

La Physique des Particules en quelques mots

Riccardo Rattazzi

(Laboratoire de Physique Théorique des Particules, EPFL)

Phénomènes

Lois

Applications



Phénomènes électromagnétiques

propagation de la lumière,
(diffusion, diffraction et réflexion)
radio-astronomie, laser,
télécommunications,
physique des plasmas,...

Équations de Maxwell

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \rho$$

$$c^2 \vec{\nabla} \wedge \vec{B} - \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \vec{J}$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

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

La physique des particules a le but de formuler
les plus fondamentaux *lois et principes* de la Nature

fondamental



microscopique
les plus petites
distances imaginables
(*Réductionnisme*)

pour faire cela les phénomènes considérés
doivent être les plus simples possibles

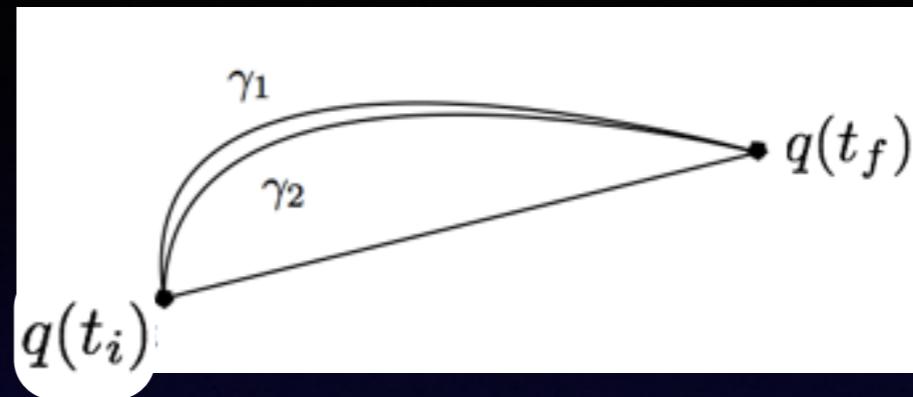
les autres sciences naturelles sont plus orientées vers les phénomènes (plusieurs fois fascinants) qui apparaissent dans le domaine macroscopique, et pour lesquels on croit connaître très bien les lois... même si parfois il est difficile, voir impossible, faire de calculs

- matière condensé (superfluidité, supraconductivité, ...)
- chimie
- dynamique des fluides (turbulence, météorologie)
- géologie
- biologie
-

