

La Physique des Particules en quelques mots

Riccardo Rattazzi

(Laboratoire de Physique Théorique des Particules, EPFL)

Phénomènes

Lois

Applications



Phénomènes électromagnétiques

Equations de Maxwell

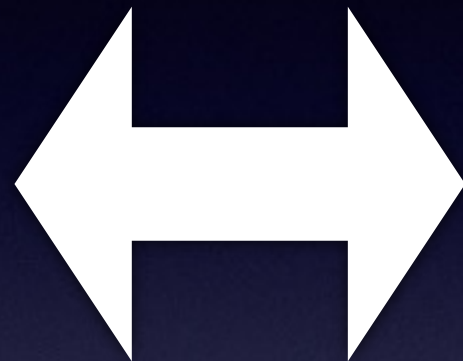
propagation de la lumière,
(diffusion, diffraction et réflexion)
radio-astronomie, laser,
télécommunications,
physique des plasmas,...

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= \rho \\ c^2 \vec{\nabla} \wedge \vec{B} - \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} &= \vec{J} \\ \vec{\nabla} \wedge \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} &= \mathbf{0} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= \mathbf{0}\end{aligned}$$

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

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

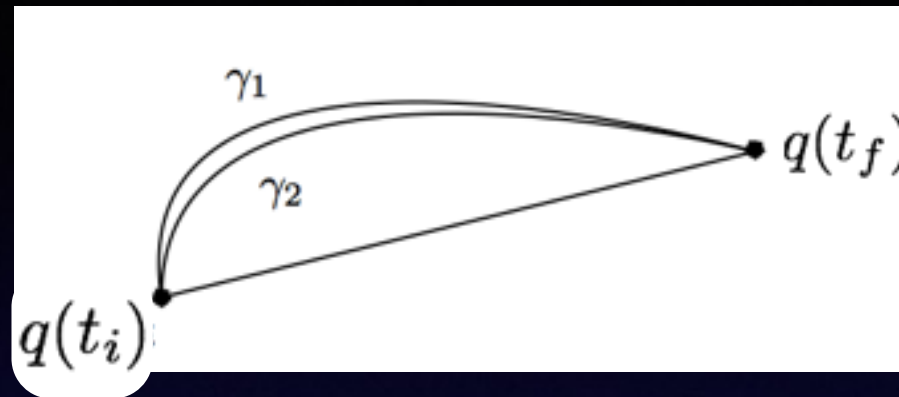
les autres sciences naturelles sont plus orientées
vers les phénomènes (plusieurs fois fascinants)
qui apparaissent dans le domaine macroscopique,
et pour lesquels on croit connaître très bien les lois...
même si parfois il est difficile, voir impossible, faire de
calculs

- 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 \longleftrightarrow Principe de l'action stationnaire

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

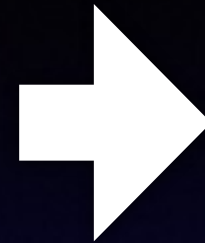
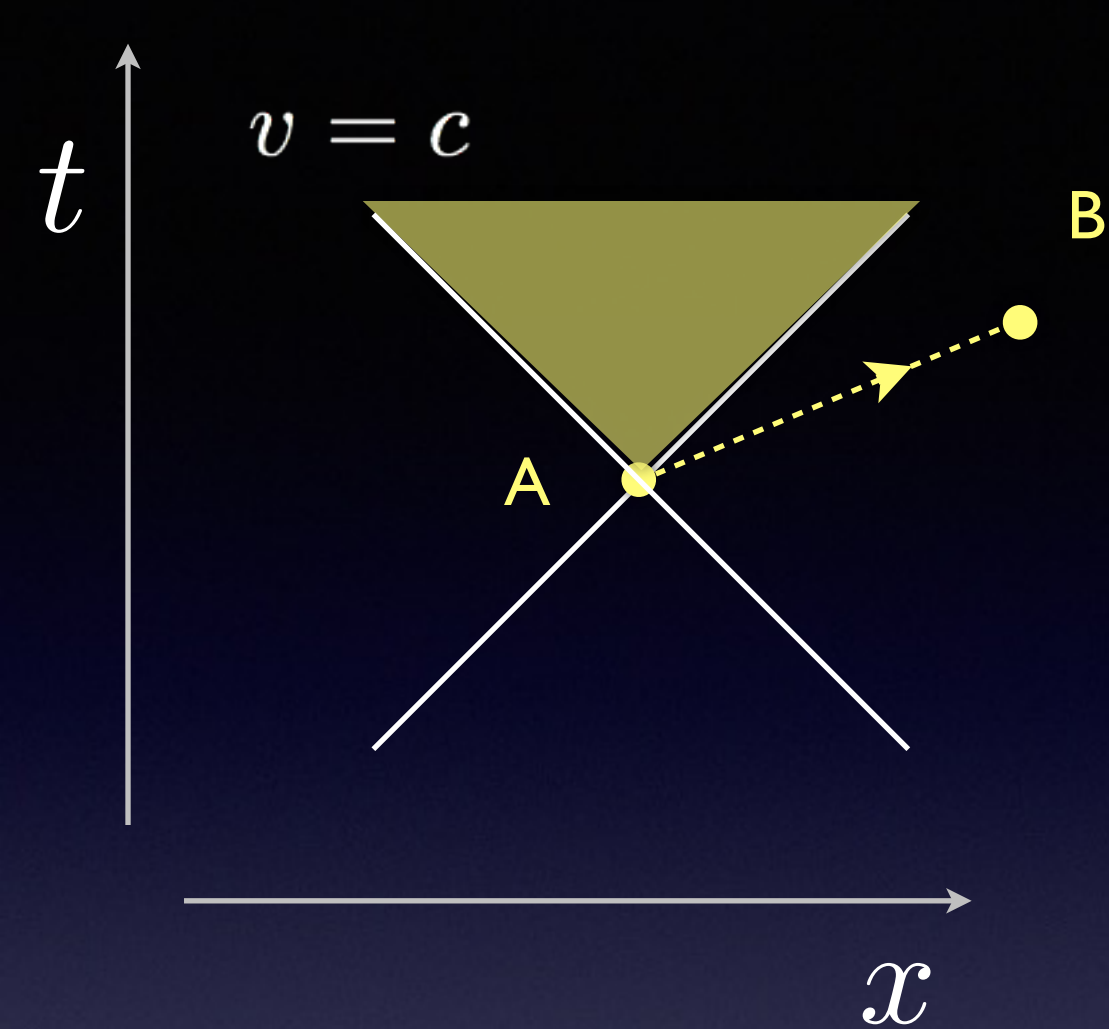
trajectoire γ_{cl} \longleftrightarrow $\delta S|_{\gamma=\gamma_{cl}} = 0$

