

Ecole « techniques de base du détecteur » Oléron

Pascal Vincent
Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Energies
Université Pierre et Marie Curie

Introduction
Méthodes expérimentales
Les interactions des particules chargées
Les interactions des particules neutres
Les détecteurs de particules
Visite d'une expérience

« de quoi parlons nous ? »

PRÉFACE



Infiniment grand

Univers

Cosmologie

Super-amas

IN2P3/SPP

INSU/SAP

Amas de galaxies

*Astrophysique
& Astroparticule*

Galaxies

Système Solaire

Terre

INSU/SAP

INP

Atomes

INSIS

noyaux

nucléons

quarks & leptons

IN2P3/SPP

Infiniment petit

Infiniment complexe



Psychiatrie

La femme

INSHS

L'homme

INEE

Animaux

Biologie

Végétaux

Cellules

INSB

Chimie

Molécules

INC

*Physique atomique
& du solide*

INSMI

INS2I

Physique nucléaire

Physique des particules



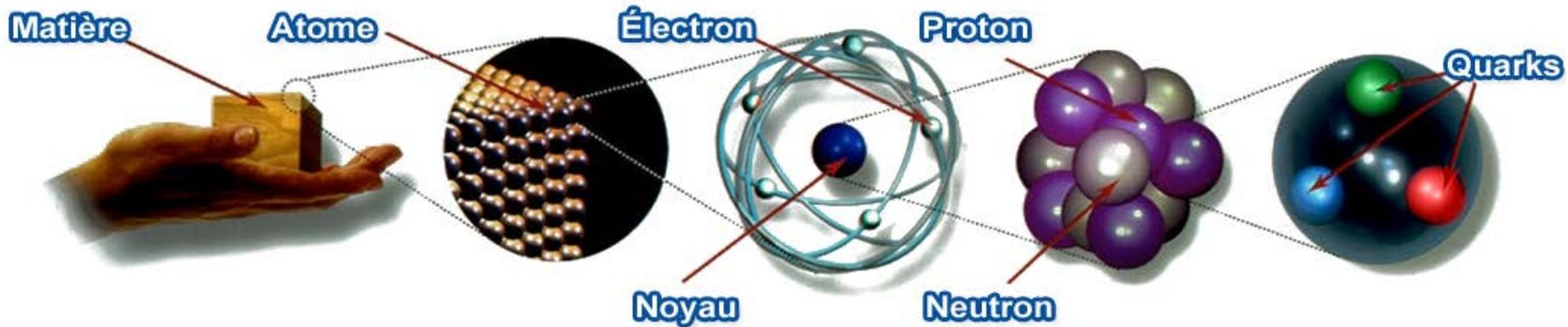
Infiniment petit

quarks & leptons
nucléons
noyaux
Atomes

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



Vers l'infiniment petit



Vers l'infiniment petit

Un atome est formé d'un **cortège électronique** dont les dimensions sont celle de quelques 10^{-10} m.

$$\frac{1}{10\ 000\ 000\ 000} \text{ m} = 1 \text{ \AA}$$

Entourant un **noyau** dont le rayon est de quelques 10^{-15} m

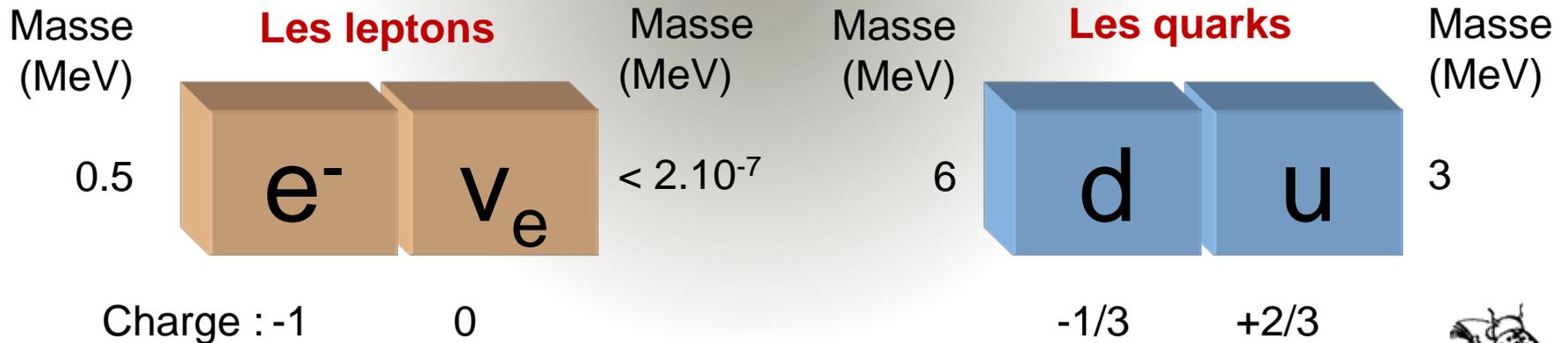
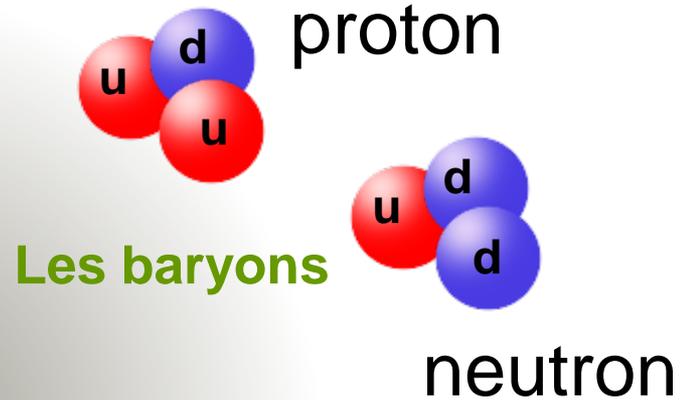
$$\frac{1}{1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000} \text{ m} = 1 \text{ fm}$$

dans un monde quantique.



