



IN2P3
INSTITUT NATIONAL DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE
ET DE PHYSIQUE DES PARTICULES



Ecole « techniques de base du détecteur » Cargèse

Pascal Vincent
Université Pierre et Marie Curie
LPNHE, Paris

Introduction

- Les systèmes expérimentaux
- Les interactions des particules chargées
- Les interactions des particules neutres
- Le détecteur de particules
- Visite d'une expérience

« de quoi parlons nous ? »

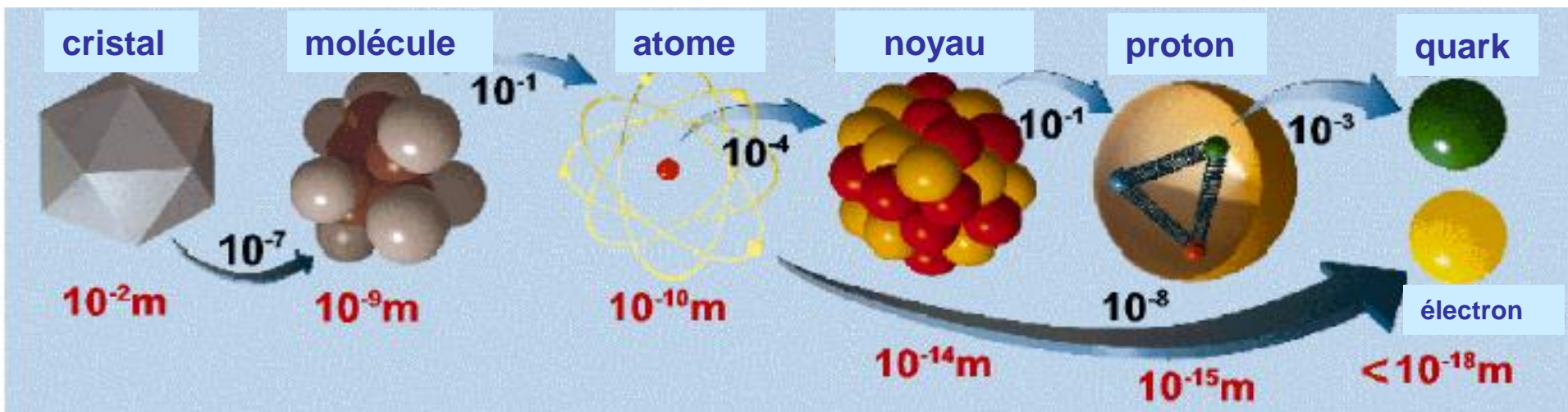
PRÉFACE



Le monde des **particules** (désir de simplicité)

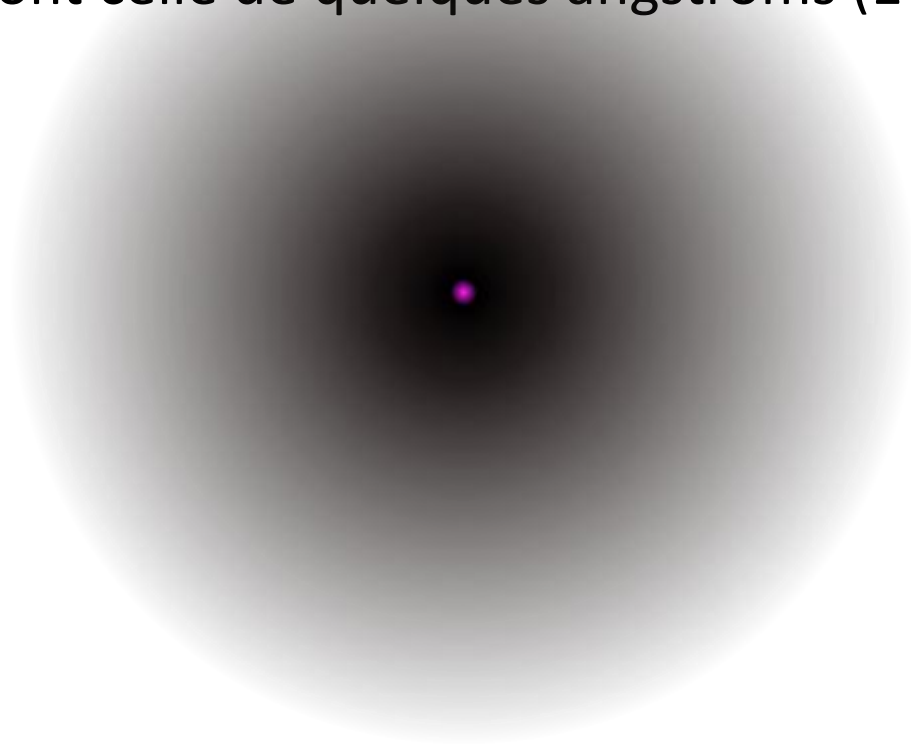


Vers l'infiniment petit



Vers l'infiniment petit

Un atome est formé d'un noyau dont le rayon est de quelques Fermi ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$) et d'un cortège électronique dont les dimensions sont celle de quelques angströms ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$).