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

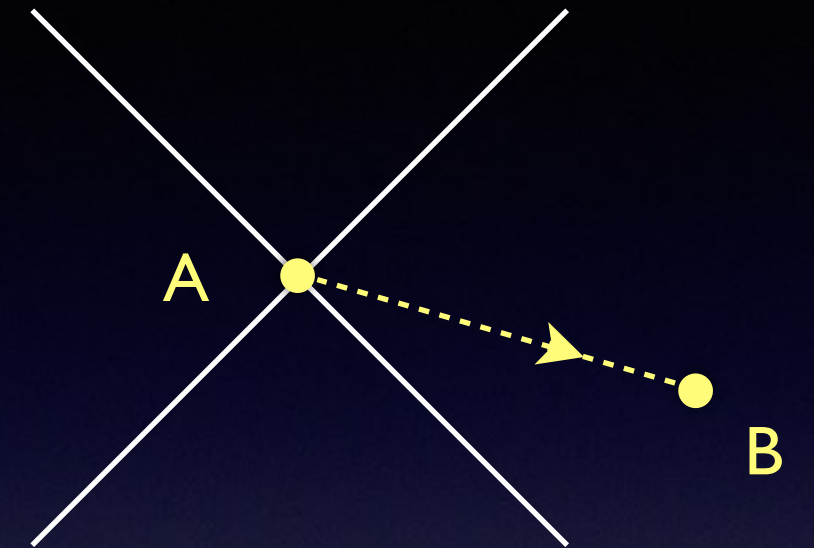
$$S = \int \mathcal{L}(q, \dot{q}) dt$$

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

Relativité



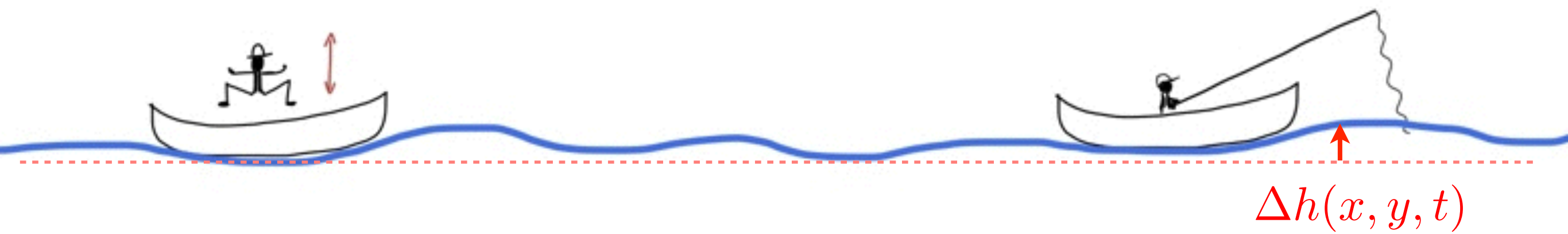
référentiel en
mouvement



~~Causalité~~ !?

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

Pour cela il faut un milieu : un champ



Mechanique des Champs

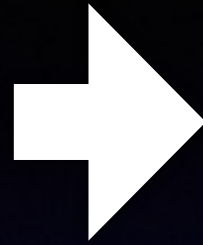
$$S = \int d^3x dt \mathcal{L}(\phi, \nabla \phi, \partial_t \phi)$$

