beauty) | b |
| Leptons | -1 | electron | e | muon | μ | tau | τ |
| | 0 | neutrino | ν_e | neutrino muon | ν_μ | neutrino tau | ν_τ |

Une remarquable organisation

- 3 générations avec la même structure
 - 2 quarks ($q=2/3$, $q=-1/3$)
 - 2 leptons ($q=-1$, $q=0$)
- la première génération comporte les particules de la matière ordinaire
- les membres de la deuxième et troisième familles sont plus lourds et instables

| leptons | masse (GeV/c ²) | quarks | masse (GeV/c ²) |
|------------|-----------------------------|--------|-----------------------------|
| e | 0.0005 | u | 0.002 |
| ν_μ | ~0 | d | 0.005 |
| μ | 0.1 | c | 1.3 |
| ν_μ | ~0 | s | 0.1 |
| τ | 1.8 | t | 171 |
| ν_τ | ~0 | b | 4.2 |

L'interaction faible

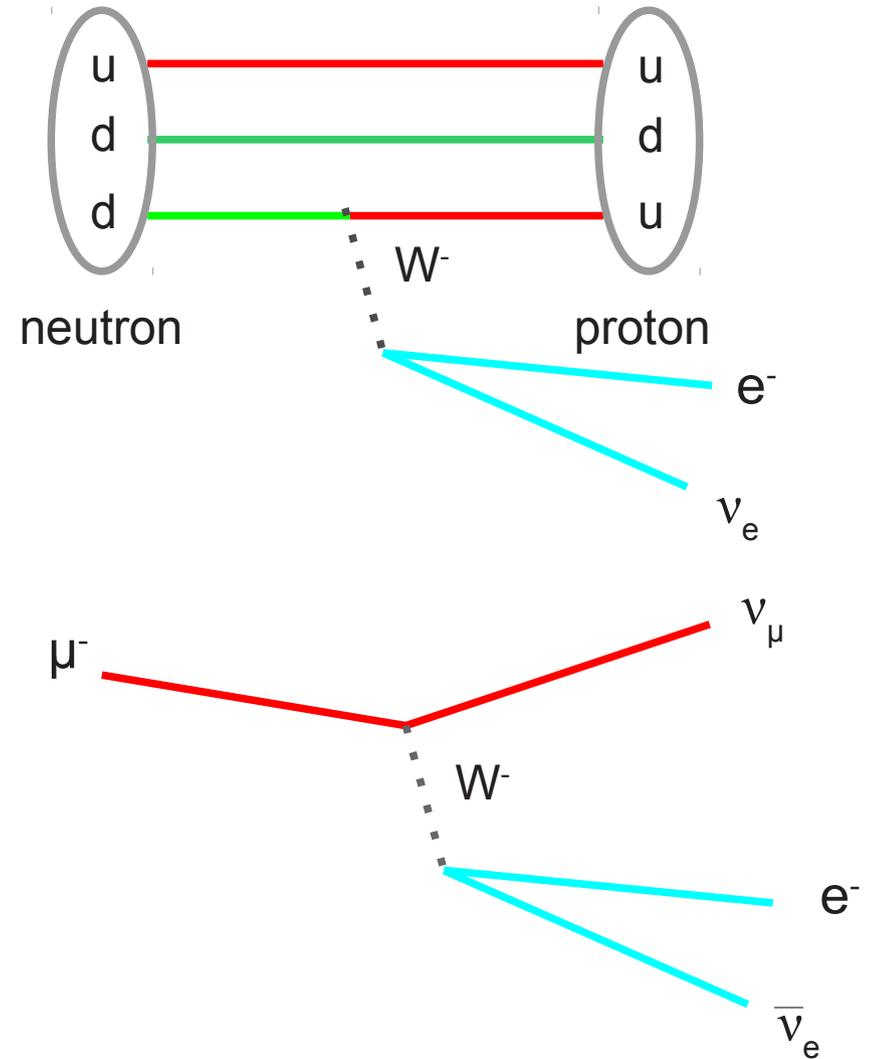


Caractéristiques

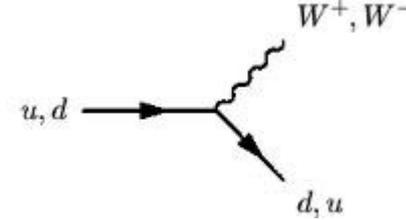
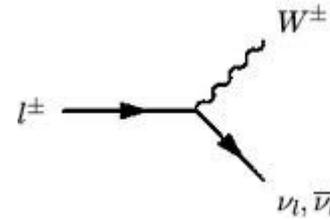
- interagit entre toutes les particules
- vecteur : W^+ , W^- , Z^0
- $m(W) = 80 \text{ GeV}/c^2$
- $m(Z) = 91 \text{ GeV}/c^2$
- lourds donc courte portée
- ne conserve pas les saveurs