Quelques ordres de grandeur

Les masses en présence :

$$m_p = 1,672\,621 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_n = 1,674\,927 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_e = 9,109\,381\,88(72) \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$m_p \cong 2\,000 \times m_e$$

La « densité matière nucléaire » :

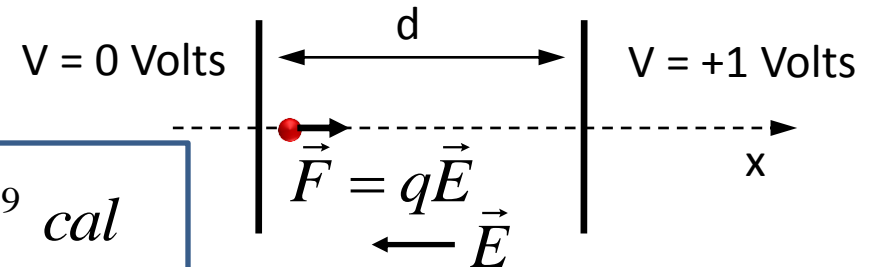
$$\rho = \frac{\text{Masse du nucléon}}{\text{"Volume nucléaire"}} = \frac{m_N}{\frac{4\pi}{3} r_{\text{nucléaire}}^3} \sim 4 \cdot 10^{17} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\cong 60\,000\,000\,000\,000 \times \bar{\rho}_{\oplus}$$

Unités d'énergie

L'unité d'énergie utilisée pour le monde subatomique est l'électronvolt (eV).

C'est l'énergie cinétique d'un électron accéléré depuis le repos par une différence de potentiel d'un volt.



$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 0,383 \cdot 10^{-19} \text{ cal}$$

Il faut 26 000 000 000 000 000 000 eV = 26 EeV pour élever la température d'un gramme d'eau pure de 14 à 15 degrés centigrades.

$$\begin{aligned} 1 \text{ keV} &= 1\,000 \text{ eV} \\ 1 \text{ MeV} &= 1\,000\,000 \text{ eV} \\ 1 \text{ GeV} &= 1\,000\,000\,000 \text{ eV} \\ 1 \text{ TeV} &= 1\,000\,000\,000\,000 \text{ eV} \end{aligned}$$

Quelques ordres de grandeur

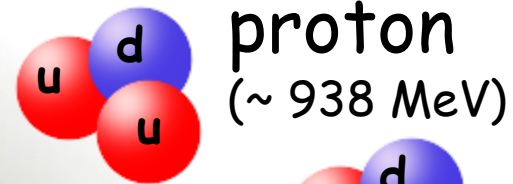
Densité d'énergie :

| | Densité d'énergie (J/tonne) |
|------------------|---------------------------------|
| TNT | 4 600 000 000 |
| Carburant | 45 000 000 000 |
| Nucléon de 1 GeV | 166 000 000 000 000 000 000 000 |

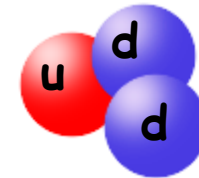


Les particules « élémentaires »

Les fermions (spin = $\frac{1}{2}$).



Les baryons



Masse
(MeV)

Les leptons

0.5



Charge : -1

0

Masse
(MeV)

$< 2 \cdot 10^{-5}$

Masse
(MeV)

6

Les quarks



-1/3

+2/3

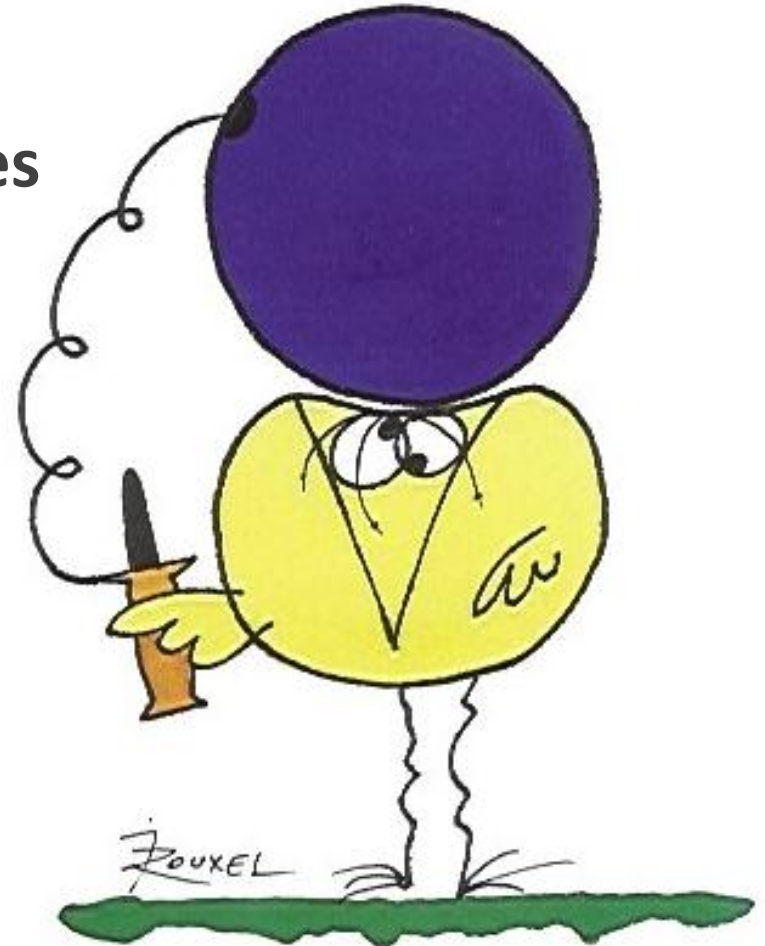
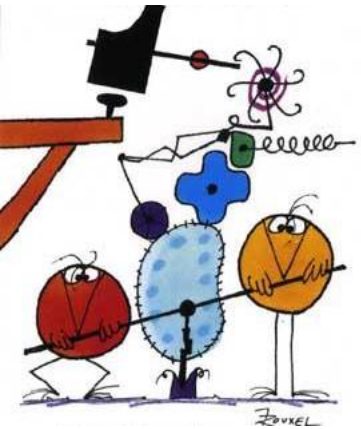
Masse
(MeV)

3



Comment en sommes nous arrivé là ?