Exemple: champ EM

$$S = \int d^3x dt \frac{1}{2} \left[\vec{E}^2 - \vec{B}^2 + \dots \right]$$

Mechanique 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 $S \gg \hbar$

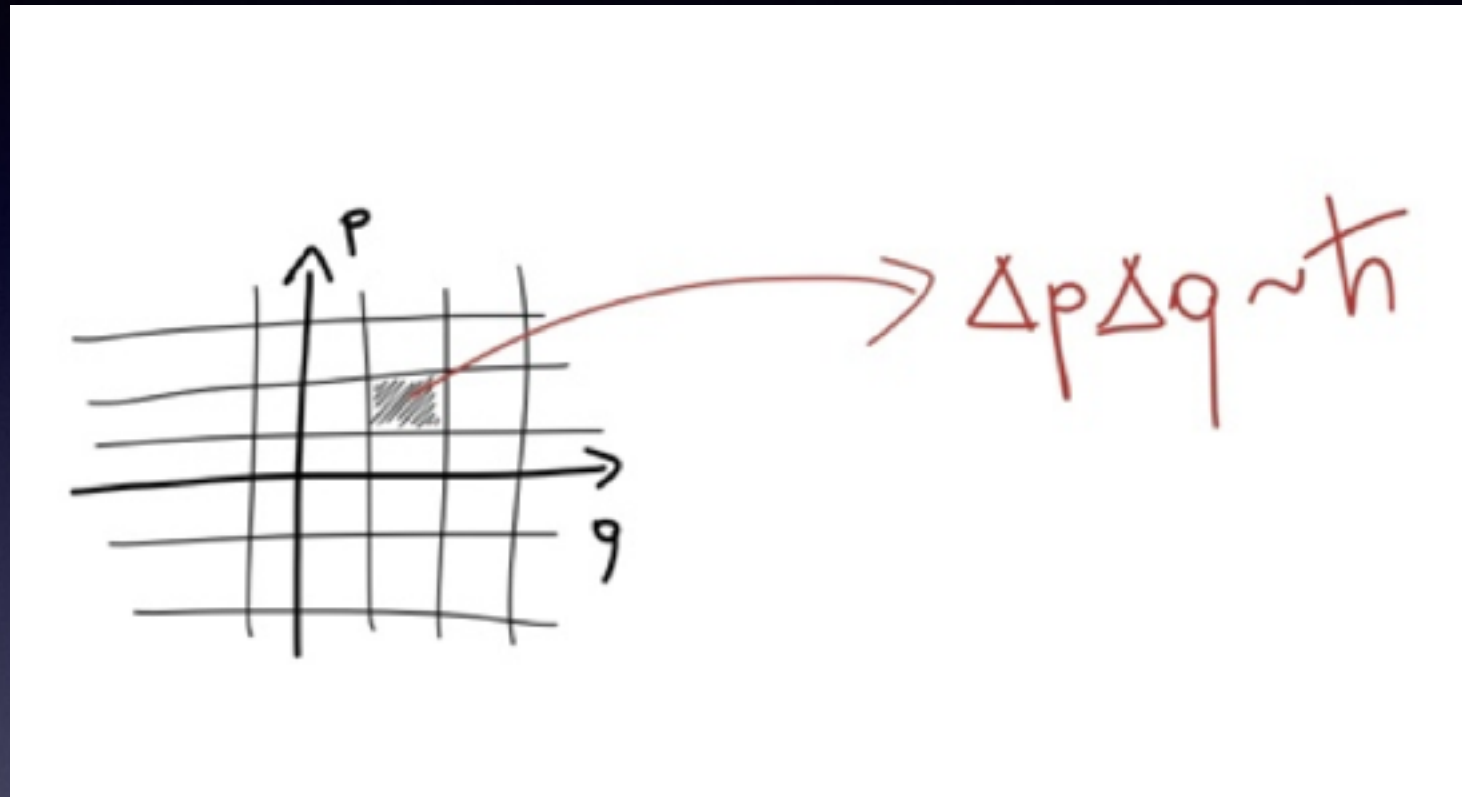
$$\mathcal{A} = \int D\gamma e^{i \frac{S[\gamma]}{\hbar}}$$

