

# **Ecole « techniques de base du détecteur » Cargèse**

**Pascal Vincent**  
**Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Energies**  
**Sorbonne Université**

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

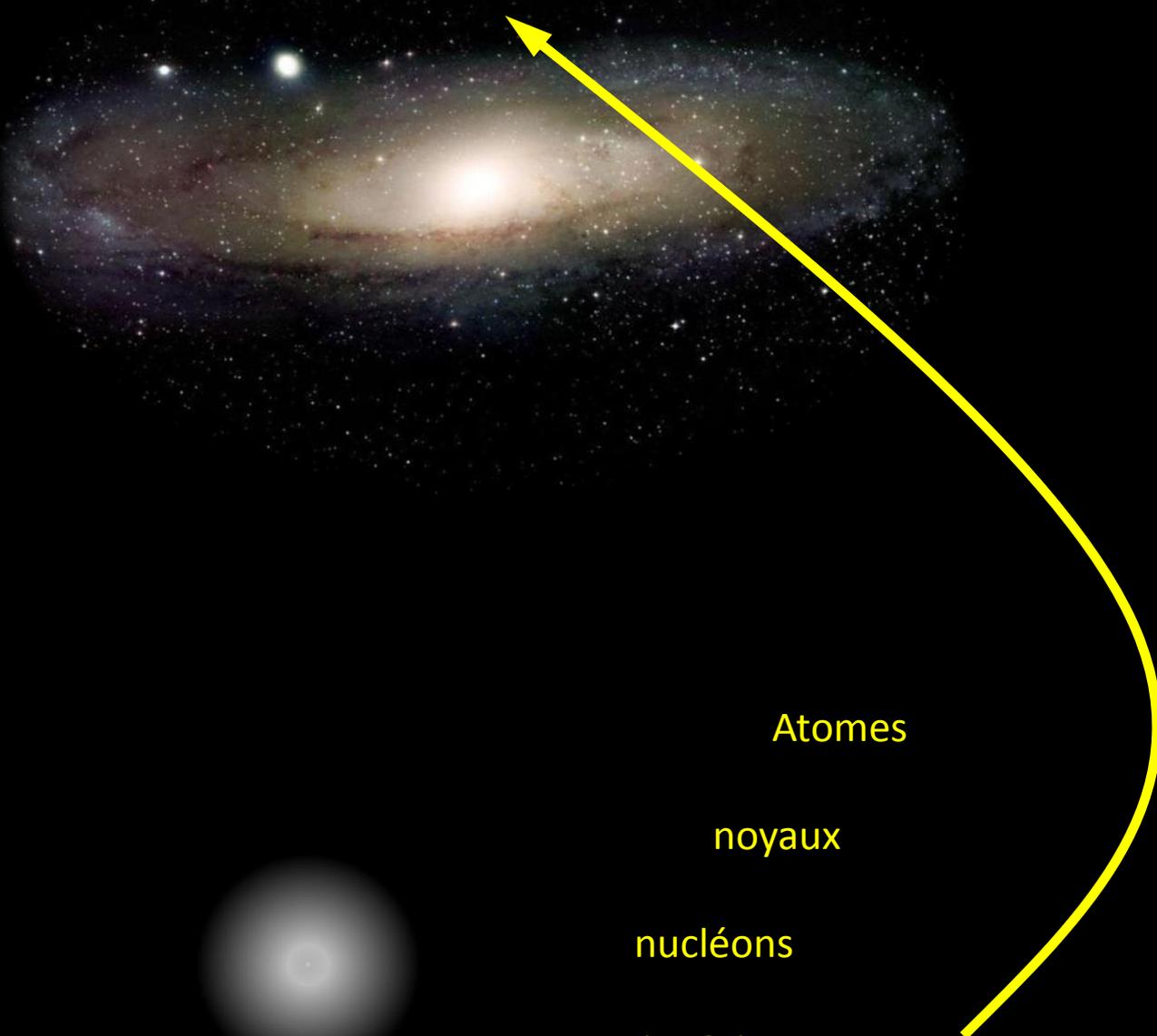
« De quoi parlons nous ? »