Mécanique

$i = 1, \dots, N$ $q_i(t) =$ coordonnées décrivant le système

$\gamma : t \rightarrow q_i(t)$



Dynamique



Principe de l'action stationnaire

$$S[\gamma] = \int_{t_i}^{t_f} \mathcal{L}(q, \dot{q}) dt$$

trajectoire

γ_{cl}



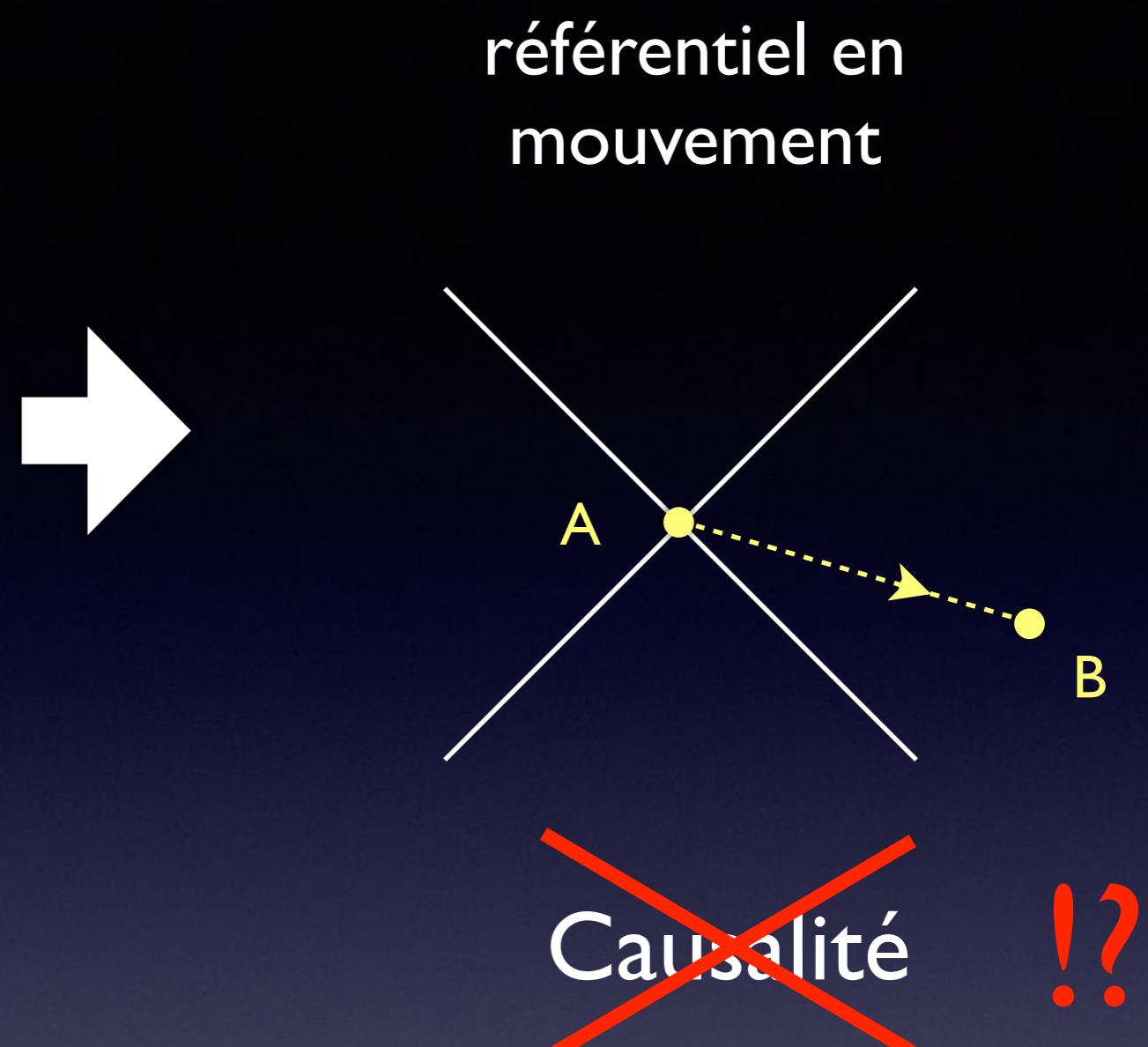
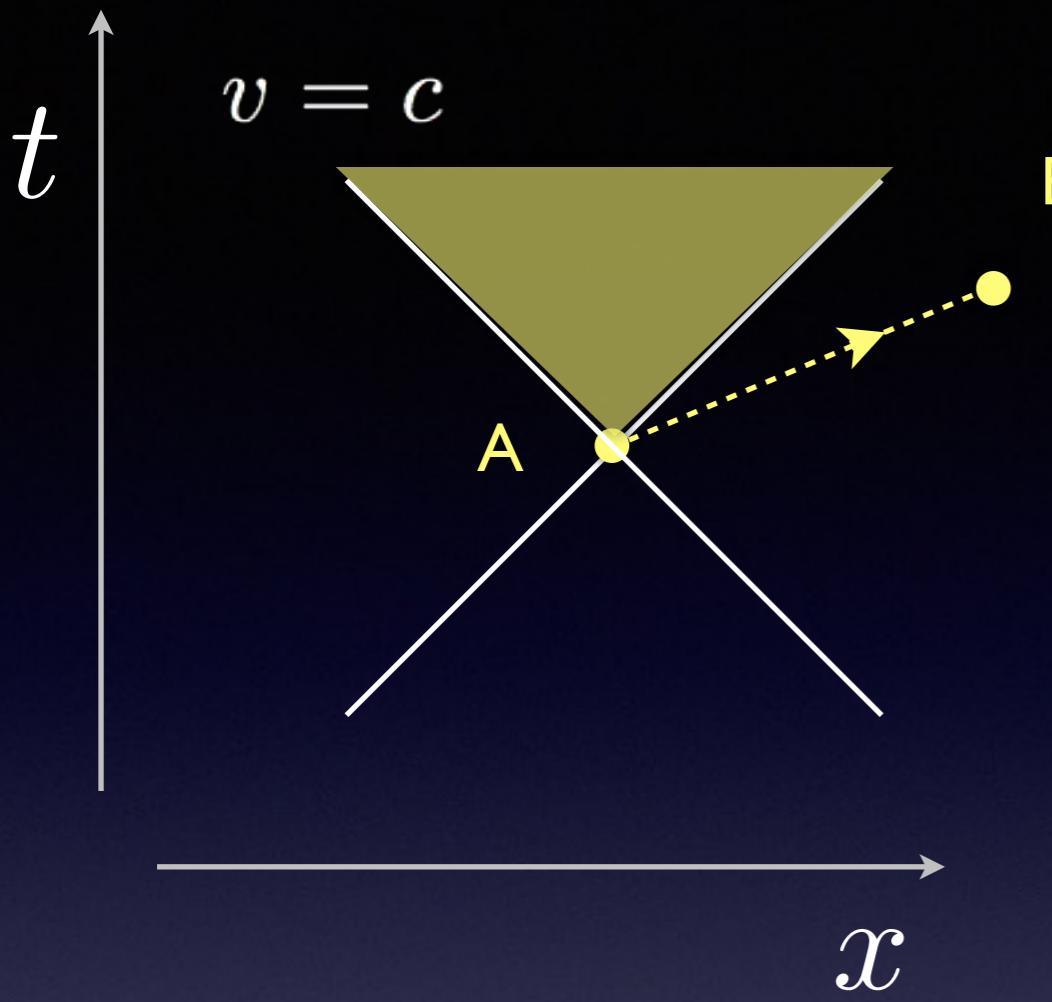