dominé par le trajectoires
ou S est stationnaire

$$\delta S = 0$$

Principe d'Incertainitude

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



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

Relativité

l'interaction instantané
est impossible

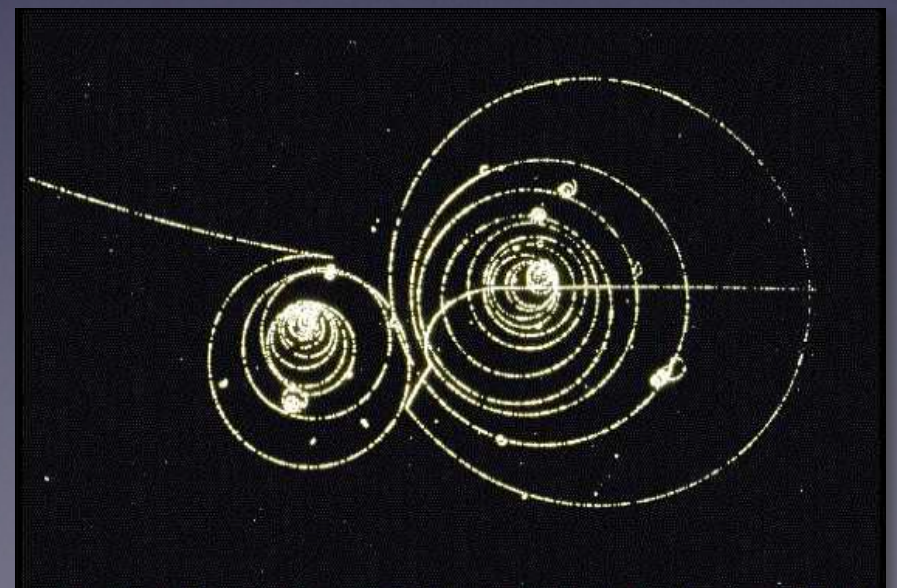
il faut des champs



Mécanique Quantique

Nature discrète
du monde
microscopique

onde d'intensité minimale:
particule