En cassant la matière avec des machines de plus en plus puissantes



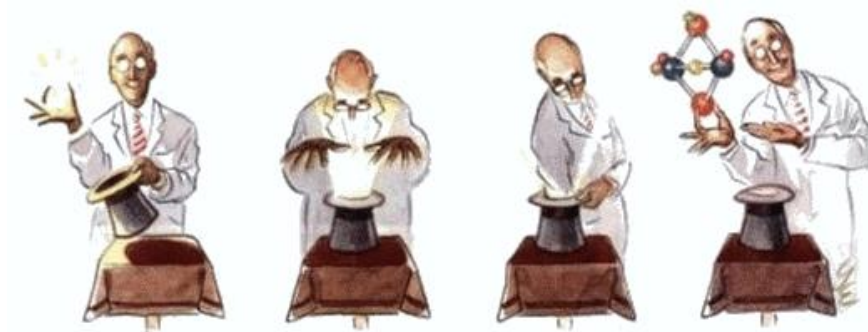
mais ...



Ca se complique

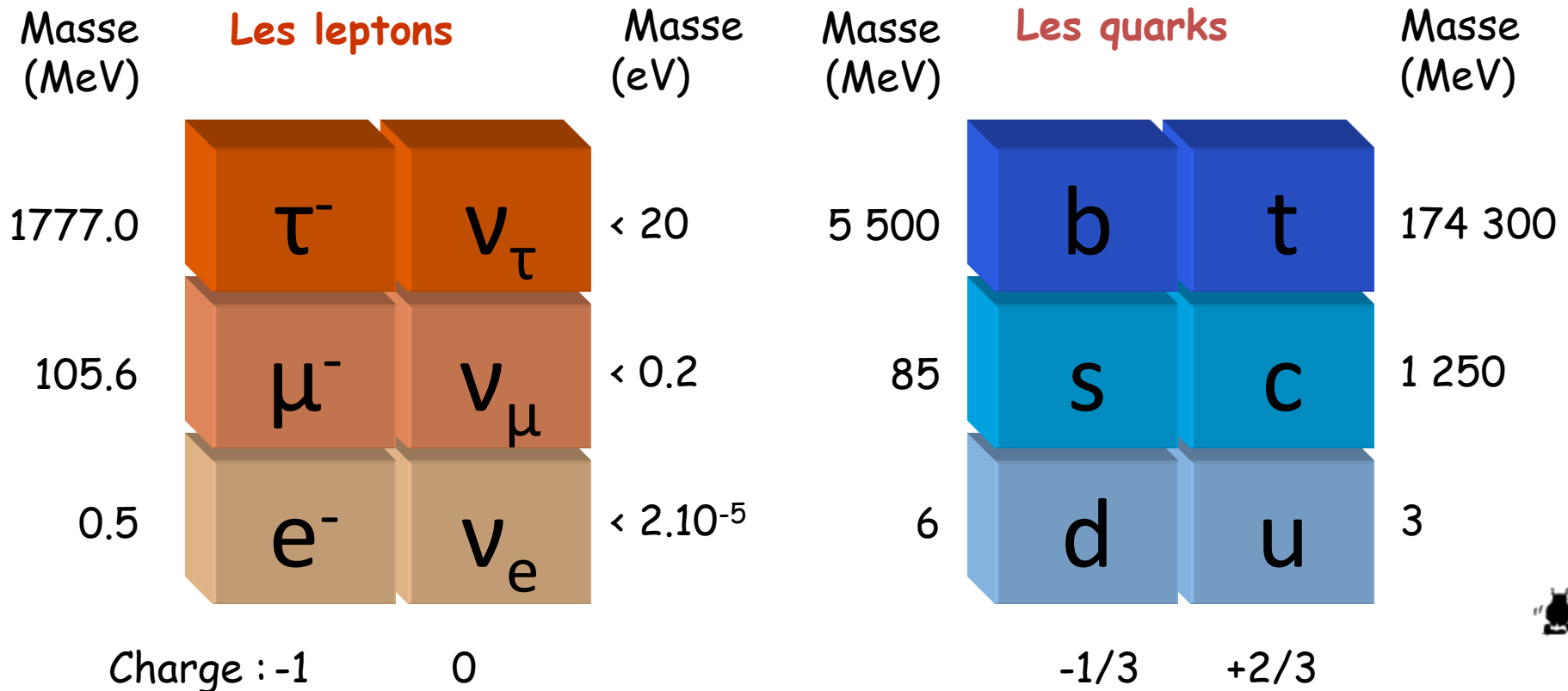
En augmentant l'énergie on peut aussi faire apparaître de nouvelles particules étranges

$$E = mc^2$$



Les particules « élémentaires »

Les fermions (spin = $\frac{1}{2}$).