Les particules « élémentaires »

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



Quelques ordres de grandeur

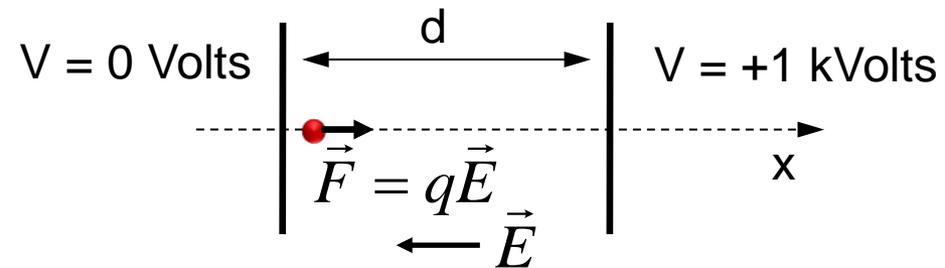
Le joule (ou calorie) une unité d'énergie peu adaptée.

Décélération du camion



$\approx 154\,000\,000$ Joules $\approx 3\,680$ kcal

Accélération d'un électron
par 1kV de tension



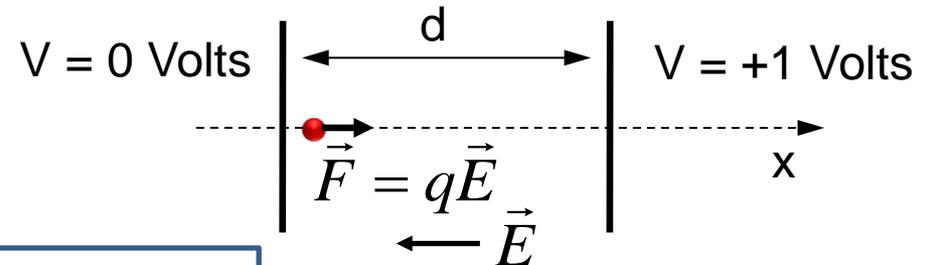
$$\approx \frac{1}{6\,250\,000\,000\,000\,000} \text{ Joule}$$



L'eV

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.



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

Pour élever la température d'un gramme d'eau pure de 1 degré centigrade, il faut 26 000 000 000 000 000 000 eV = 26 EeV (26 milliards de milliards d'eV).



Encore des ordres de grandeur

Les masses en présence :

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

$$m_n = 1.674\,927 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

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

Des grandeurs très différentes et d'autres très semblables : ?

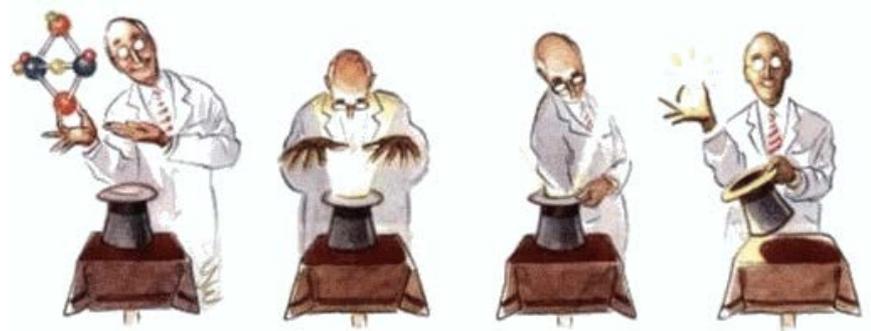
$$m_p \cong 2\,000 \times m_e$$

$$m_p \cong m_n$$



La masse : eV/c²

$$E = mc^2$$



Nécessité d'introduire une nouvelle unité :

$$m = \frac{E}{c^2}$$

$$\begin{aligned} m_p &= 938 \quad \text{MeV}/c^2 \\ m_n &= 939 \quad \text{MeV}/c^2 \\ m_e &= 0,511 \quad \text{MeV}/c^2 \end{aligned}$$



Des grandeurs pas si petites

La « densité matière nucléaire » :

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

$$\rho \cong 60\,000\,000\,000\,000 \times \langle \rho_{\oplus} \rangle$$

60 milles milliards de fois la densité moyenne de la terre.



Quelques ordres de grandeur

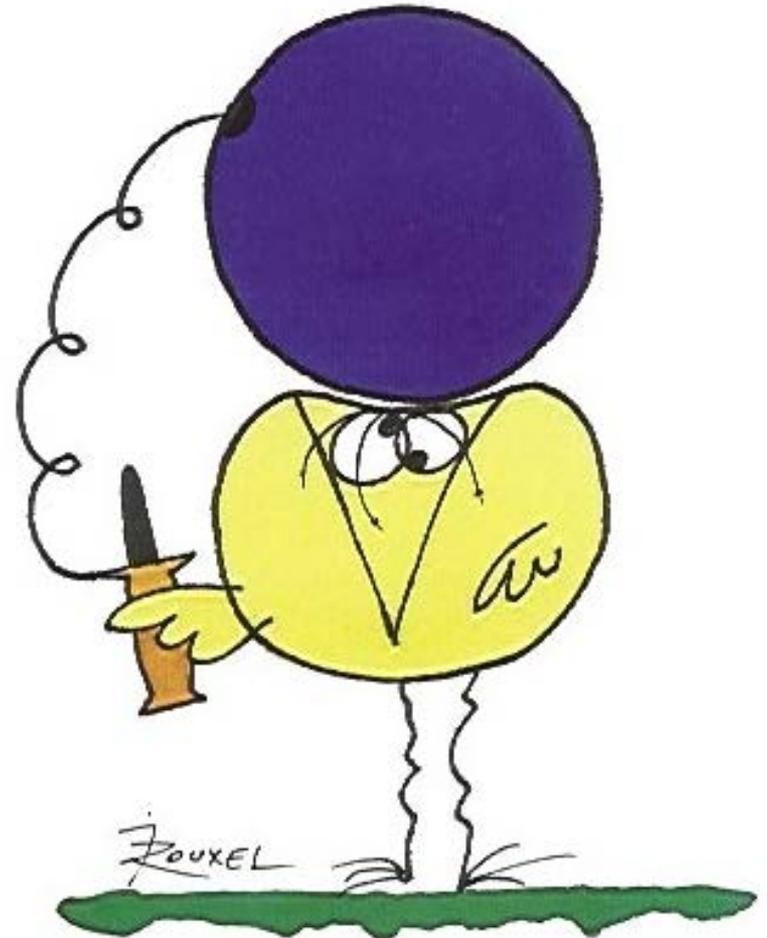
Densité d'énergie :