Relativité

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

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

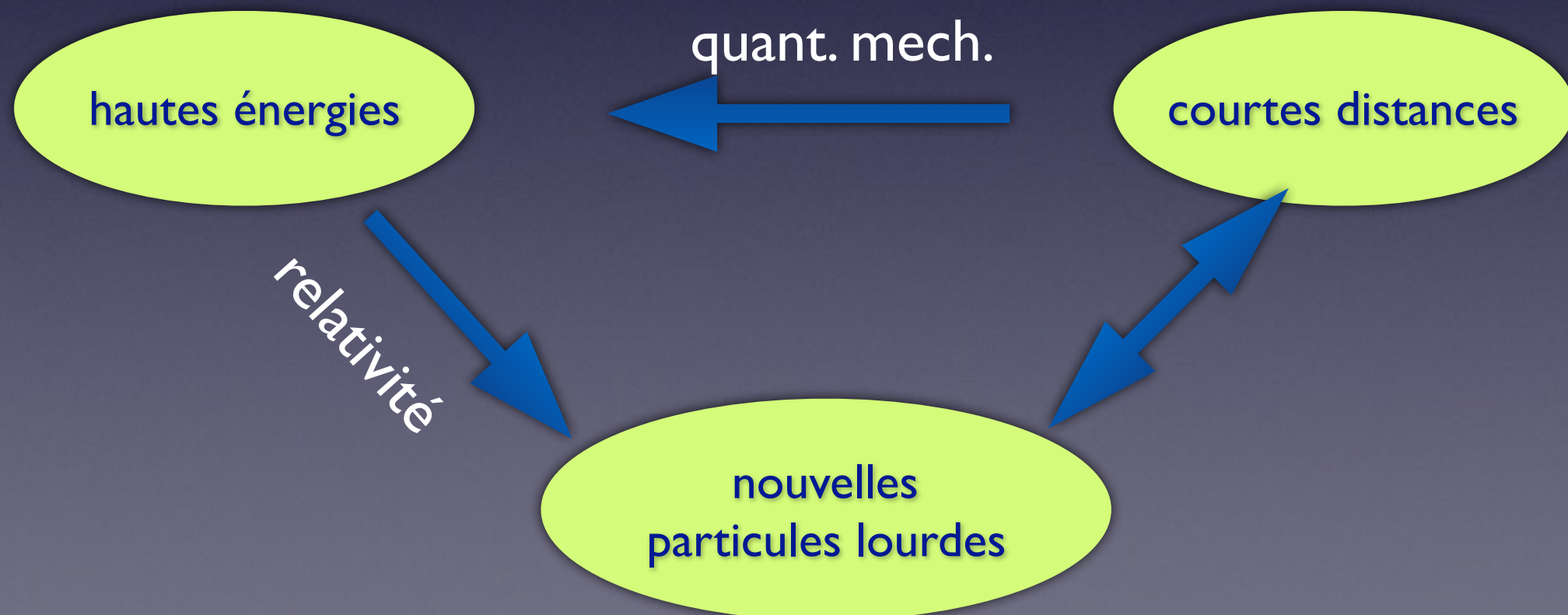
$$E = m c^2$$

Mécanique Quantique

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

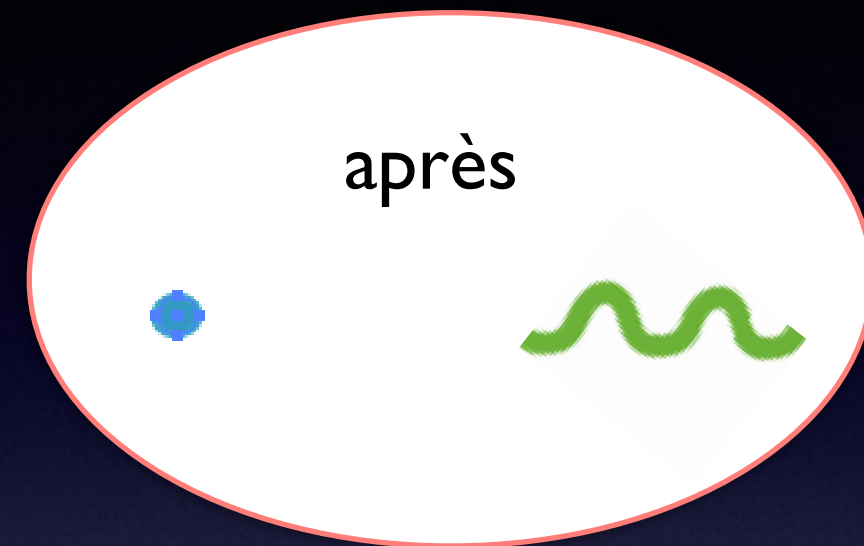
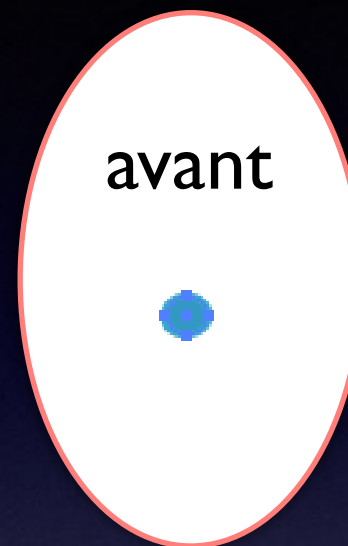
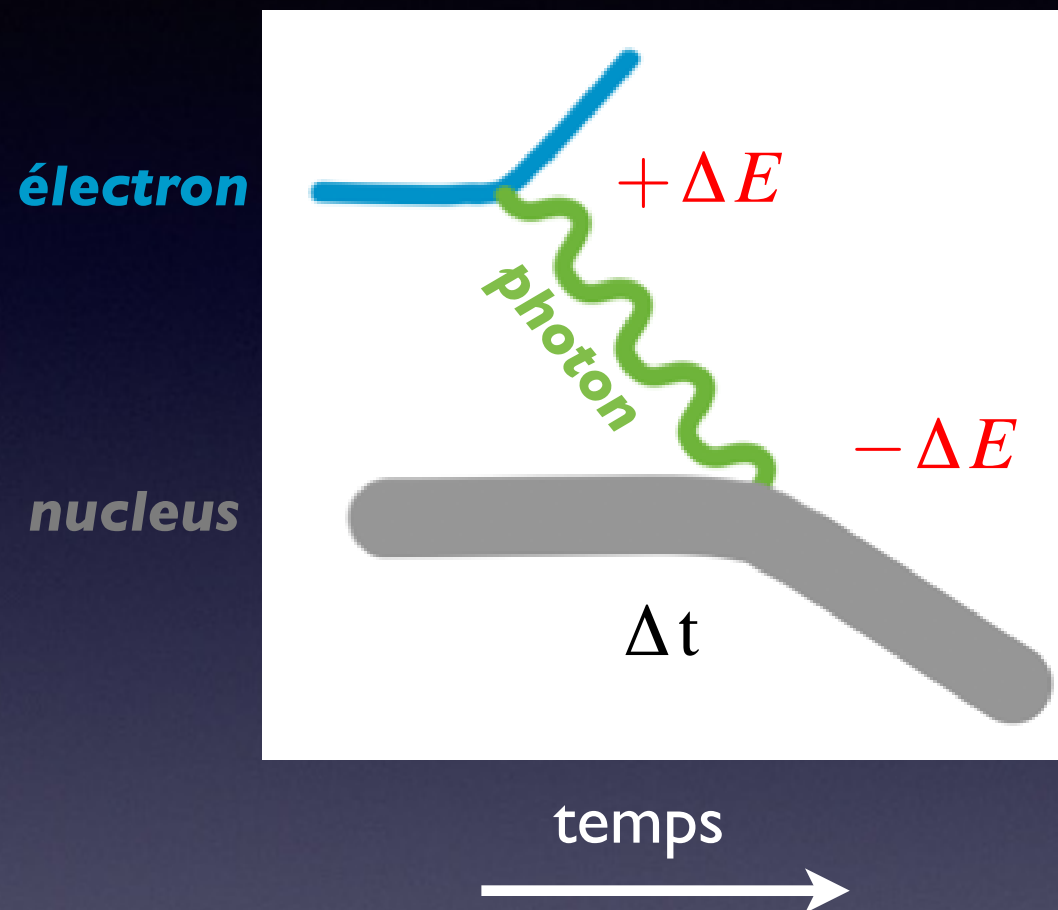
$$E = \hbar \omega = \frac{\hbar}{\text{time}}$$