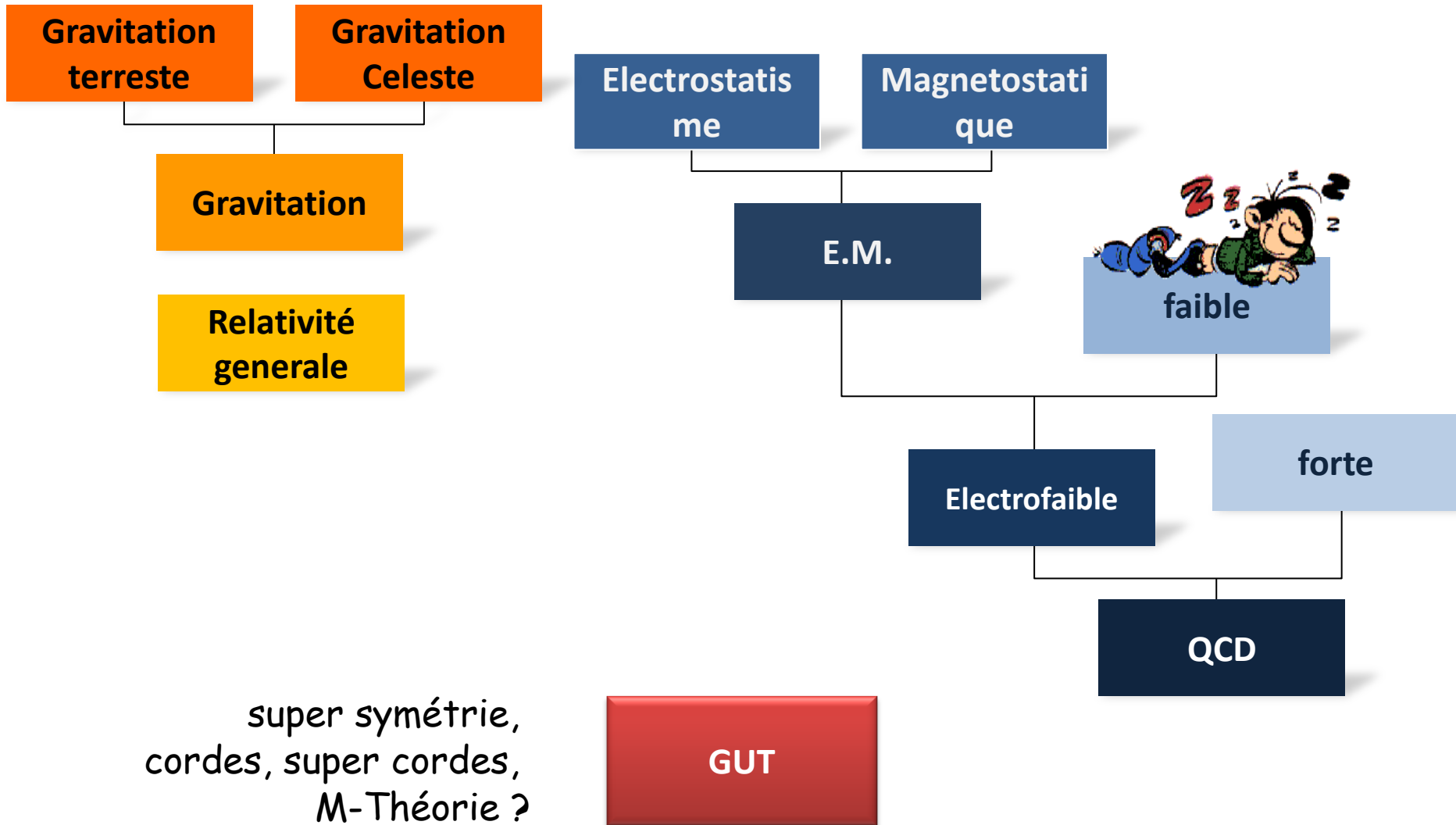


(6 leptons + 6 quarks \times 3 couleurs) \times 2 spins + Antimatière = **96 états**

Le monde des **interactions** (désir d'unicité)



Le monde des interactions



super symétrie,
cordes, super cordes,
M-Théorie ?

Le monde des interactions

| Type | Portée | Intensité | Quanta | Charge | domaine |
|--------------------|-------------|-----------------|--------------|------------------|------------------------------------|
| Forte | fm | 1 | 8 gluons | Couleur | Nucléaire |
| E.M. | Très grande | 1/1000 | photon | électrique | Nucléaire, atomique et moléculaire |
| Faible | 1/100 fm | $\sim 10^{-5}$ | Z^0, W^\pm | saveur | Nucléaire |
| Gravitation | Très grande | $\sim 10^{-38}$ | graviton | Masse ou énergie | Matière |