	Densité d'énergie (J/tonne)
TNT	4 184 000 000
Carburant	41 860 000 000
Uranium 235	81 000 000 000 000
Deutérium+Trithium	364 500 000 000 000
Nucléon de 1 GeV	166 000 000 000 000 000 000 000



Comment 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 ...



créer de nouvelles particules étranges

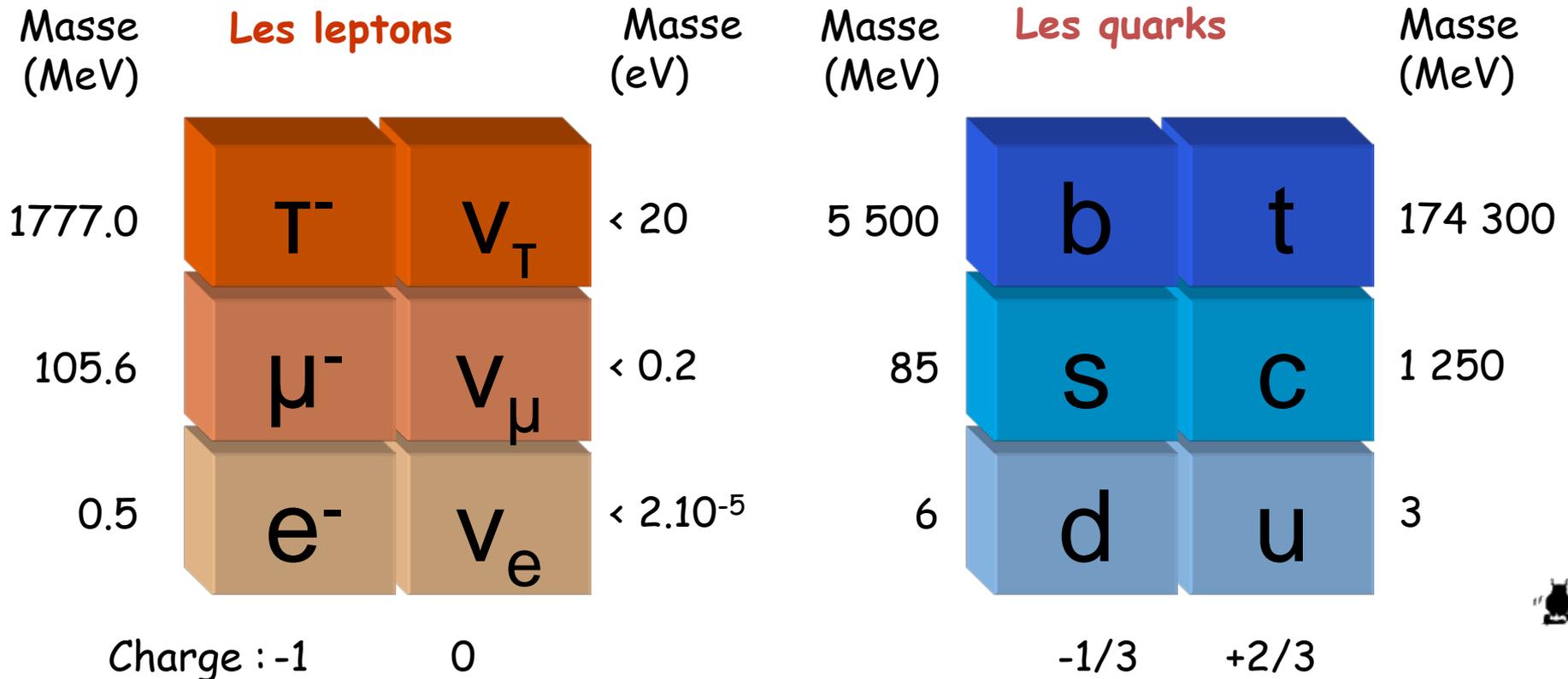
$$E = mc^2$$



$$m = \frac{E}{c^2}$$

Les particules « élémentaires »