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



Interaction = échange des particules

diagrammes de Feynman

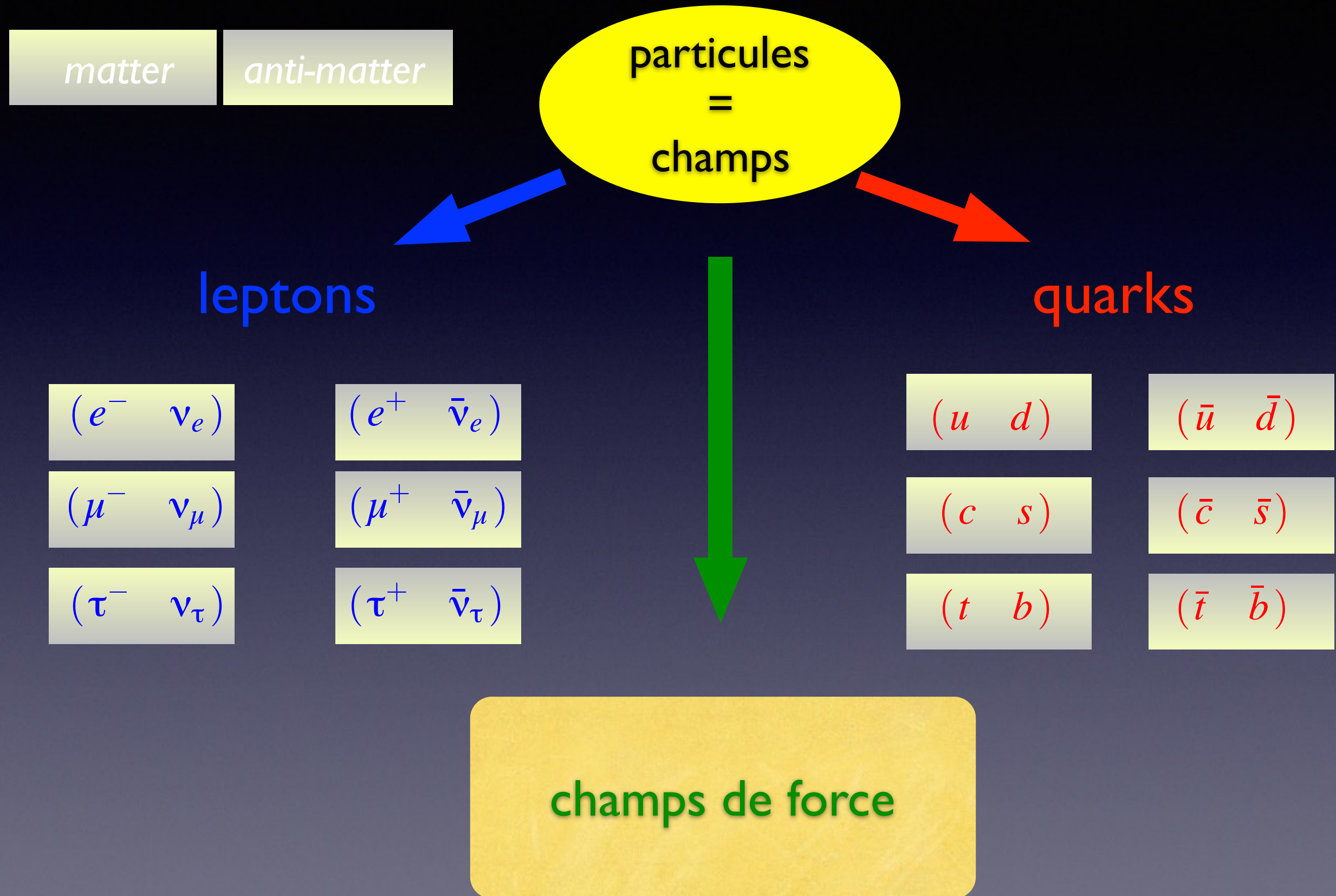


l'énergie n'est pas conservé
dans chaque interaction !

Mais aucune contradiction grâce au Principe d'Incertainitude

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

Le Modèle Standard



Les champs de force

On peut distinguer 5 different forces fondamentales

Symmetry

Particle

Electromagnetic



Weak



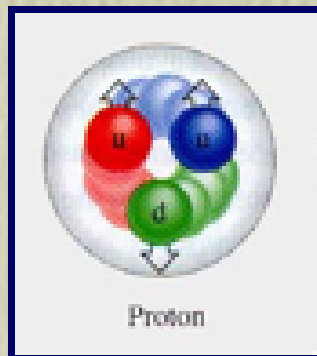
$SU(2) \times U(1)$

photon

W^{\pm}, Z^0

spin = 1

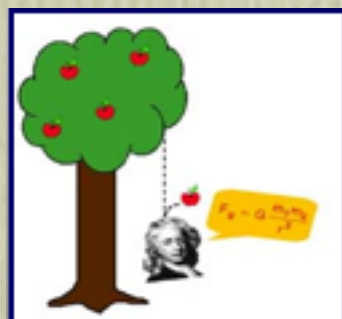
Strong



$SU(3)$
color

gluon

Gravitational



space-time
coordinate
covariance

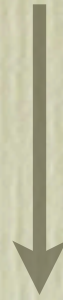
graviton

spin = 2

La Force
de Higgs



Symétrie



aucune !