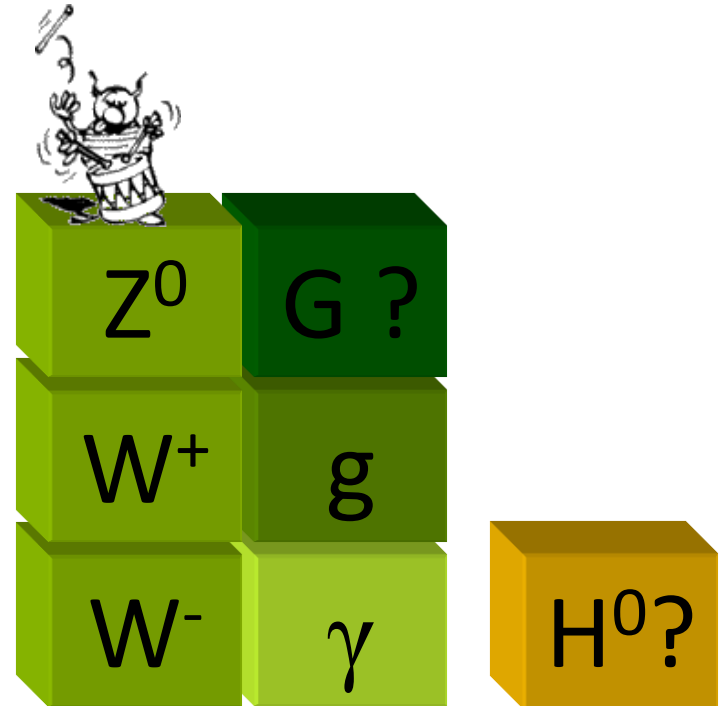
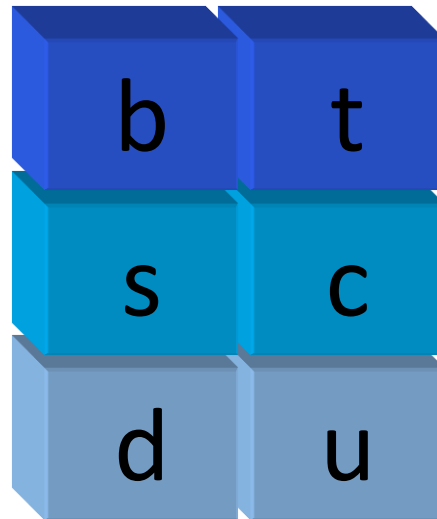
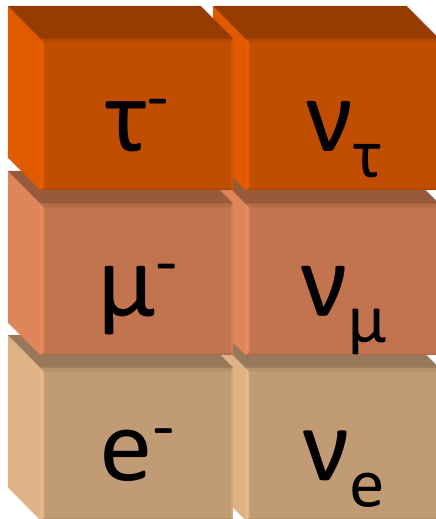
Les particules « élémentaires »