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

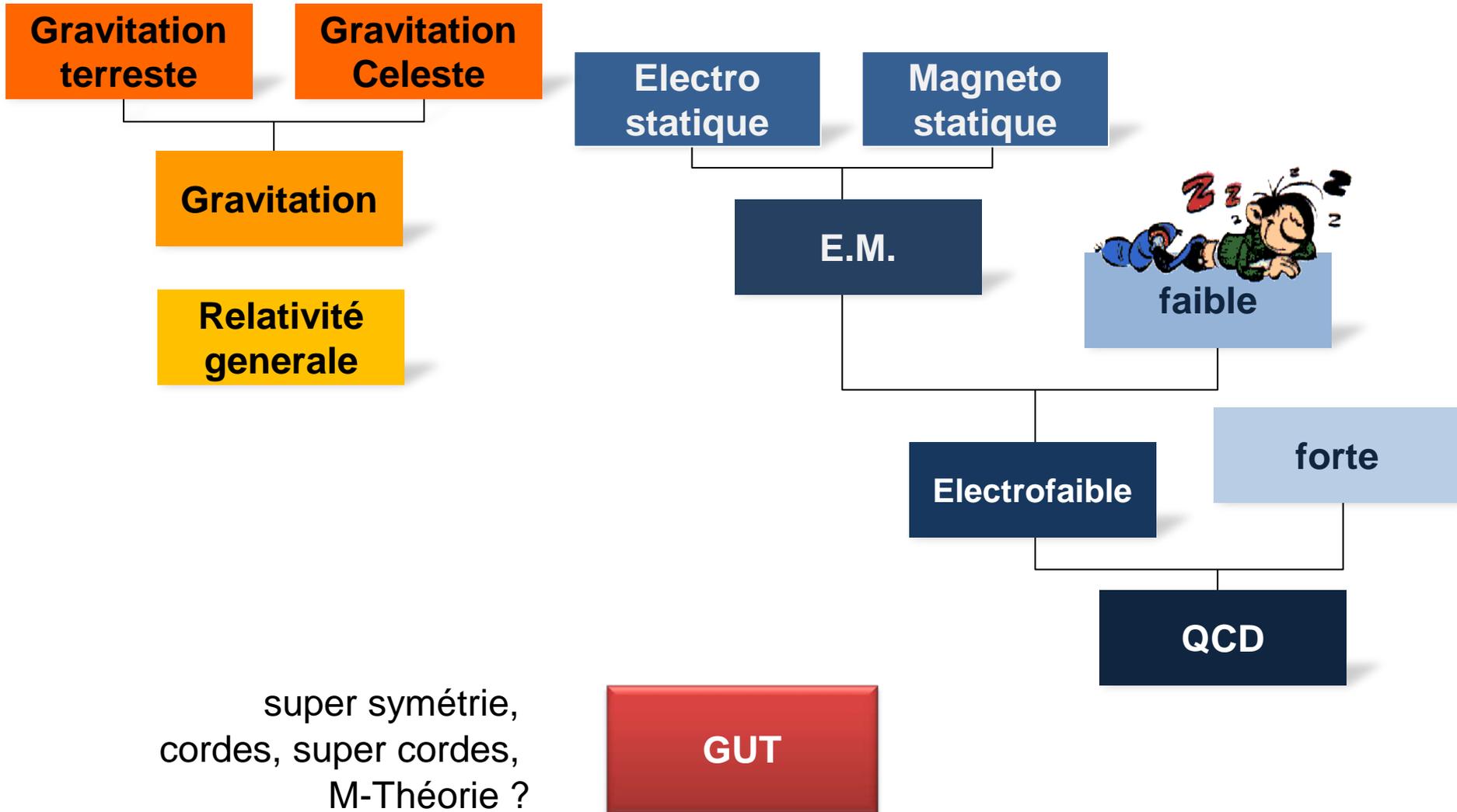


(6 leptons + 6 quarks \times 3 couleurs) \times 2 spins + Antimatière = 96 états

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



Le monde des interactions



Le monde des interactions

Type	Portée	Intensité	Quanta	Charge	domaine
Forte	fm	1	8 gluons	Couleur	Nucléaire
E.M.	Très grande	~ 1/1 000	photon	électrique	Nucléaire, atomique et moléculaire
Faible	1/100 fm	~ 1/100 000	Z ⁰ , W [±]	saveur	Nucléaire
Gravitation	Très grande	1/100 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000	graviton	Masse ou énergie	Matière

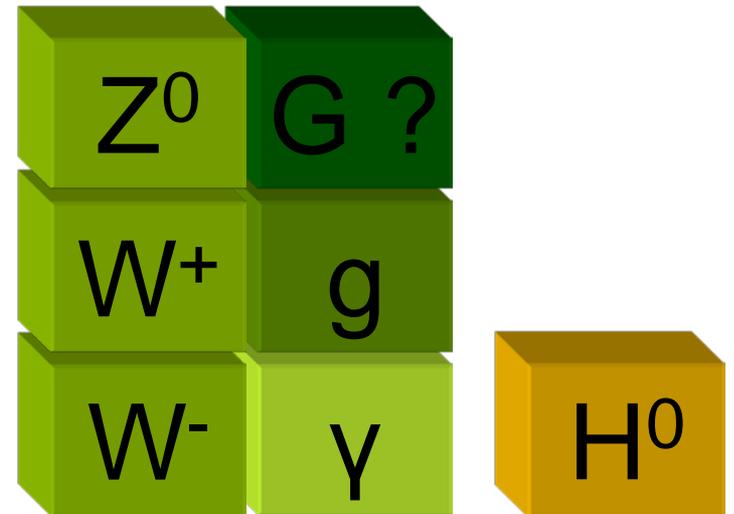
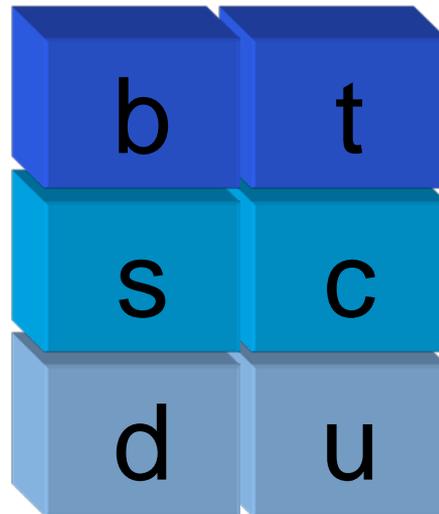
Les particules « élémentaires »