# PRÉFACE





Infiniment grand



Infiniment petit

Atomes

noyaux

nucléons

quarks & leptons

Infiniment grand

Infiniment complexe



La femme

L'homme

Animaux

Végétaux

Cellules

Molécules

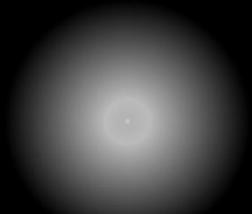
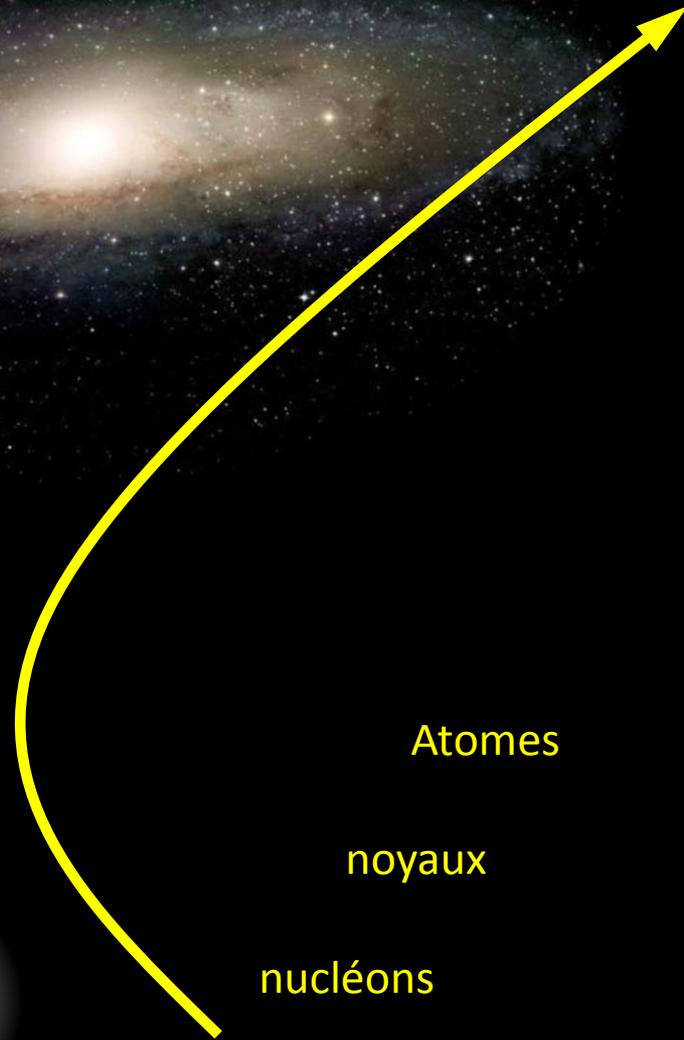
Atomes