Les fermions

Les bosons

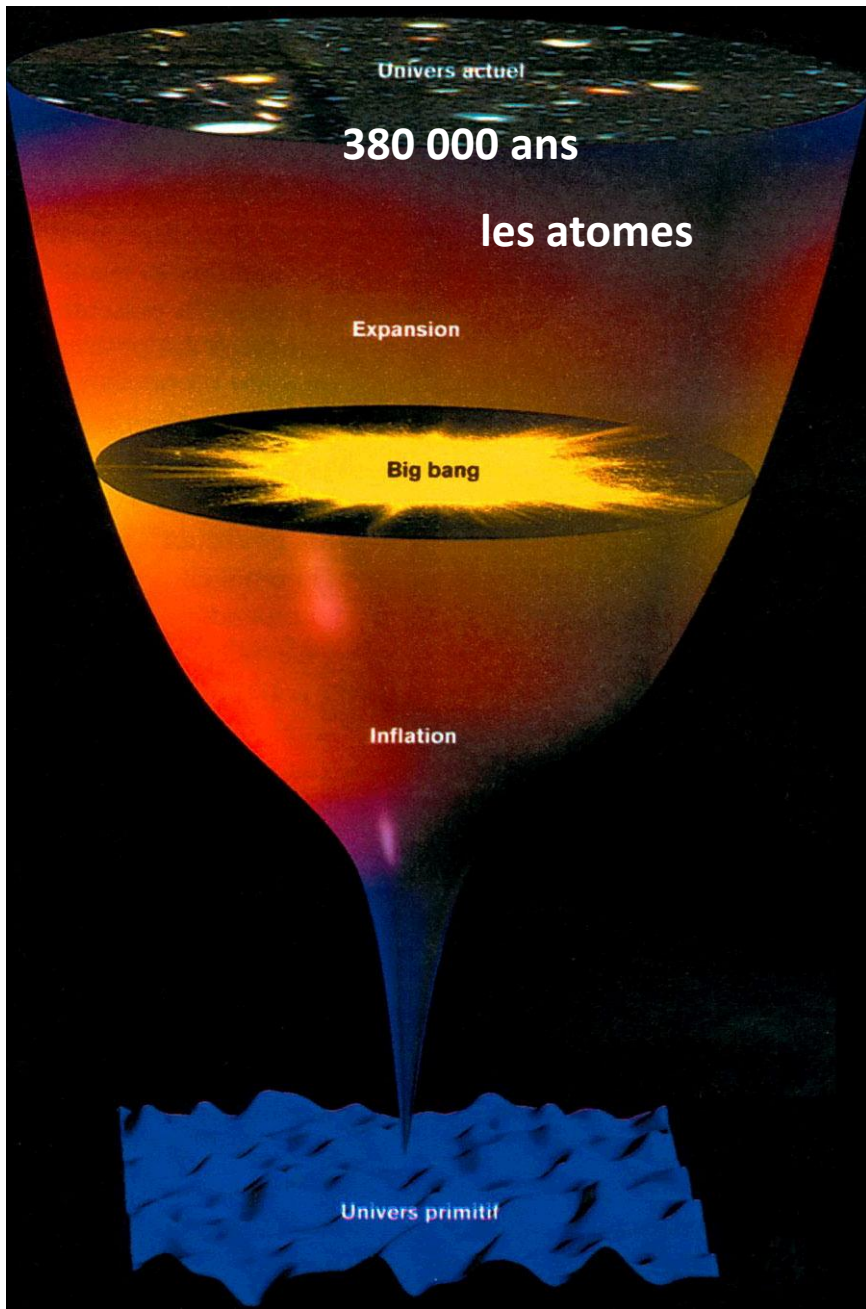
Les leptons

Les quarks



Une vision de l'Univers





13 700 000 000 d'années auront été nécessaires pour donner naissance à l'école « techniques de base du détecteur » de Cargèse (à 1.4% près). Dans 4 milliards d'années Andromède (M31) y mettra un terme.

10^{-10} ... 1 s : les particules

10^{-32} s : le « big bang »

$\sim 10^{-34}$ s : l'inflation

Univers observable était avant l'inflation contenu dans un espace considérablement petit (1/1 000 000 000 du proton !),

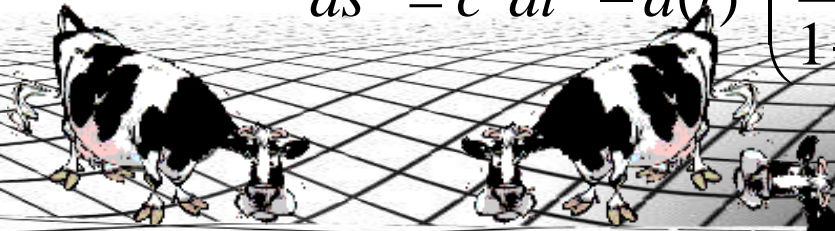
$< 10^{-43}$ s : l'aire de Planck

Vide primordial : 10^{94} GeV/cm³ ?

L'Univers actuel

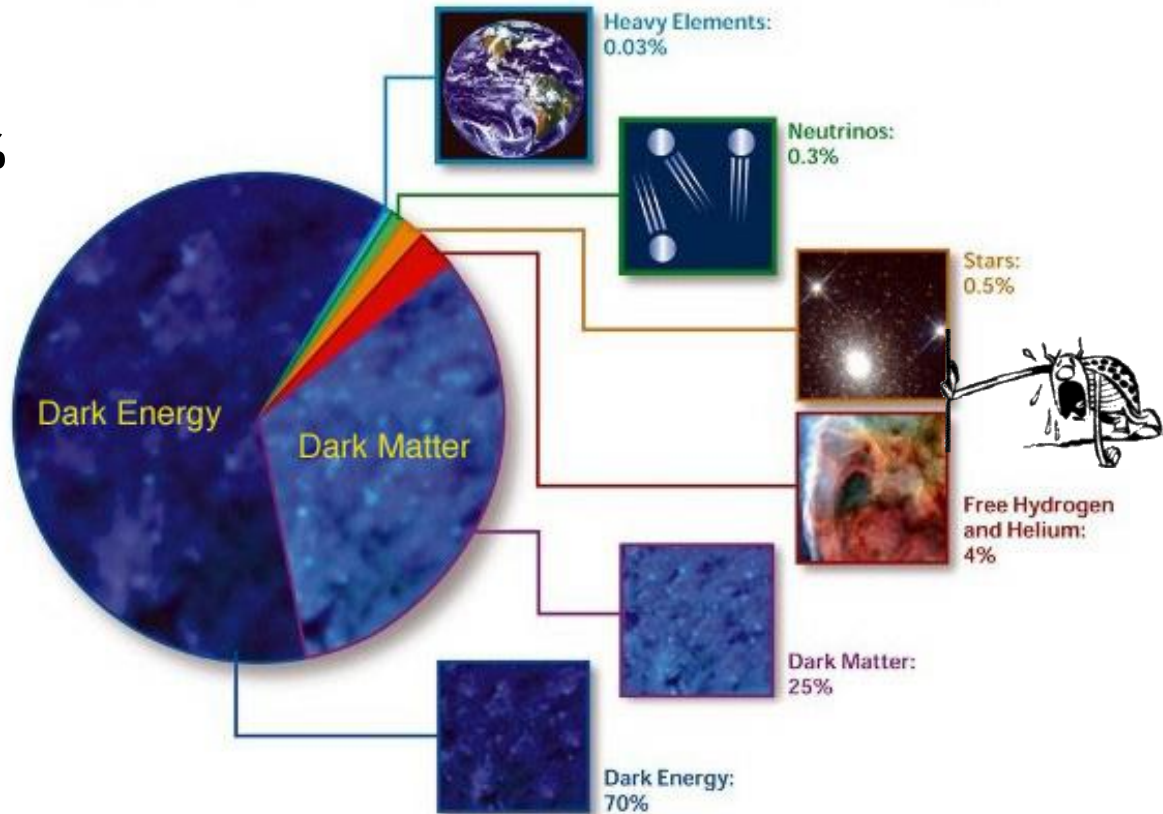
- ❖ Plat
- ❖ Homogène et isotrope
- ❖ En expansion accélérée
- ❖ Décrit par la métrique de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a(t)^2 \left(\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 d\Omega^2 \right)$$