Les fermions

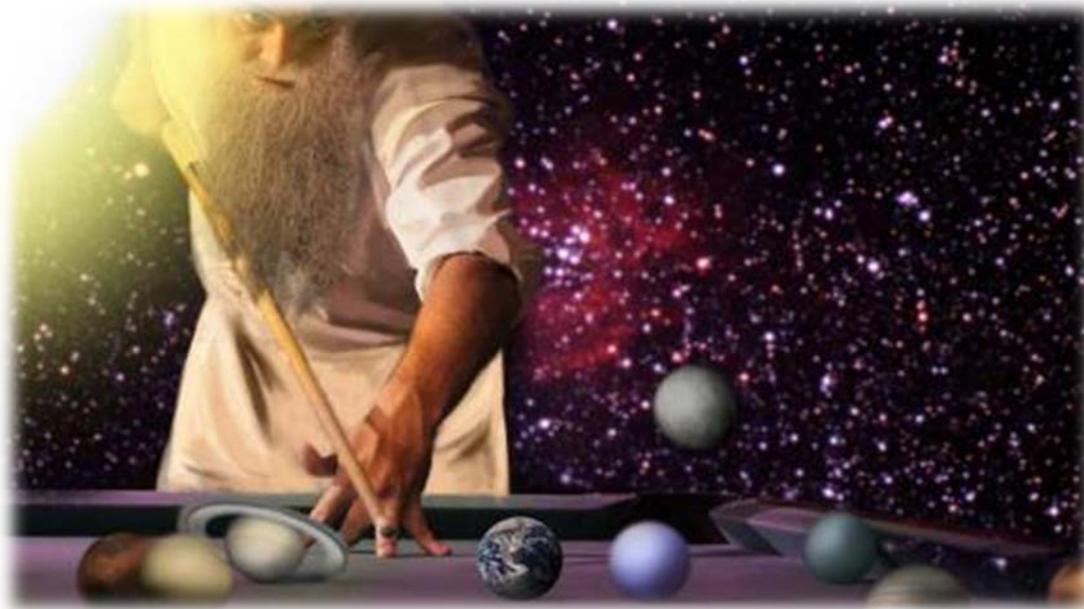
Les bosons

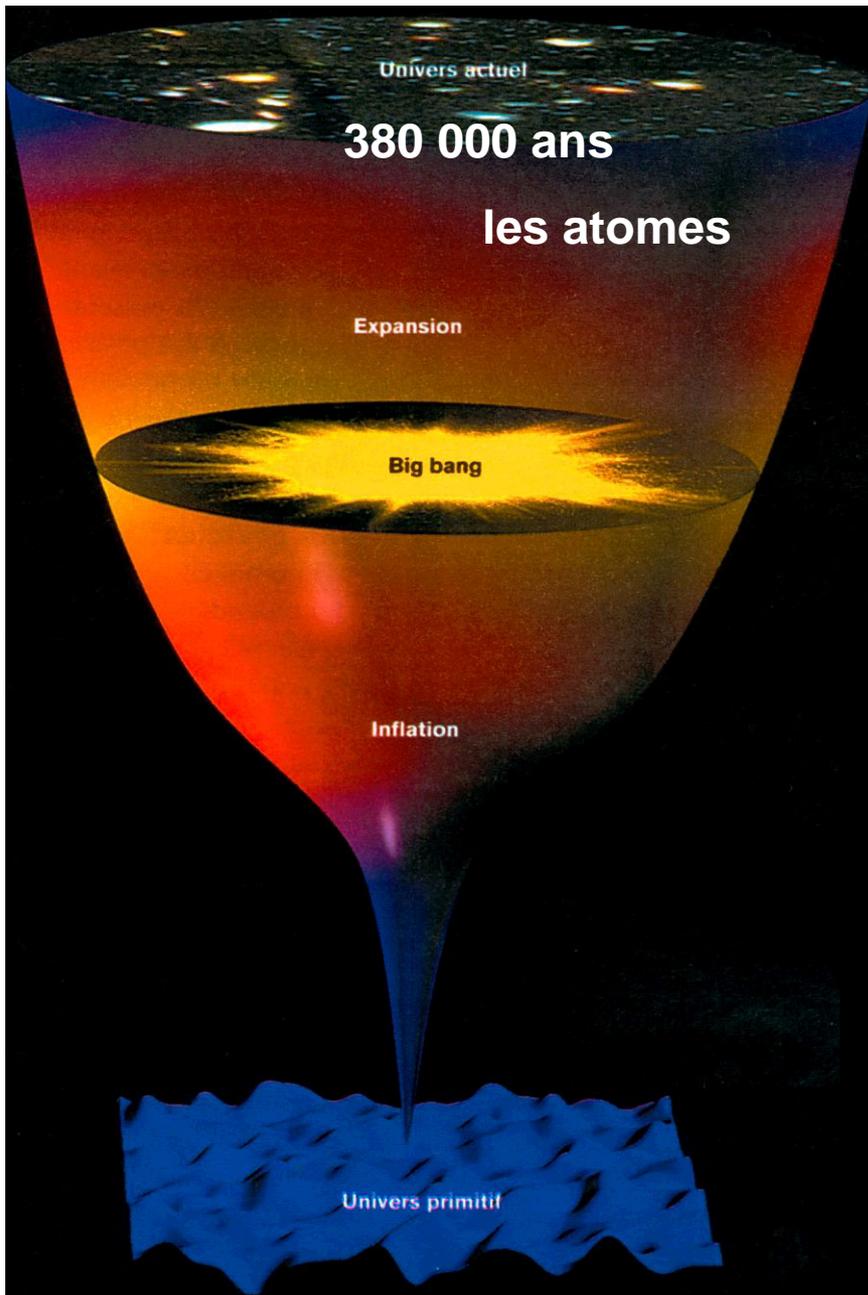
Les leptons

Les quarks



Une vision de l'Univers





Pascal Vincent

13 700 000 000 d'années auront été nécessaires pour donner naissance à l'école « techniques de base du détecteur » de Cargèse Oléron (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

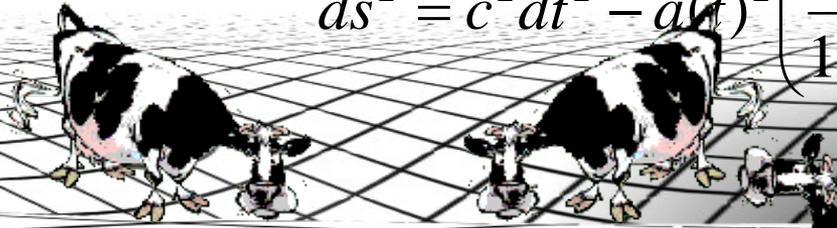
Vide primordial : 10^{94} GeV/cm³ ?