- c'est la seule interaction autorisant les transitions entre un type de quark et un autre

↘ force responsable de l'instabilité des particules de la 2^{ème} et 3^{ème} familles

- désintégration de particule lourde
- multiples états finaux possibles
- résultat probabiliste



L'interaction faible



Caractéristiques

- in
- ve
- m
- m
- lo
- ne
- c'
- le
- qu

force particulaire

- désintégration de particule lourde
- multiples états finaux possibles
- résultat probabiliste

L'INTERACTION ELECTROFAIBLE

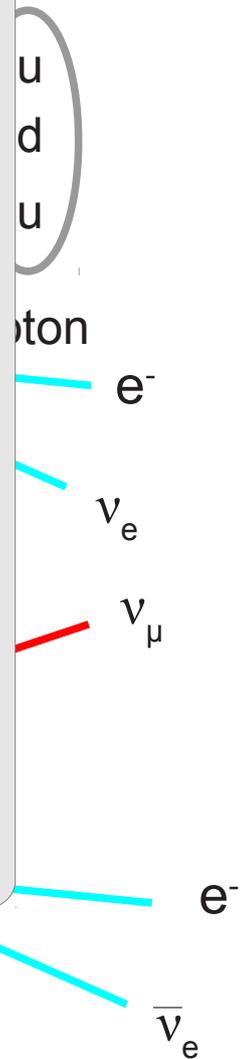
1960' : unification des interactions faible et électromagnétique
 Sheldon Glashow, Abdus Salam et Steven Weinberg, Prix Nobel 1979

⇒ interaction électrofaible
 - comporte 4 bosons : W^+ , W^- , Z^0 , γ

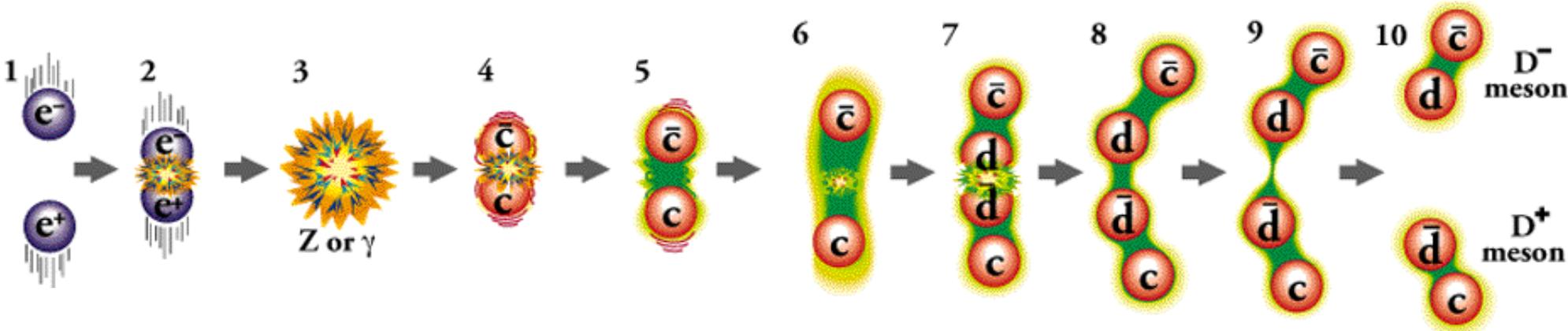
W et Z découverts au CERN en 1983
 Carlo Rubbia et Simon van der Meer, Prix Nobel 1984

Les bosons vecteurs sont naturellement sans masse dans la théorie.
 Or les bosons qu'on observe sont (très) massifs.
 Le mécanisme de Higgs permet de donner une masse au W et Z ainsi qu'à toutes les autres particules.