noyaux

nucléons

quarks & leptons

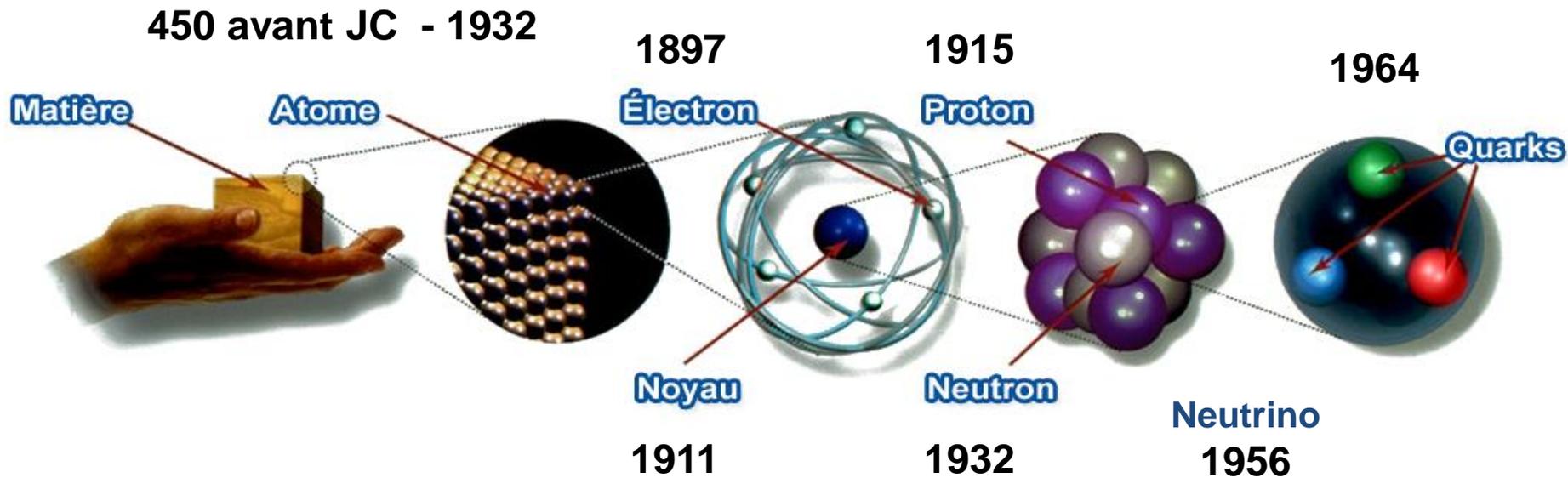
Infiniment petit



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

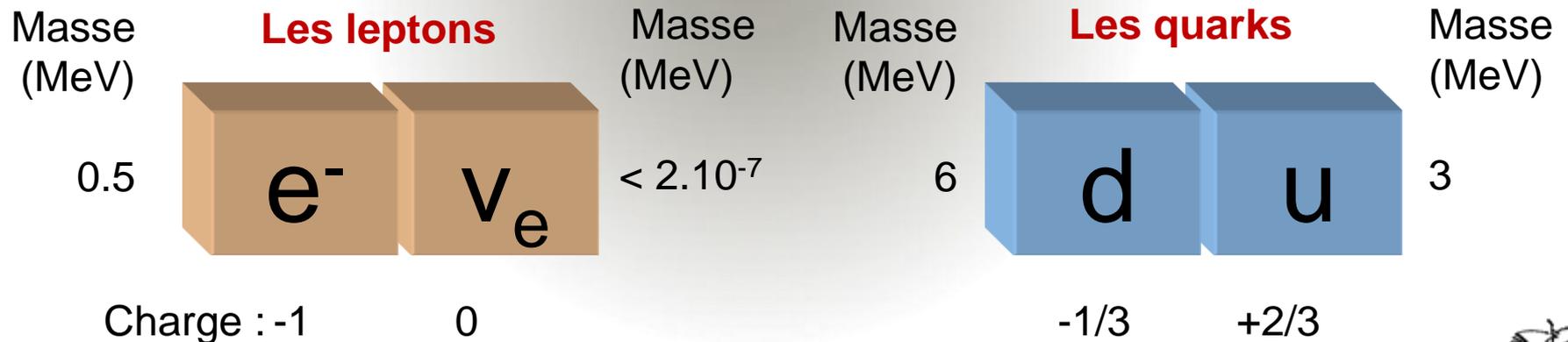


# Vers l'infiniment petit



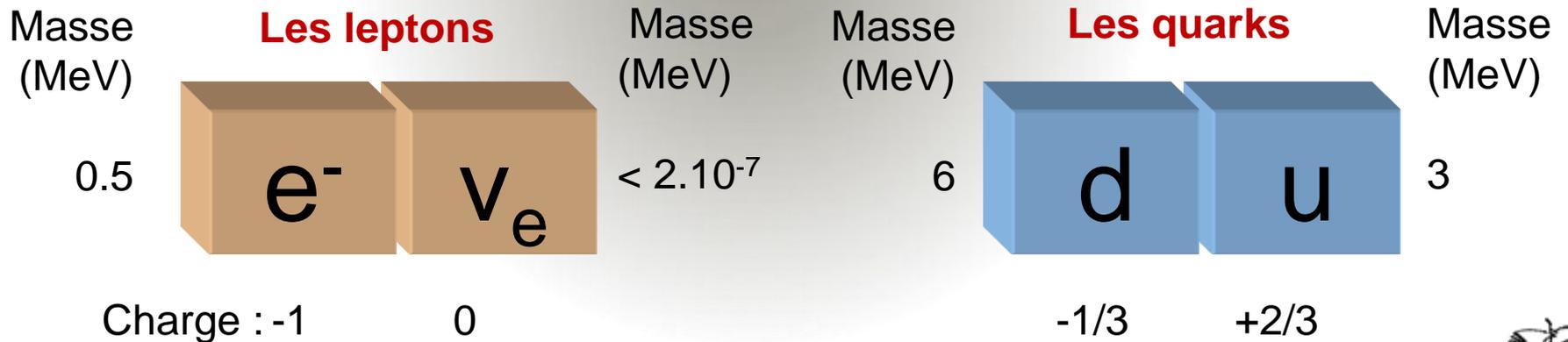
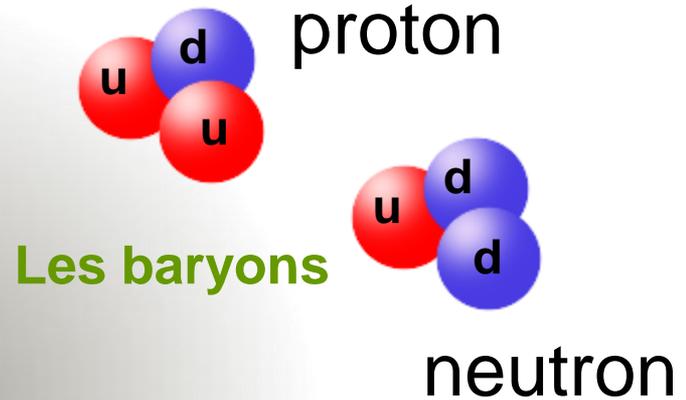
# Les particules « élémentaires »

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



# Les particules « élémentaires »

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



# Quelques ordres de grandeur

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.



# Encore des ordres de grandeur

**Les masses** en présence :

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

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

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

$$m_p = 0,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,167\,262\,1 \text{ g}$$

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

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

$$m_p \cong m_n$$