$$\delta S \Big|_{\gamma=\gamma_{cl}} = 0$$

$$\delta S = 0 \iff \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = 0 \quad \text{eqs. du mouvement}$$

$$S = \int \mathcal{L}(q, \dot{q}) dt$$

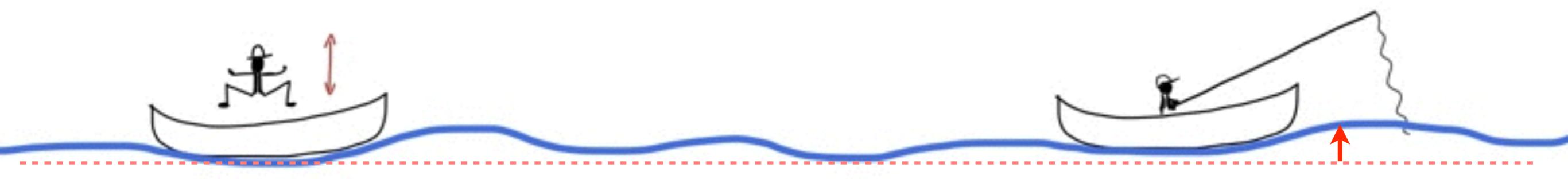
on dit que la dynamique est *locale* dans le temps