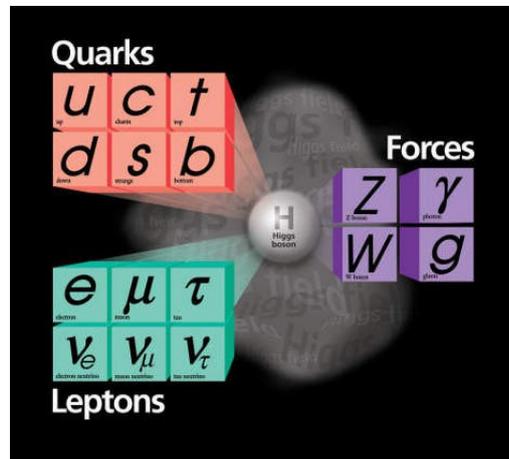
boson de Higgs, découvert au CERN en 2012 ?



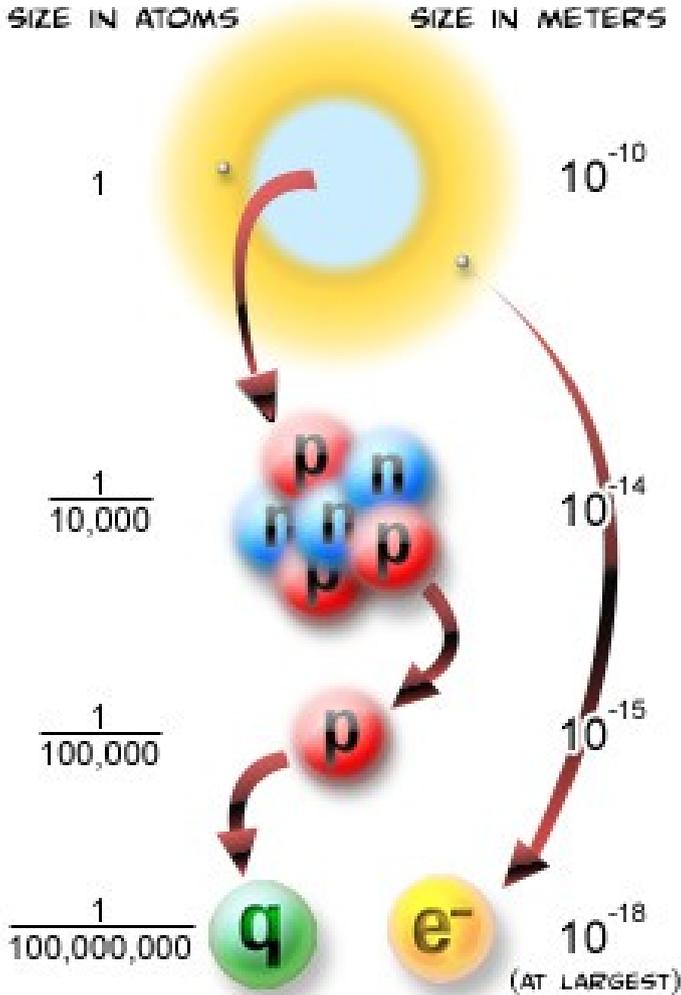
Un exemple complet



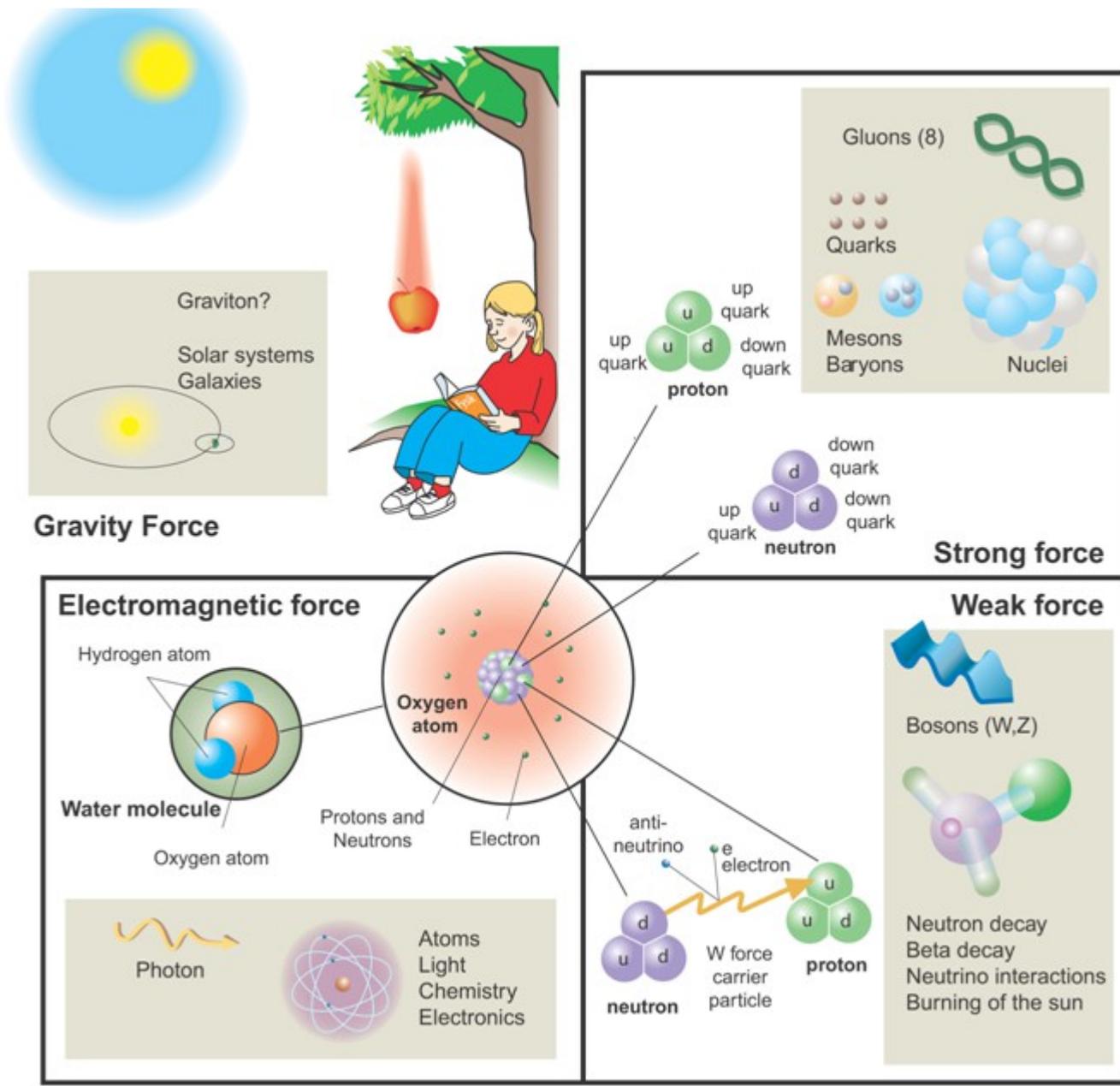
Pour finir



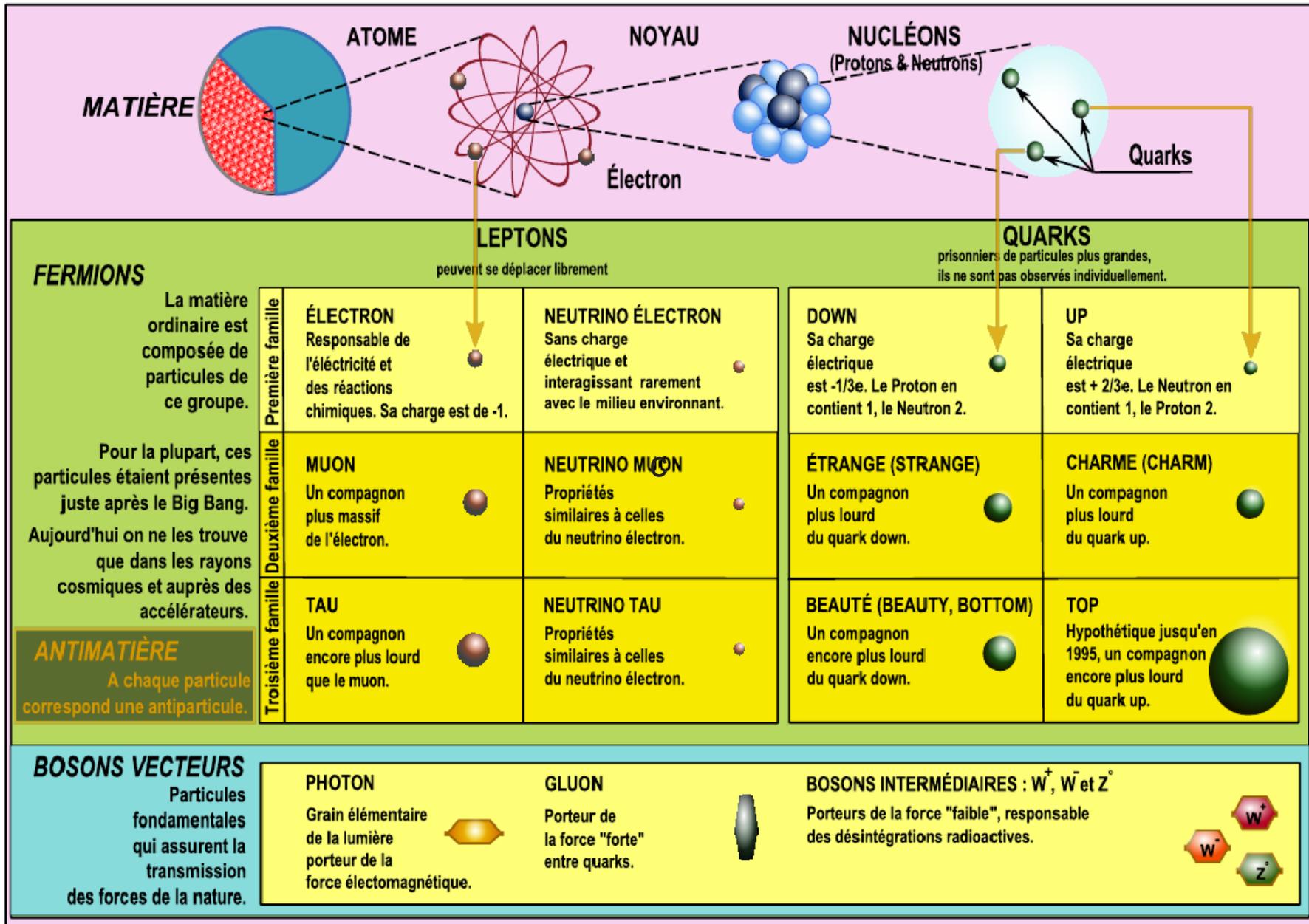
De l'atome aux quarks



Les interactions fondamentales



Le Modèle standard



Conclusion

Le Modèle Standard décrit très précisément tous les phénomènes observés en laboratoire de l'eV au TeV

Pour autant, il reste insatisfaisant :

- pourquoi **3 familles** de particules ?
- pourquoi ont-elles des masses si différentes : e.g. $m(t) \sim 10^5 m(u)$!
- le MS décrit la force électromagnétique et la force faible comme une seule et même force (la force électrofaible).
- pourquoi la force forte est-elle si différente ?
- GUT (Grand Unified Theory) ? SUSY ?
- quid de la gravitation ?
- il n'explique pas la disparition de l'anti-matière

De plus, l'astronomie & la cosmologie montre que :

- le modèle standard ne peut expliquer que 4% du contenu de l'univers
- > 80 % de la matière est de nature inconnue (matière noire)
- ~75 % de la densité d'énergie est de nature inconnue (énergie noire)
- **96 %** du contenu de l'univers reste mystérieux !

Perspectives

Au delà du Modèle standard

→ Comment y accéder ?

Les clefs :

- $E=mc^2$!! Pour produire des particules très massives (bosons de Higgs, particules supersymétriques), il faut mettre en jeu suffisamment d'énergie dans les collisions
- Pour voir des effets fins et rares, il faut produire un très grand nombre de collisions

→ réponse : le LHC ?