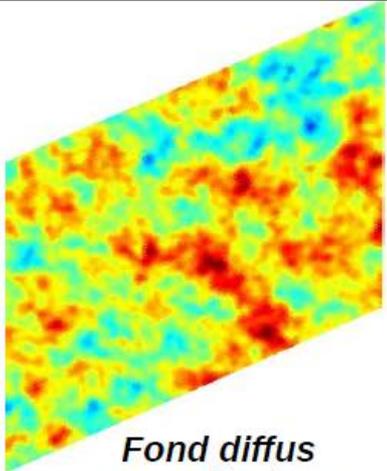
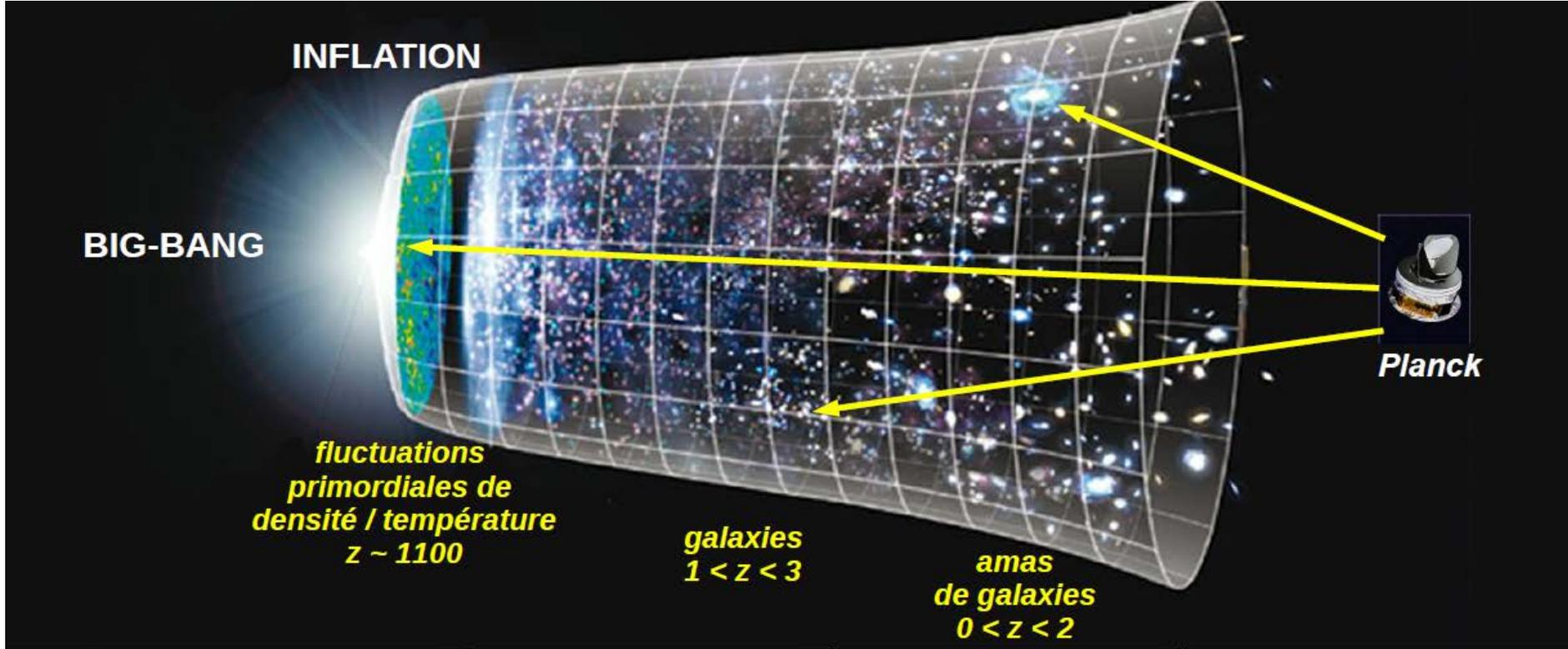


L'Univers actuel

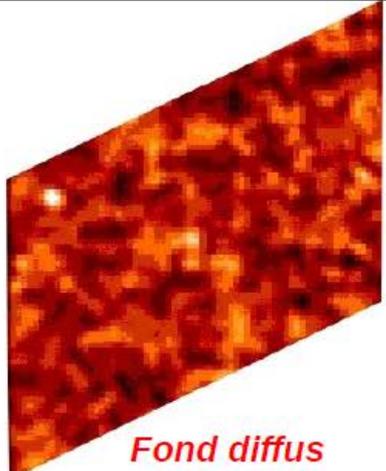
- ❖ Plat
- ❖ Homogène et isotrope
- ❖ En expansion accélérée
- ❖ Décrit par la métrique de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker

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

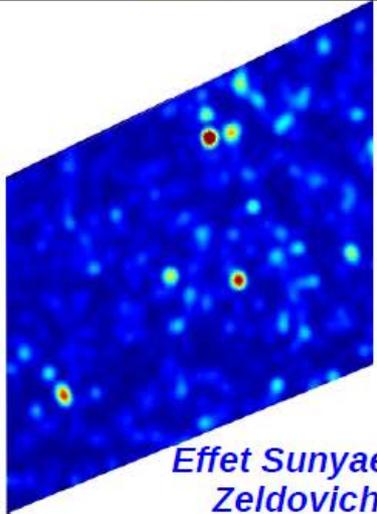




Fond diffus cosmologique
CMB

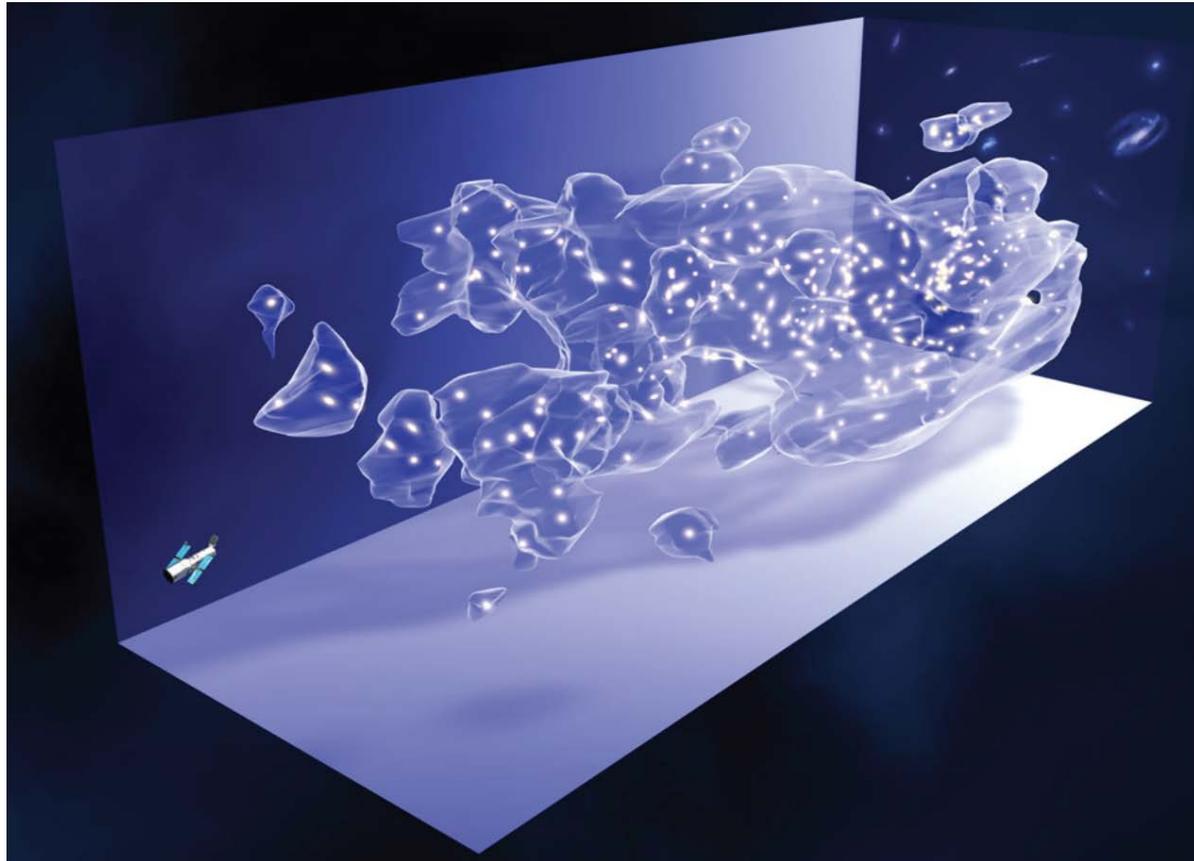


Fond diffus infrarouge
CIB



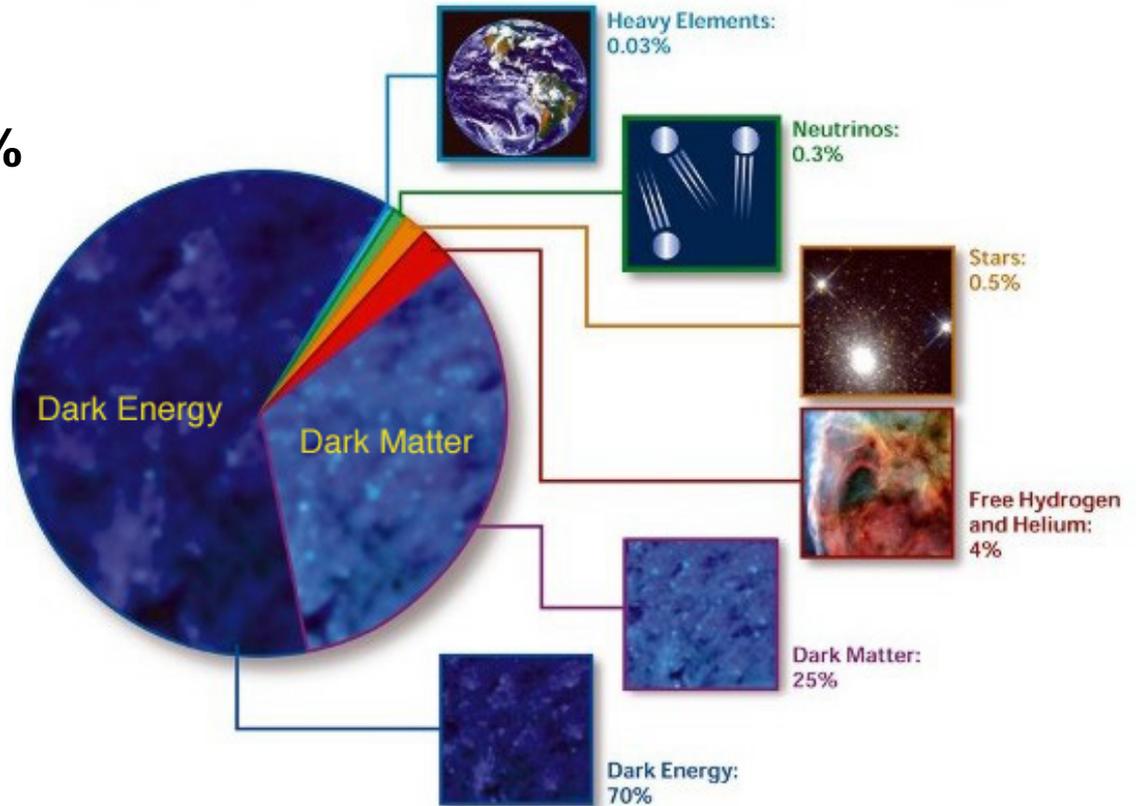
Effet Sunyaev-Zeldovich
SZ

Distribution des galaxies



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'éléментарité des quarks et des leptons

Pourquoi trois familles ?

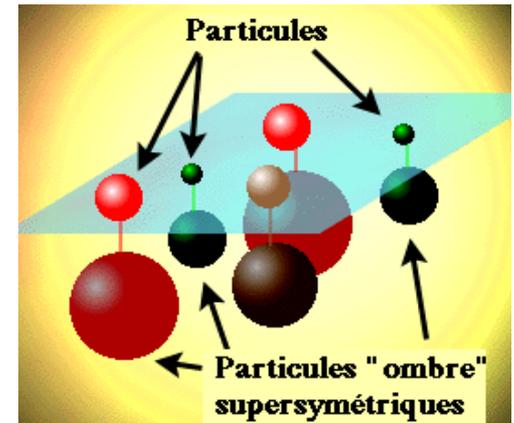
Où est passé l'antimatière ?

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 ?