Relativité



A peut influencer B seul avec un signal avec vitesse $v < c$

Pour cela il faut un milieu : un champ



$$\Delta h(x, y, t)$$

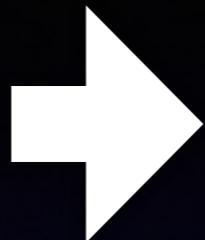
Mechanique des Champs

$$S = \int d^3x dt \mathcal{L}(\phi, \nabla\phi, \partial_t\phi)$$

Exemple: champ EM $S = \int d^3x dt \frac{1}{2} [\vec{E}^2 - \vec{B}^2 + \dots]$

Mécanique Quantique

~~Déterminisme Classique~~



Déterminisme Quantique

on peut seulement parler de probabilité

$$\mathcal{A}(q_{in} \rightarrow q_{fin}) = \int D\gamma e^{i \frac{S[\gamma]}{\hbar}}$$

$$\gamma : \begin{aligned} q(t_{in}) &= q_{in} \\ q(t_{fin}) &= q_{fin} \end{aligned}$$

$$P(q_{in} \rightarrow q_{fin}) = |\mathcal{A}(q_{in} \rightarrow q_{fin})|^2$$

$[S] = \text{energie} \times \text{temps} \equiv \text{action}$

$$\hbar \simeq 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{sec}$$

• régime quantique $S \sim \hbar$

• limite classique $S \gg \hbar$

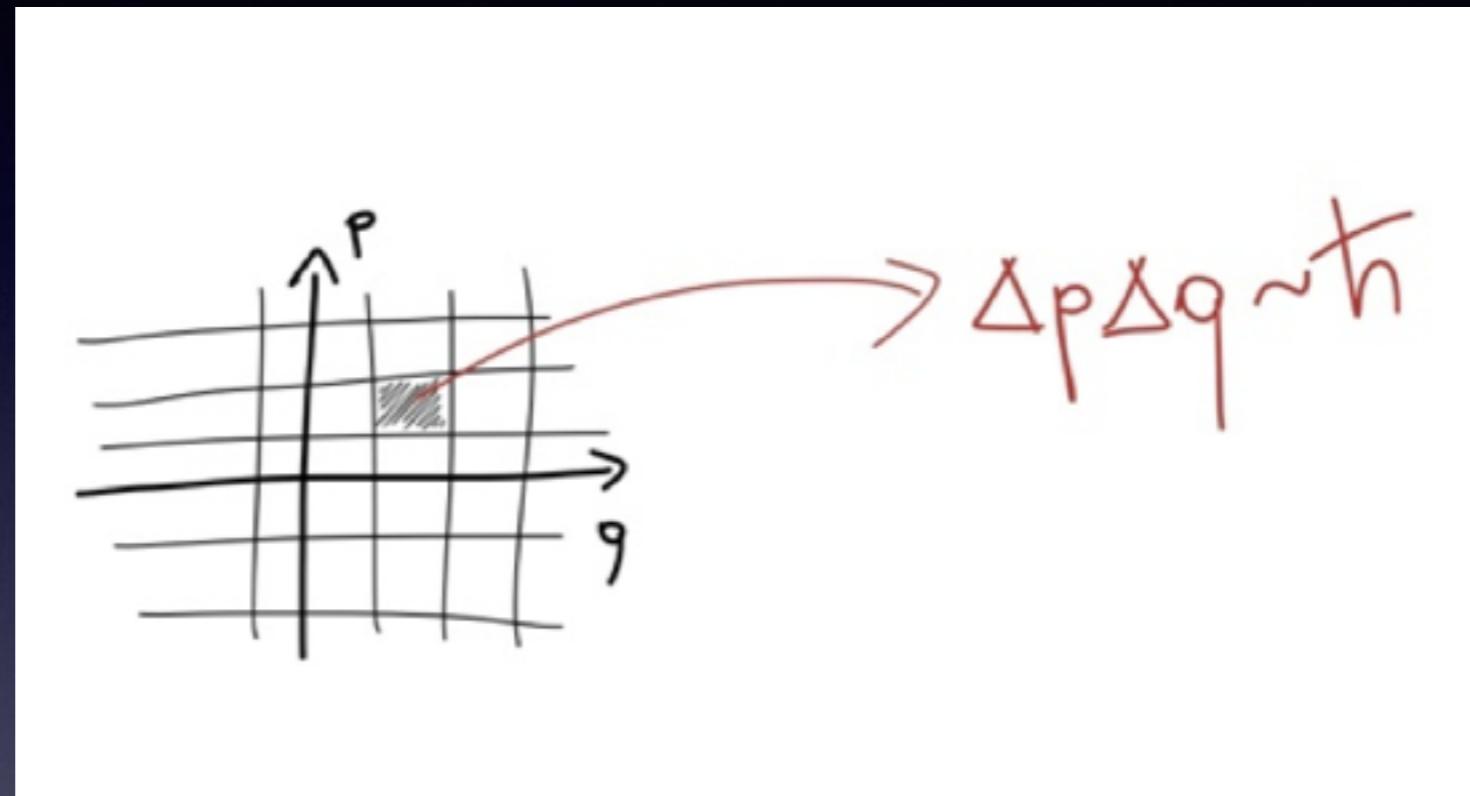
$$\mathcal{A} = \int D\gamma e^{i \frac{S[\gamma]}{\hbar}}$$

dominé par le trajectoires
ou S est stationnaire

$$\delta S = 0$$

Principe d'Incertitude

$$\Delta p \Delta q \geq \hbar$$



- Nature discrète de l'espace des configurations
- Onde d'intensité minimale = **particule**