**Toute la masse est contenue dans 0,000 000 000 000 01 % de l'espace**



# Toujours des ordres de grandeur

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

Décélération du camion



≈ **154 000 000 Joules** ≈ 3 680 kcal

# Toujours des ordres de grandeur

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

Décélération du camion



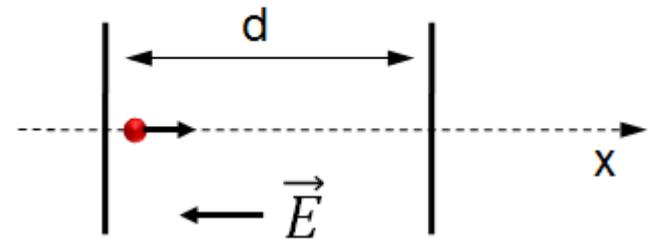
$\approx 154\,000\,000$  Joules  $\approx 3\,680$  kcal

Pascal Vincent

Accélération d'un électron  
par 1kV de tension

$V = 0$  Volts

$V = +1$  kVolts



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



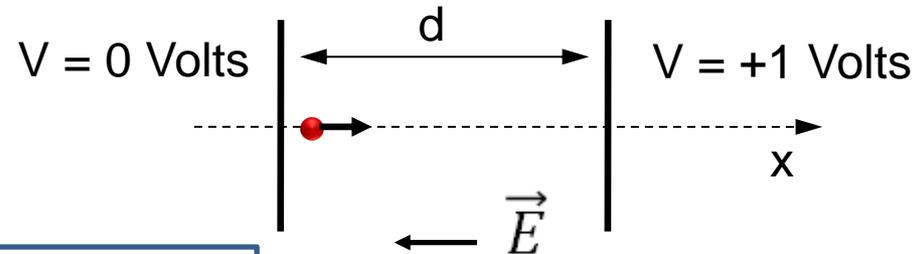
Cargèse

13

# 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).



# La masse : eV/c<sup>2</sup>

$$E = mc^2$$



Nécessité d'introduire une nouvelle unité :

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

$$m_p = 928 \quad \text{MeV}/c^2$$

$$m_n = 939 \quad \text{MeV}/c^2$$

$$m_e = 0,511 \quad \text{MeV}/c^2$$



# Des grandeurs pas si petites

La « densité matière nucléaire » :