Notre compréhension de l'Univers

| | |
|--------------------|-------|
| Matière hadronique | 4.03% |
| Neutrinos | 0.3% |
| Rayonnement | 0.5% |
| Matière noire | 25% |
| Energie noire | 70% |



Seul **~4.83%** du contenu de l'Univers est **identifié**

Quelles sont les questions ouvertes et les moyens d'y répondre ?

EPILOGUE

Quelles sont les limites du modèle standard

La compréhension des masses et hiérarchie (mécanisme de Higgs)

Quelle est la masse des neutrinos ?

L'élémentarité des quarks et des leptons

Pourquoi trois familles ?

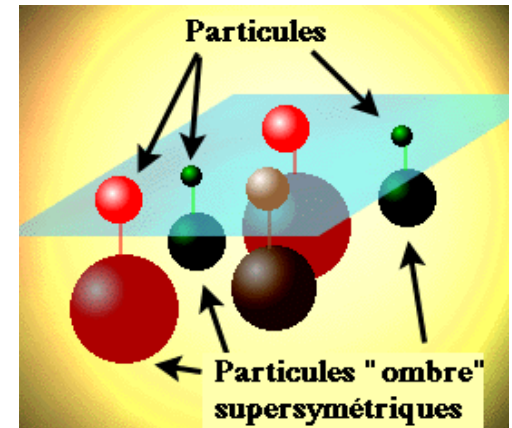
Où est passé l'antimatière ?

L'unification des forces est elle possible ?

Deux familles de particules : bosons - fermions ?

Y a t'il de nouvelles particules et interactions ?

...



Quelles sont les limites du modèle cosmologique

Quelle est l'origine des rayons cosmique d'énergie extrême ?

Quel phénomène est responsable de l'inflation ?

Pourquoi 4 dimensions ?

Comment l'Univers a t'il commence (quelle a été la fluctuation primordiale)?

Quelle est l'origine de la matière noire (matière baryonique $\sim 4\%$ de l'univers)?

- ❖ Autre forme de concentration de matière baryonique : Machos (quelques candidats...)
- ❖ Neutrinos produit dans les événements cosmiques (la masse est trop petite) ?
- ❖ Neutrinos cosmologiques (découplage)?
- ❖ Particules super massives (reliques du big bang) ?

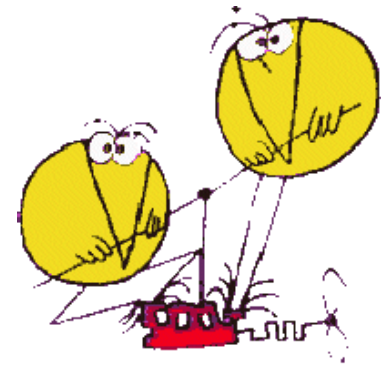
L'énergie noire

- ❖ Energie du vide? Fluctuations quantiques des champs
- ❖ L'antimatière+antigravitation au delà de l'Univers ?
- ❖ Inflaton
- ❖ La constante cosmologique d'Einstein.



Comment répondre a ces questions ?

LA MÉTHODE



La méthode

On cherche à étudier des **objets qui ont existé dans un passé lointain** où régnait des conditions bien différentes (haute énergie, haute densité) des conditions actuelles.

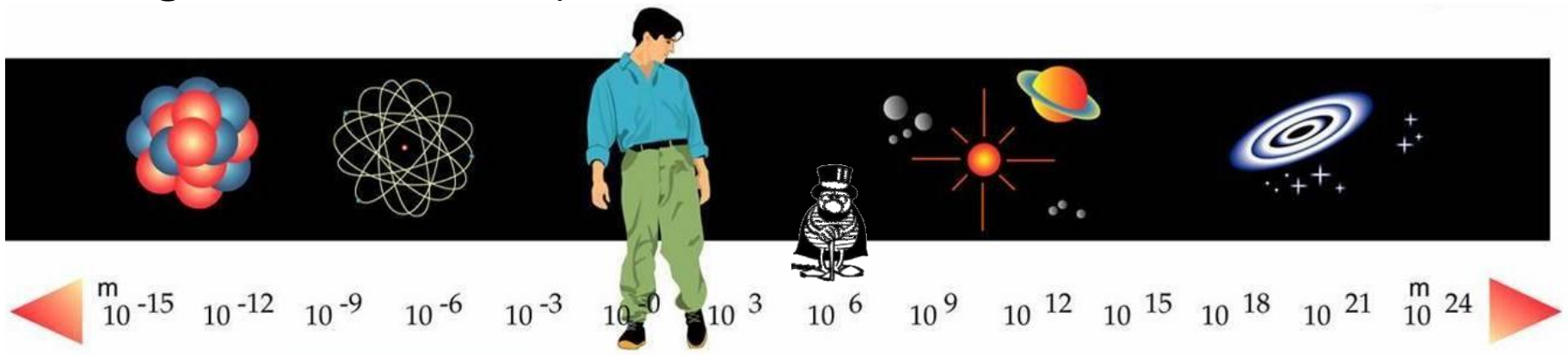
Solutions :



1. Reproduire les conditions qui ont pu exister à leur création.
2. Remonter le temps pour observer ces objets dans le passé.