Relativité

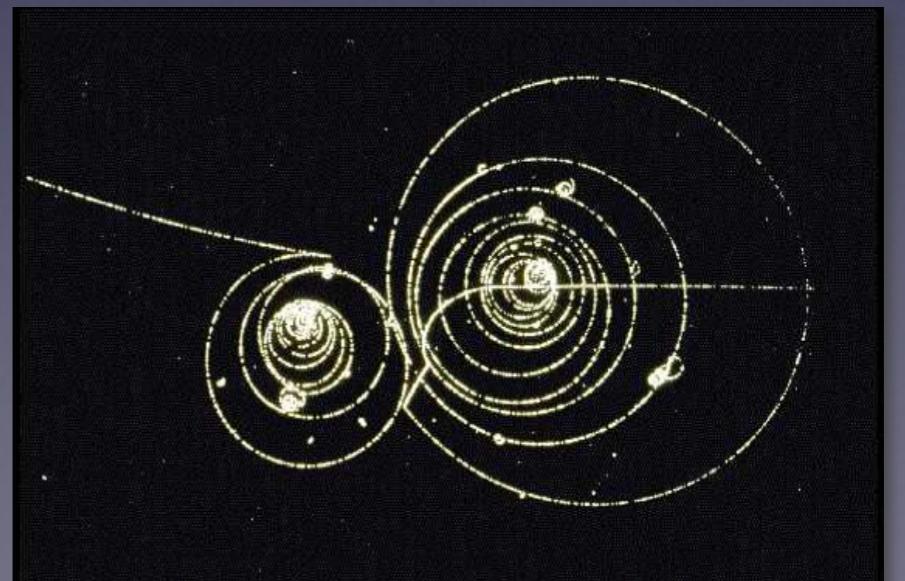
l'interaction instantané
est impossible



Mécanique Quantique

Nature discrète
du monde
microscopique

onde d'intensité minimale:
particule



Relativité

$$c \simeq 3 \times 10^{10} \text{ cm/sec}$$

$$\Delta x = c \Delta t$$

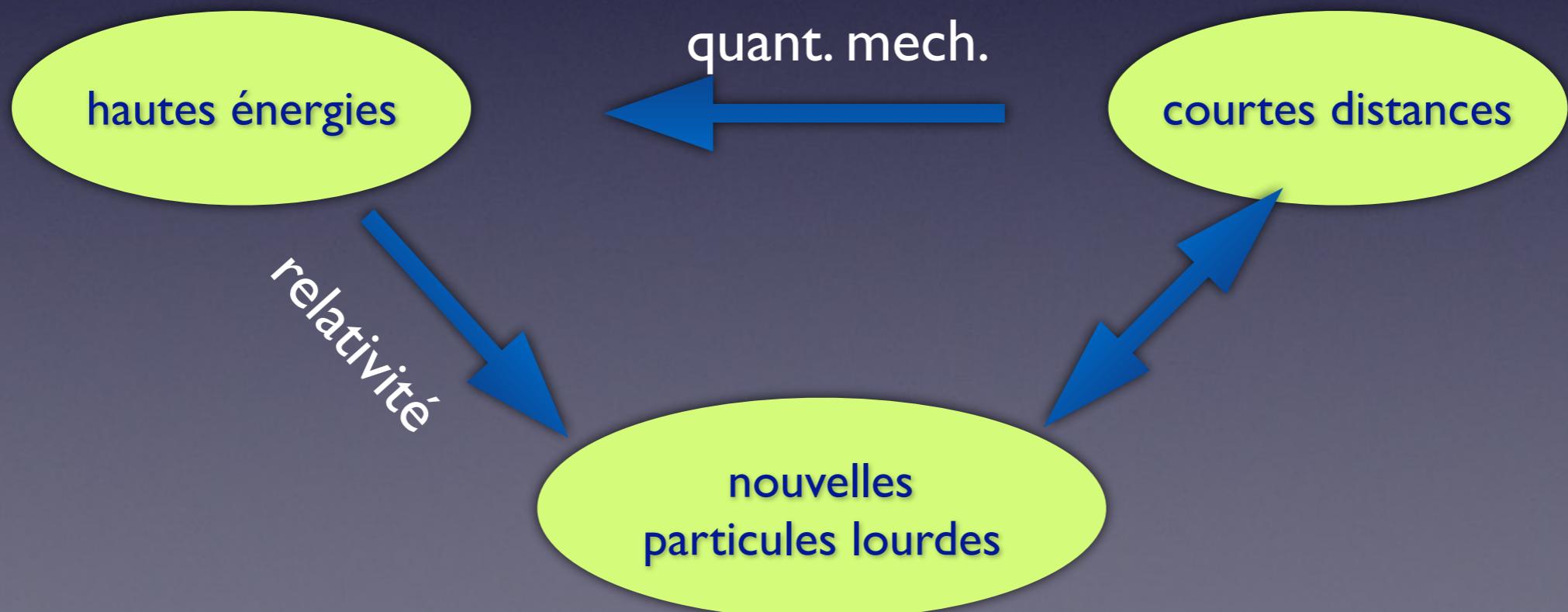
$$E = m c^2$$

Mécanique Quantique

$$\hbar \simeq 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{sec}$$

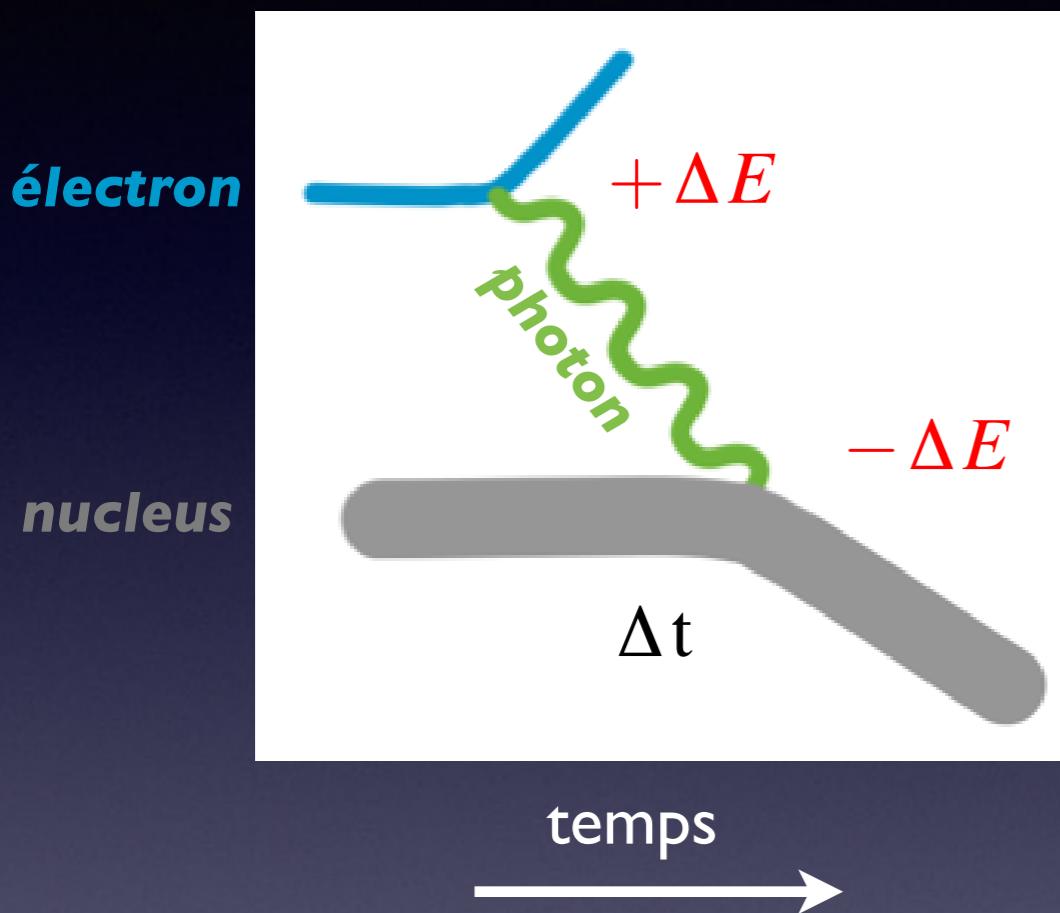
$$E = \hbar \omega = \frac{\hbar}{\text{time}}$$