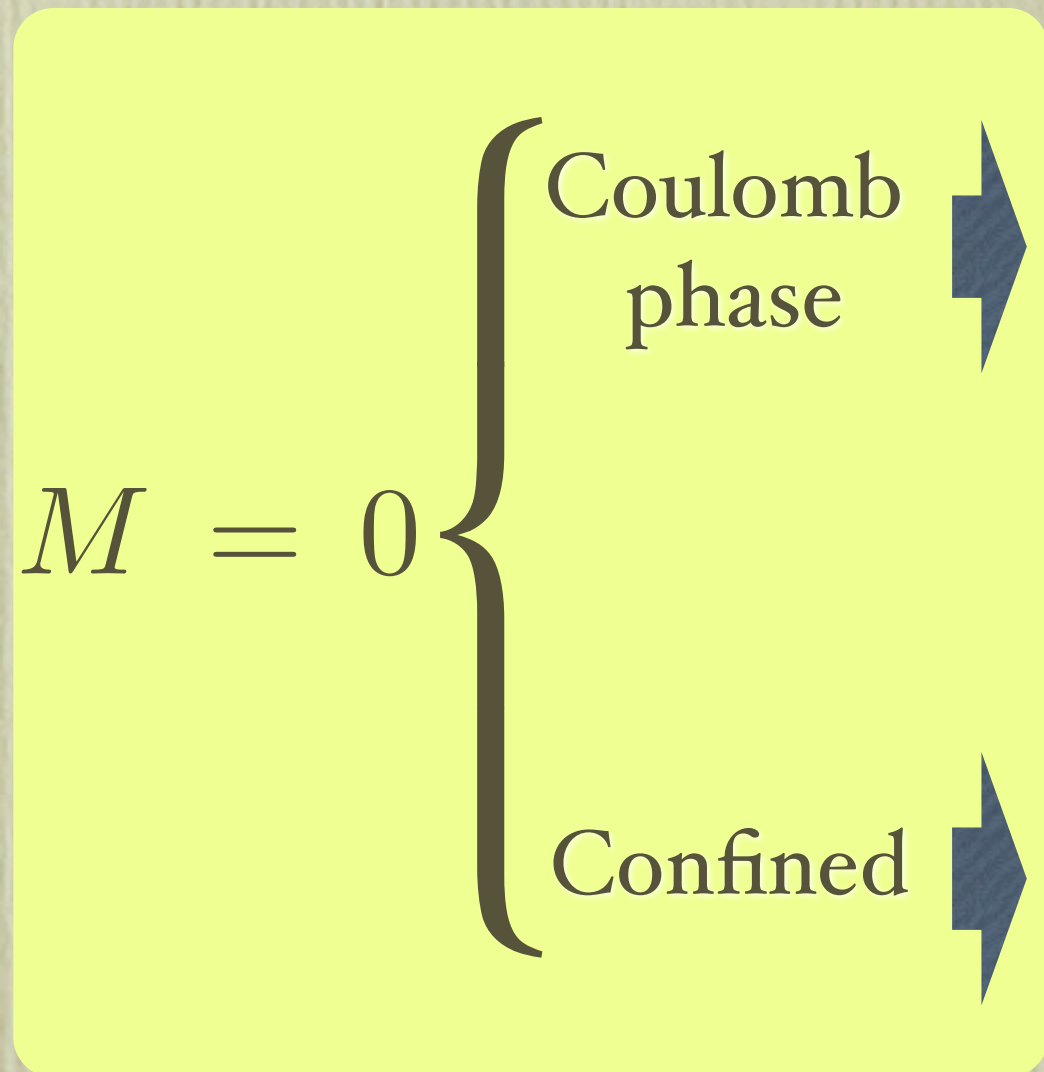
Particule



H
Boson de
Higgs

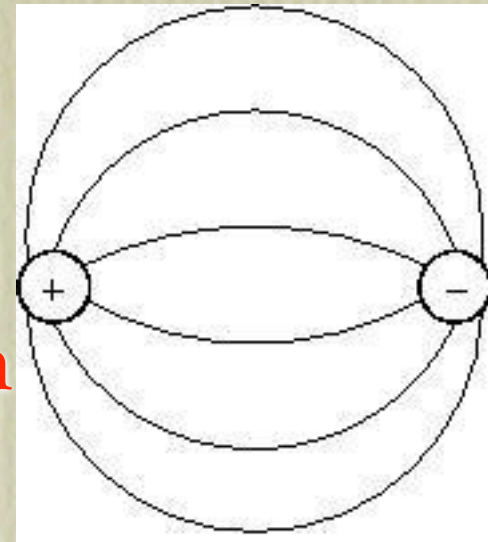
spin = 0

Phases of Fundamental Interactions



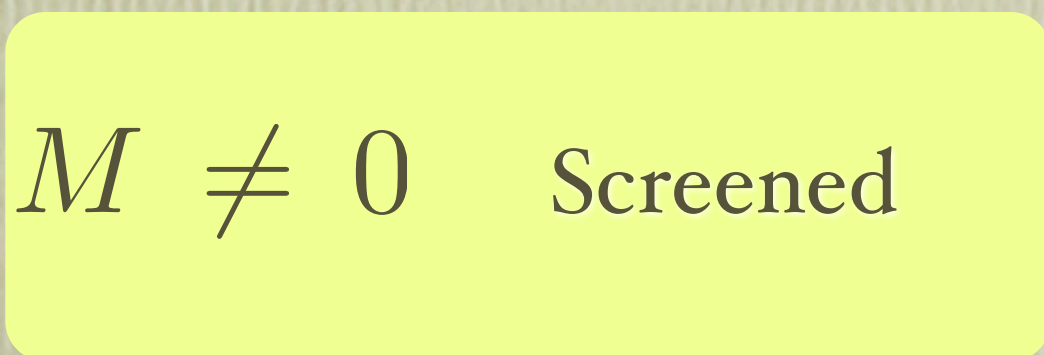
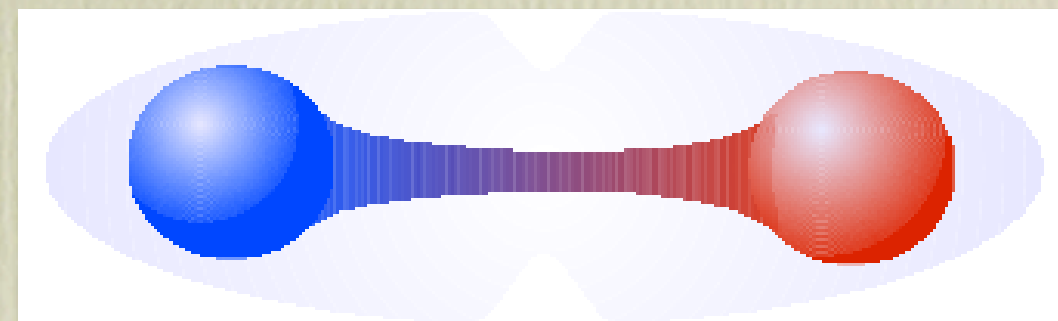
Gravity

Electromagnetism



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

Strong



Weak
&
Higgs

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

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

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

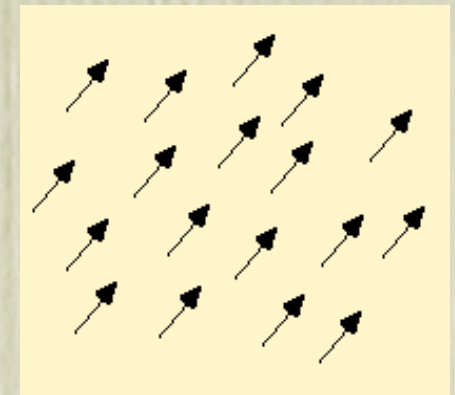
Le champ de Higgs = la réalisation la plus simple du mécanisme de génération de masse des particules

$$\vec{H} = \begin{pmatrix} H^+ \\ H^0 \end{pmatrix} \quad \text{vecteur complexe dans l'espace de la } \textbf{charge}$$