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{\textit{Masse du nucléon}}{\textit{"Volume nucléaire"}} \\ &= \frac{m_N}{\frac{4\pi}{3} r_{\textit{nuclaire}}^3} \sim 4 \cdot 10^{17} \textit{kg} \cdot \textit{m}^{-3}\end{aligned}$$

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

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



# Quelques ordres de grandeur

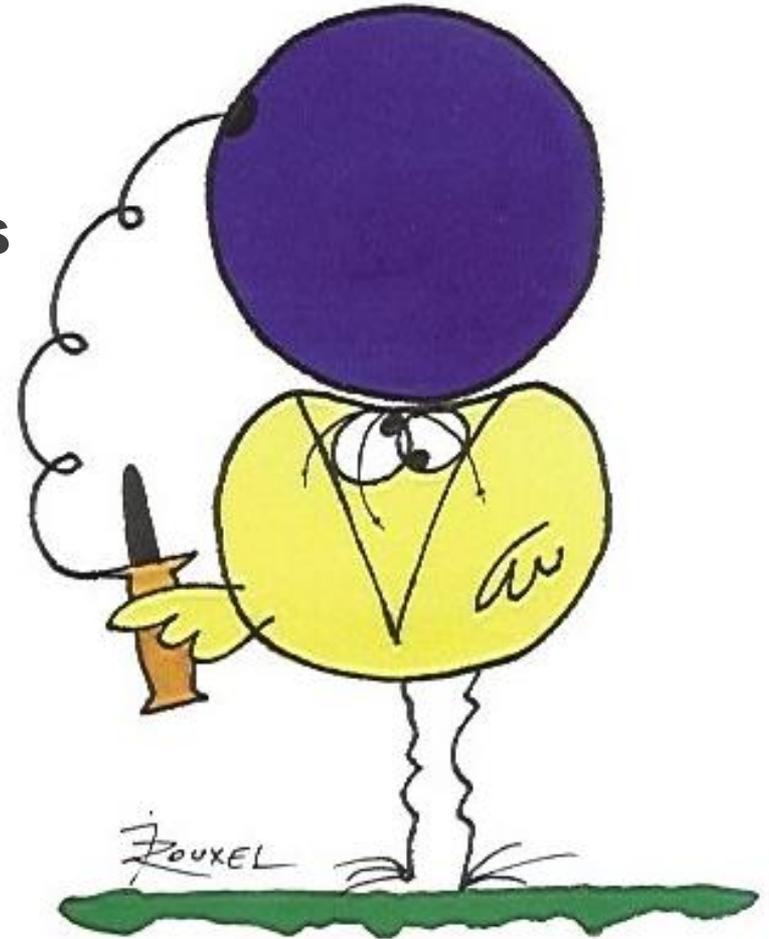
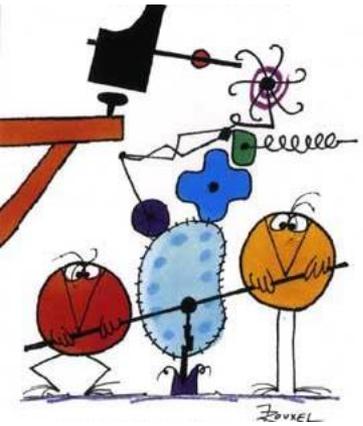
## Densité d'énergie :

	Densité d'énergie (J/tonne)
TNT	4 184 000 000
Carburant	41 868 000 000
Uranium 235	81 000 000 000 000
Deutérium + Tritium	364 500 000 000 000
Nucléon de 1 GeV/c <sup>2</sup>	166 000 000 000 000 000 000 000