$$\text{Énergie} = \text{Mass} = (\text{Longueur})^{-1}$$



Interaction = échange des particules

diagrammes de Feynman

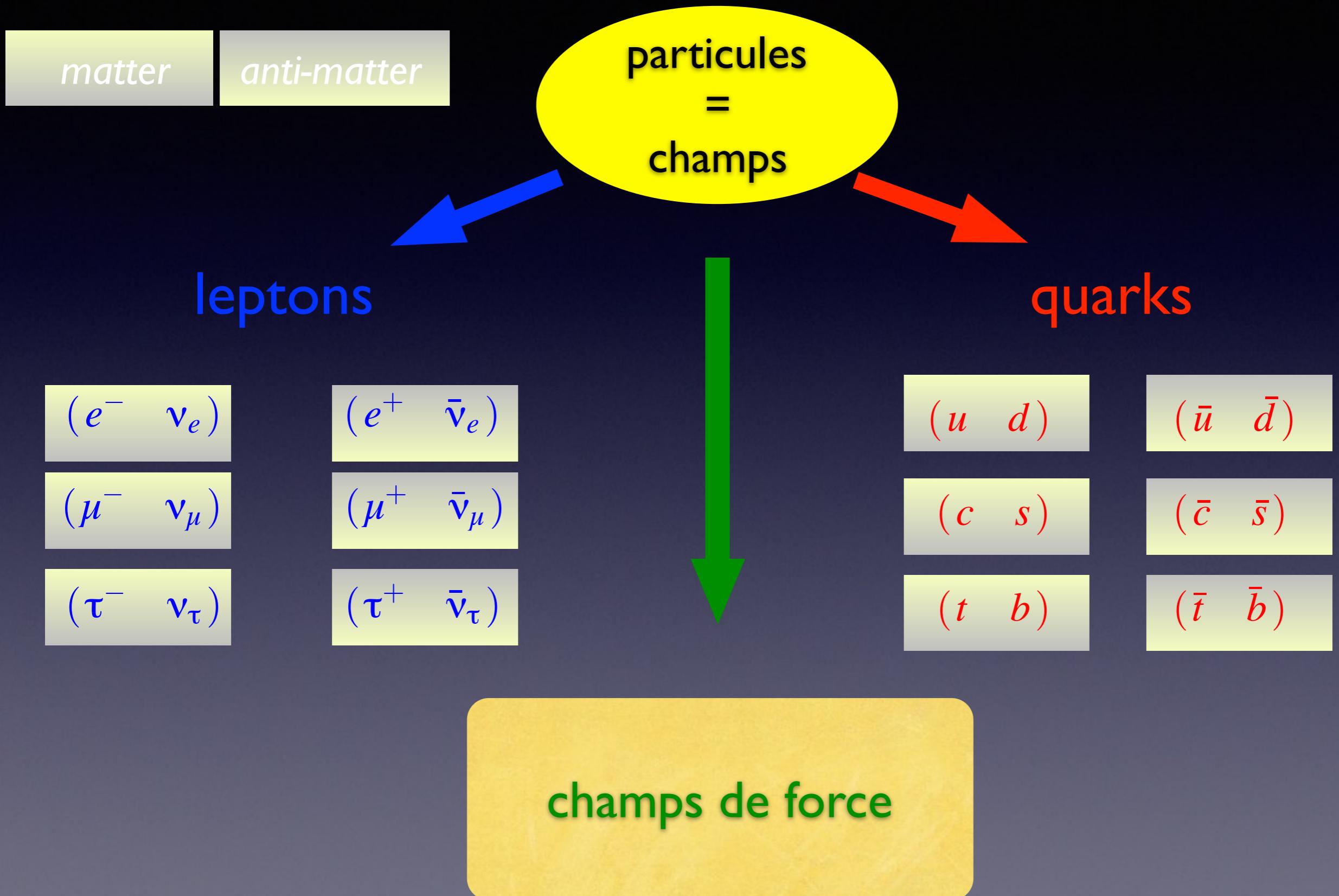


l'énergie n'est pas conservé
dans chaque interaction !

Mais aucune contradiction grâce au Principe d'Incertitude

$$\Delta E \Delta t \sim \hbar$$

Le Modèle Standard



Les champs de force

On peut distinguer 5 different forces fondamentales

Symmetry

Particle

Electromagnetic



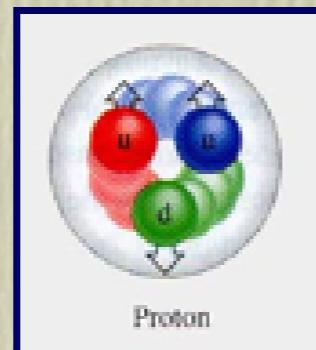
$SU(2) \times U(1)$

photon

W^\pm, Z^0

spin = 1

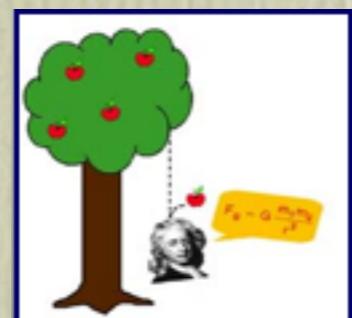
Weak



$SU(3)$
color

gluon

Strong



space-time
coordinate
covariance

graviton

spin = 2

Gravitational

La Force
de Higgs



Symétrie



aucune !