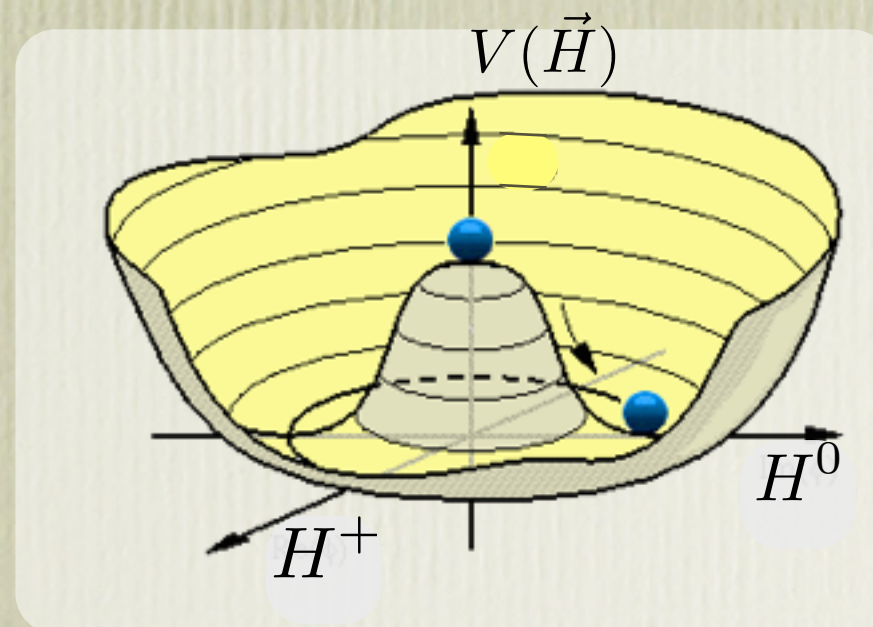
(fibré sur \mathbf{R}^4)

le *vide* est *polarisé*

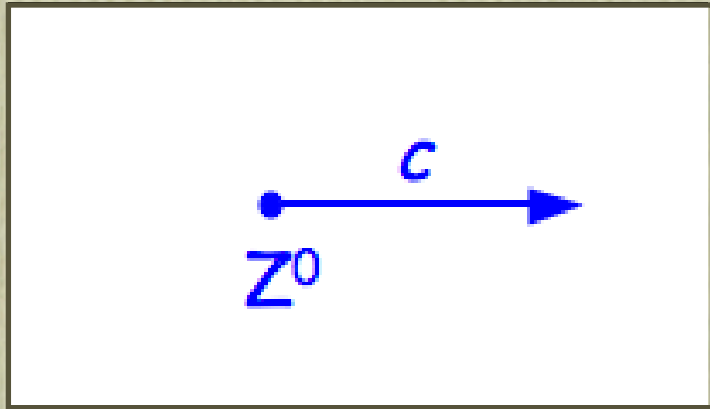
$$\langle \vec{H} \rangle \neq 0$$



Brisure Spontanée de Symétrie

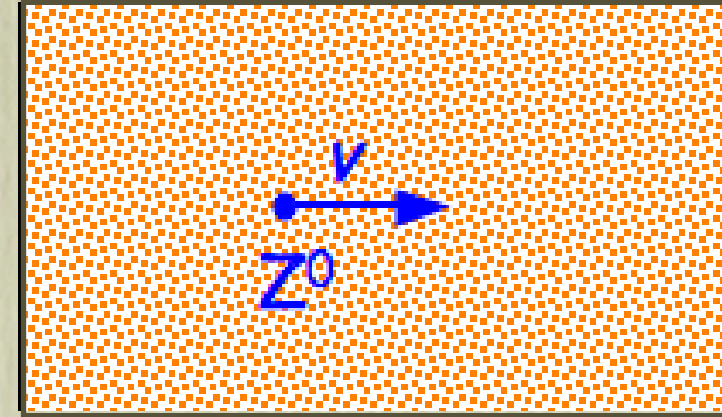


$$\langle \vec{H} \rangle = 0$$



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

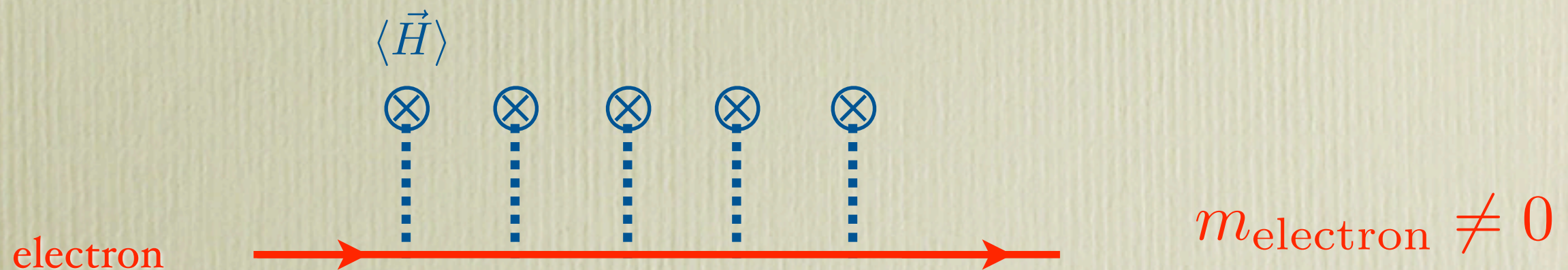
$$\langle \vec{H} \rangle \neq 0$$



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

- 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 a 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 attends la nouvelle phase du LHC dans quelque mois, avec des collisions a une énergie jamais obtenue auparavant