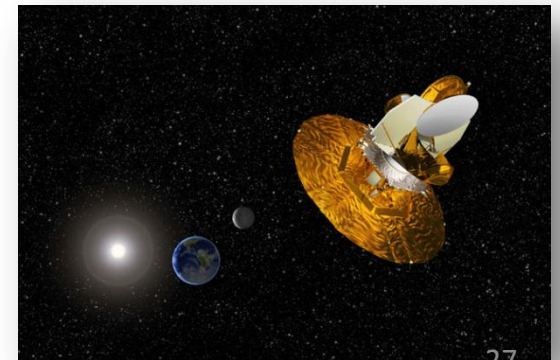
La méthode

On cherche à étudier des **objets qui ont existé dans un passé lointain** où régnait des conditions bien différentes (haute énergie, haute densité) des conditions actuelles.



Pascal Vincent

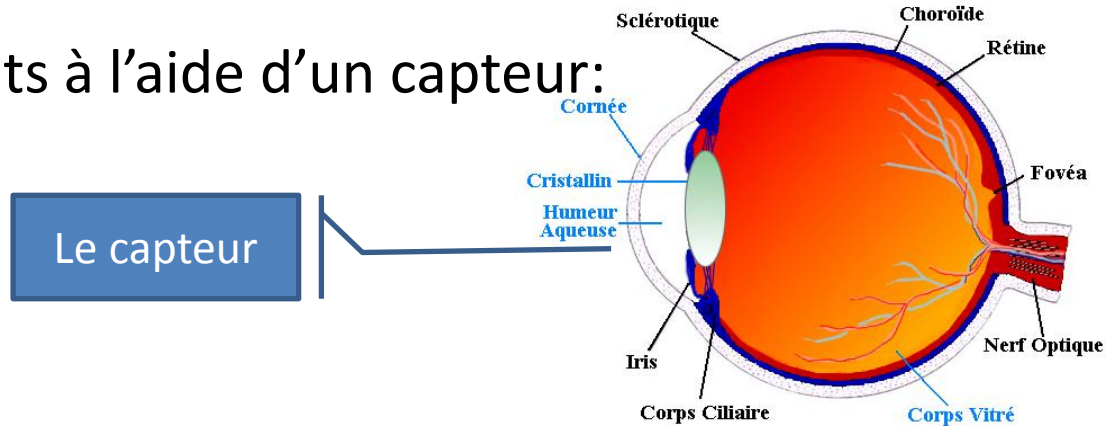
Cargèse



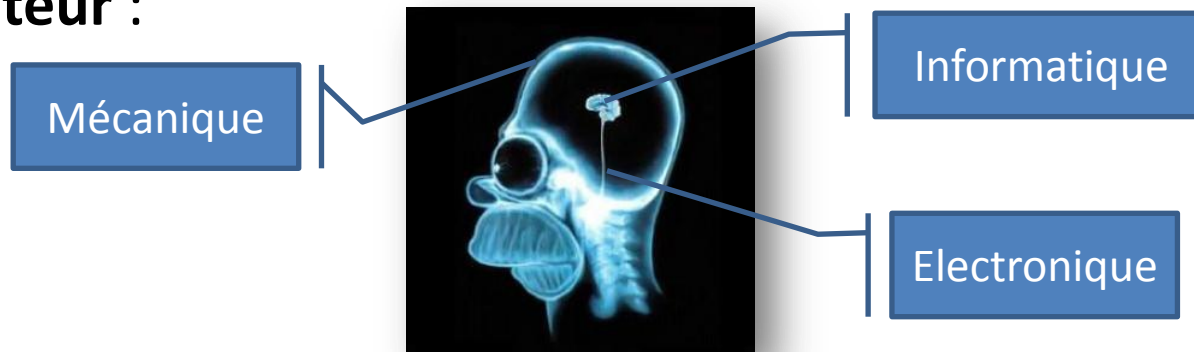
La méthode



On saisi les constituants à l'aide d'un capteur:

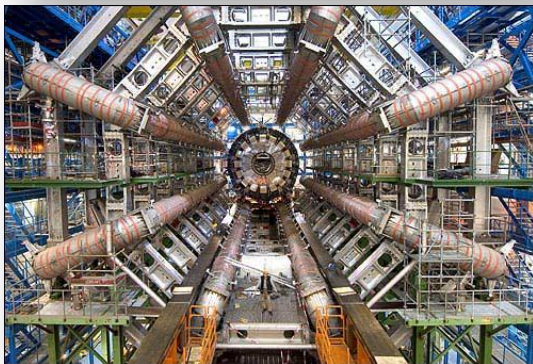


On instrument le capteur d'une **électronique** rapide, d'un **système d'acquisition** performant dans une **structure** pour créer un **détecteur** :



Reproduire les conditions initiales

Ces machines peuvent être des **installations artificielles** conçues par des laboratoires de recherche



Pascal Vincent

ou **naturellement produites dans l'Univers** par des événements cataclysmiques.



Cargèse