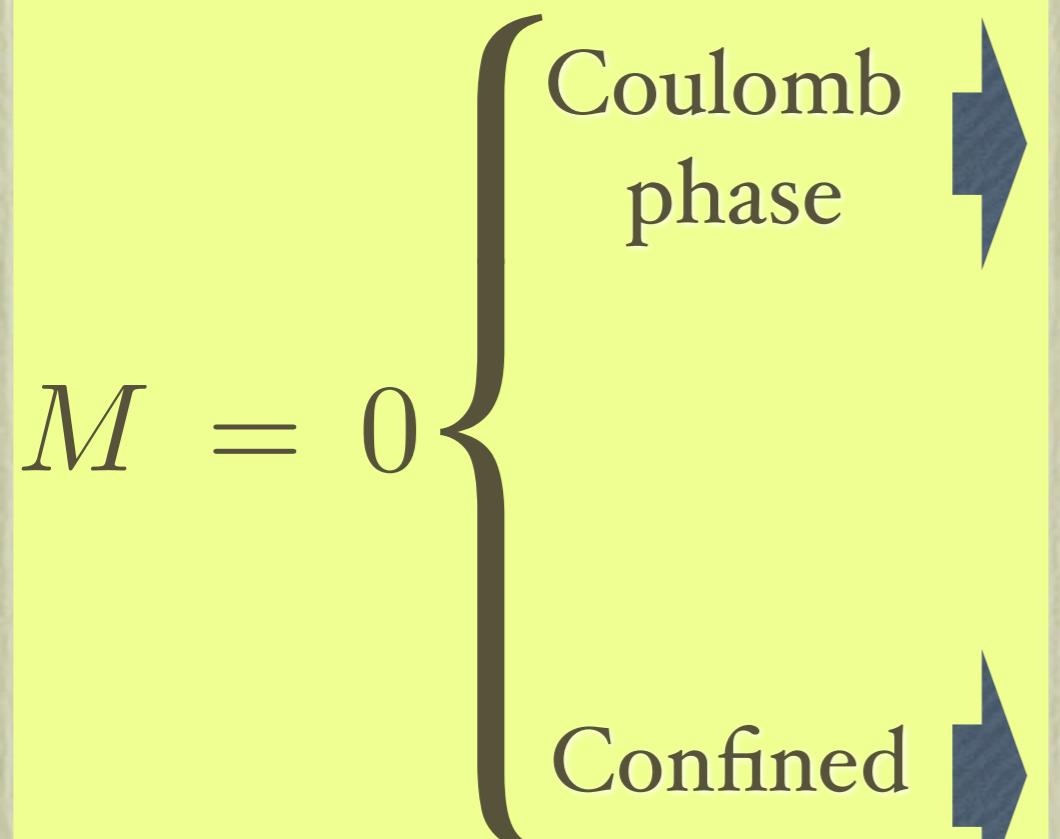
Particule



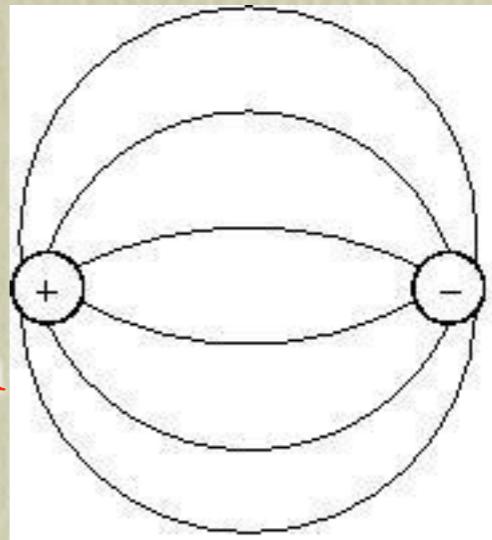
H
Boson de
Higgs

spin = 0

Phases of Fundamental Interactions



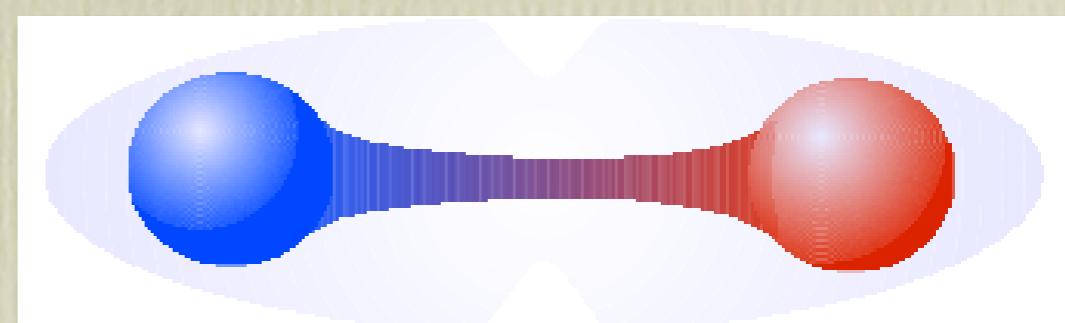
Gravity
Electromagnetism



$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

$M \neq 0$ Screened

Weak
&
Higgs



$$F \propto e^{-Mr} \left(\frac{1}{r^2} + \frac{M}{r} \right)$$

$$M_W = 80 \text{ GeV} \sim 90 m_{\text{proton}}$$

$$M_H = 125 \text{ GeV}$$

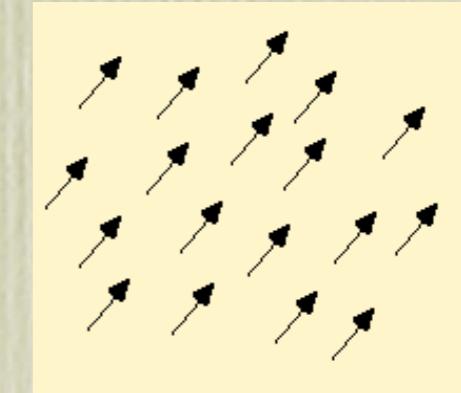
Le champ de Higgs = la realisation la plus simple du
mechanisme de generation de masse des particules

$$\vec{H} = \begin{pmatrix} H^+ \\ H^0 \end{pmatrix}$$

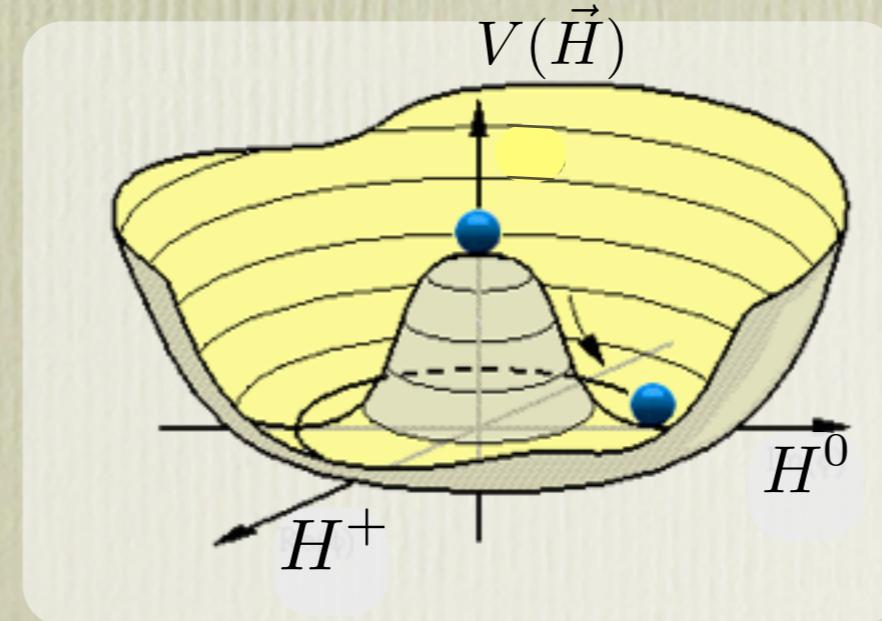
vecteur complex dans l'espace de la **charge**
(fibré sur \mathbf{R}^4)