Qu'est ce que l'espace temps ? 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 ~ 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) ?

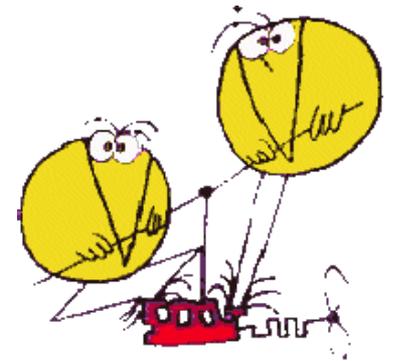
L'énergie noire

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



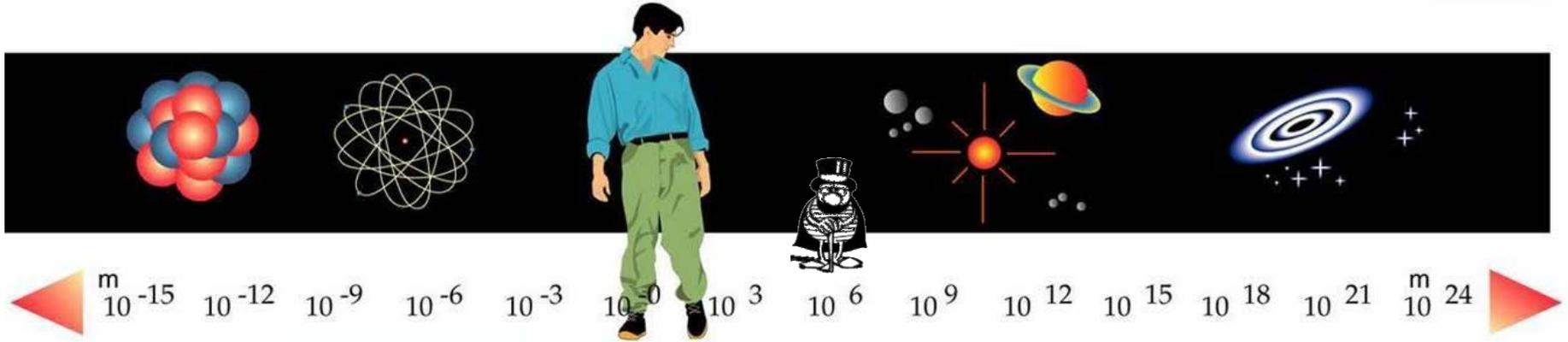
Comment répondre a ces questions ?

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.

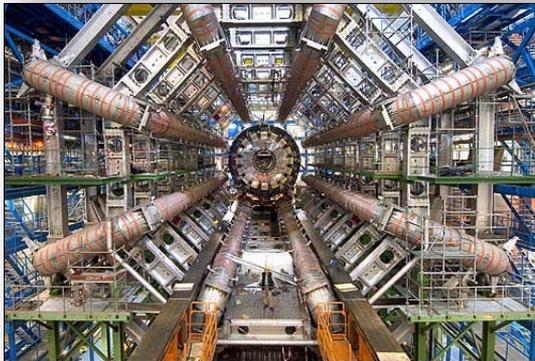


Solutions :

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

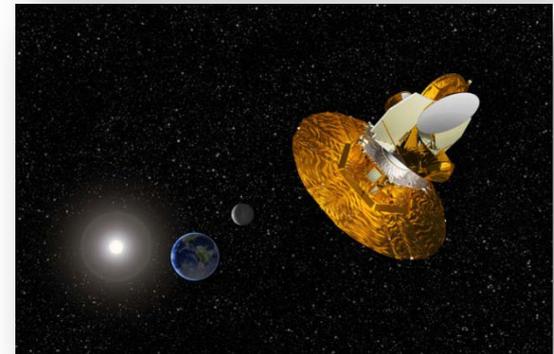
Reproduire les conditions initiales

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.



Oléron

A suivre ...