le **vide est polarisé**

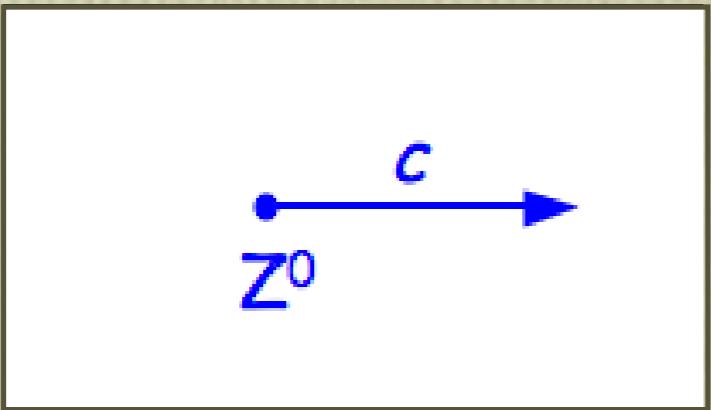
$$\langle \vec{H} \rangle \neq 0$$



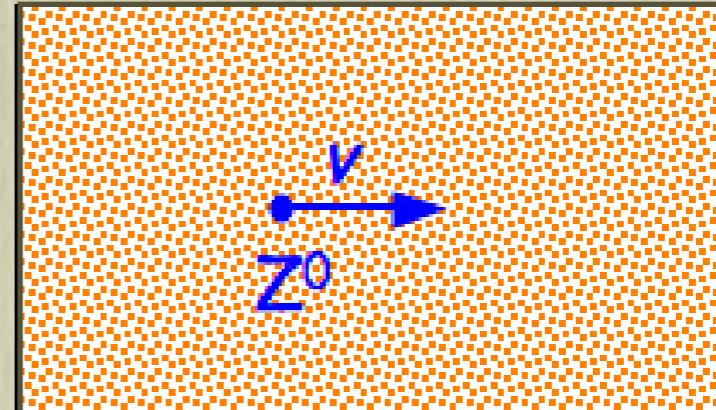
Brisure Spontanée de Symétrie



$$\langle \vec{H} \rangle = 0$$



$$\langle \vec{H} \rangle \neq 0$$

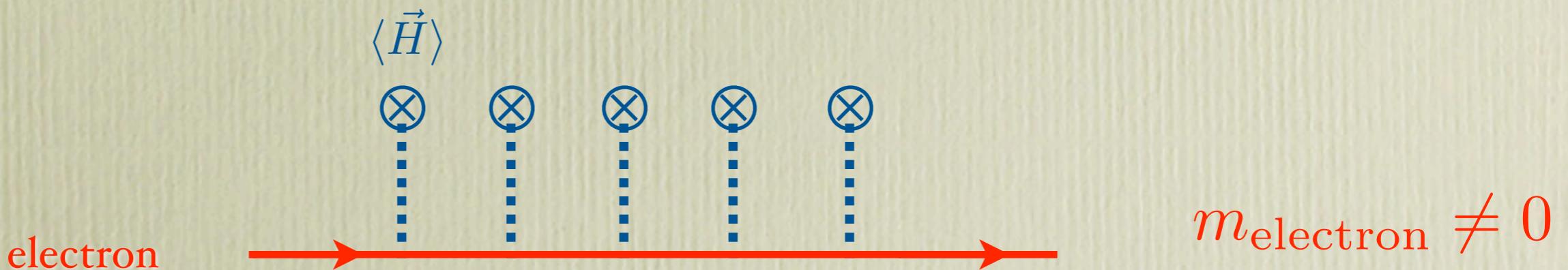


$$M_{Z^0} = 0$$

$$M_{Z^0} \neq 0$$

- analogie avec la propagation de la lumière dans un cristal
- quarks et leptons reçoivent une masse de la même façon

diagrammatique



Des grandes questions ...et des énormes

- La matière noire
- La baryogenèse
- L'Univers primordial: Big Bang et théorie de l'inflation
- La gravité face à la mécanique quantique
- Les problèmes de hiérarchie: masse du boson de Higgs et énergie du vide

Quantum Gravity

10^{19} GeV

$$M_{Planck} = G_{Newton}^{-1/2}$$

10^{-33} cm



10^2 GeV

m_{Higgs}

10^{-16} cm

Standard Model

Le problème de hiérarchie dans la masse du boson de Higgs

Le Principe Totalitaire de Gell-Mann: en MQ tout ce qui est possible est aussi obligatoire

$$10^4 \simeq m_H^2 = m_{class}^2 + m_{quant}^2 = m_{class}^2 + O(M_{Planck}^2) = m_{class}^2 + O(10^{38})$$



il faudrait une ‘tuning’ d’une précision de 34 ordres de grandeur entre les masses classiques et quantiques !

Pas du tout convaincante

Le ‘way out’ : le Modèle Standard est déjà incorrect à des énergies de l’ordre de la masse du boson de Higgs

Deux Possibilités

♣ Supersymétrie

♣ Compositeness

Pas d’évidence directe dans les données pour le moment

Un grand monde attend la nouvelle phase du LHC dans quelque mois, avec des collisions à une énergie jamais obtenue auparavant