# 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 ...



créer de nouvelles particules étranges

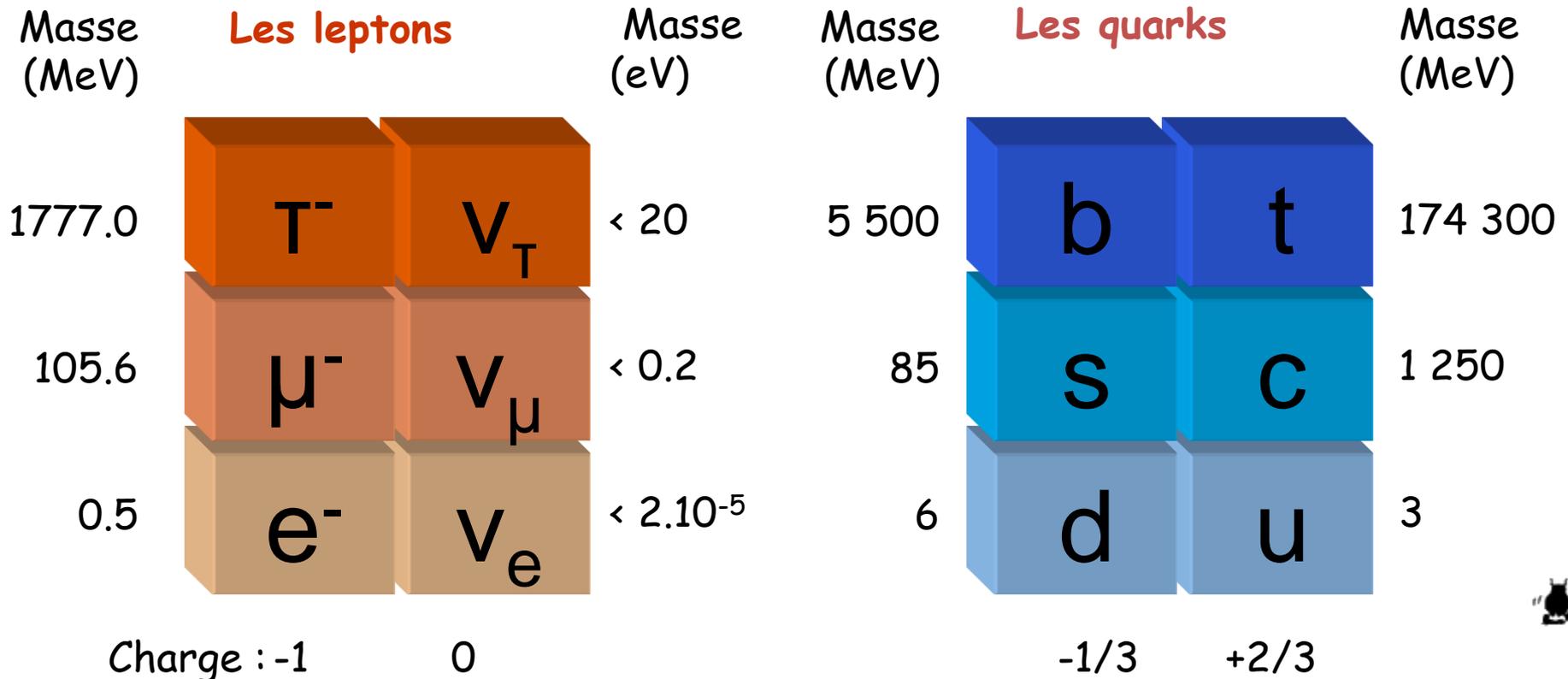
$$E = mc^2$$



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

# Les particules « élémentaires »

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

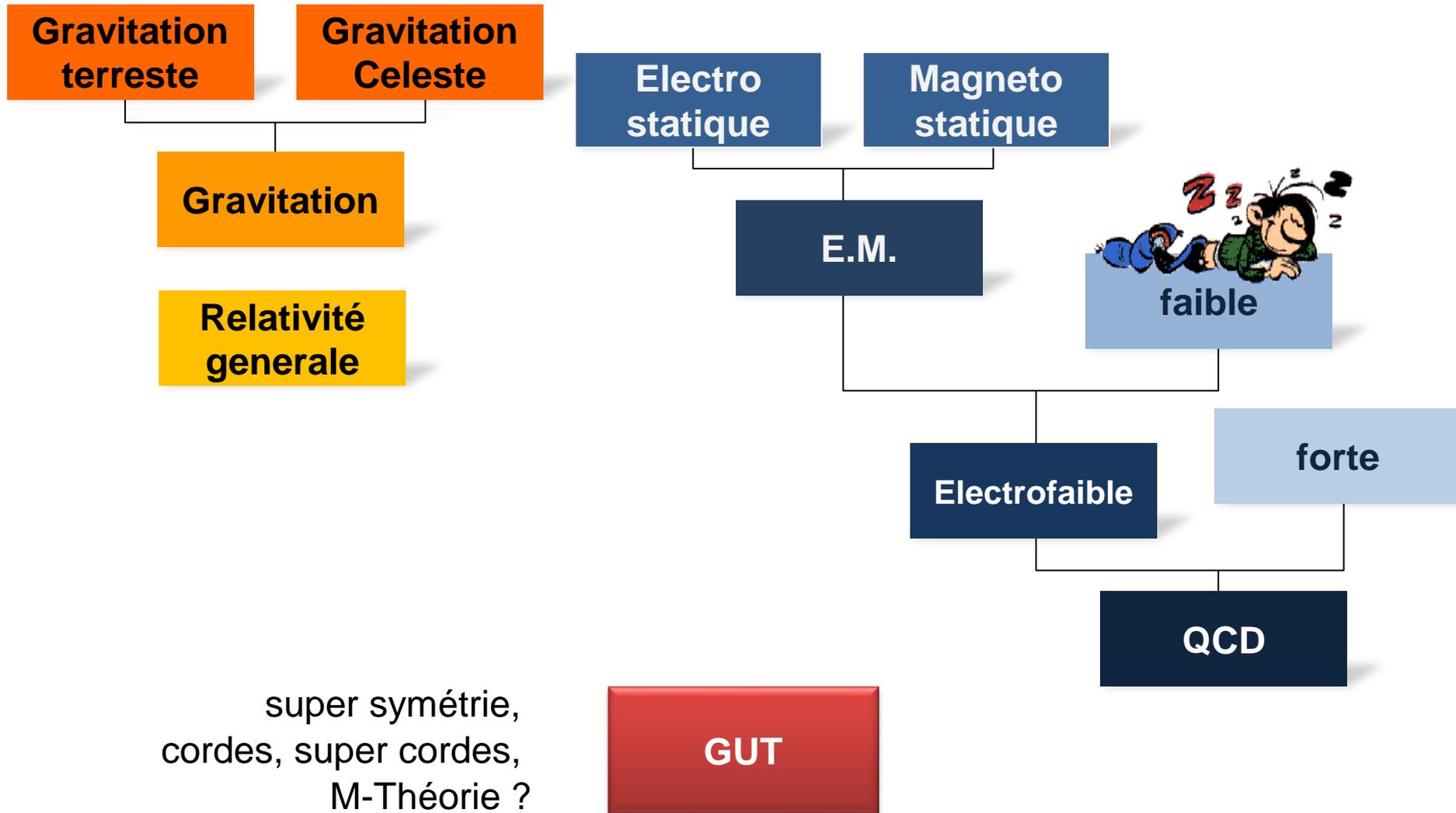


(6 leptons + 6 quarks  $\times$  3 couleurs)  $\times$  2 spins + Antimatière = 96 états

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



# Le monde des interactions



# Le monde des interactions

Type	Portée	Intensité	Quanta	Charge	domaine
<b>Forte</b>	fm	1			
<b>E.M.</b>	Très grande	~ 1/1 000			
<b>Faible</b>	1/100 fm	~ 1/100 000			
<b>Gravitation</b>	Très grande	1/100 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000			

# Le monde des interactions

Type	Portée	Intensité	Quanta	Charge	domaine
<b>Forte</b>	fm	1	8 gluons		
<b>E.M.</b>	Très grande	~ 1/1 000	photon		
<b>Faible</b>	1/100 fm	~ 1/100 000	$Z^0, W^\pm$		
<b>Gravitation</b>	Très grande	1/100 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000	graviton		

# Le monde des interactions

Type	Portée	Intensité	Quanta	Charge	domaine
<b>Forte</b>	fm	1	8 gluons	Couleur	Nucléaire
<b>E.M.</b>	Très grande	~ 1/1 000	photon	électrique	Nucléaire, atomique et moléculaire
<b>Faible</b>	1/100 fm	~ 1/100 000	$Z^0, W^\pm$	savoir	Nucléaire
<b>Gravitation</b>	Très grande	1/100 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000	graviton	Masse ou énergie	Espace temps

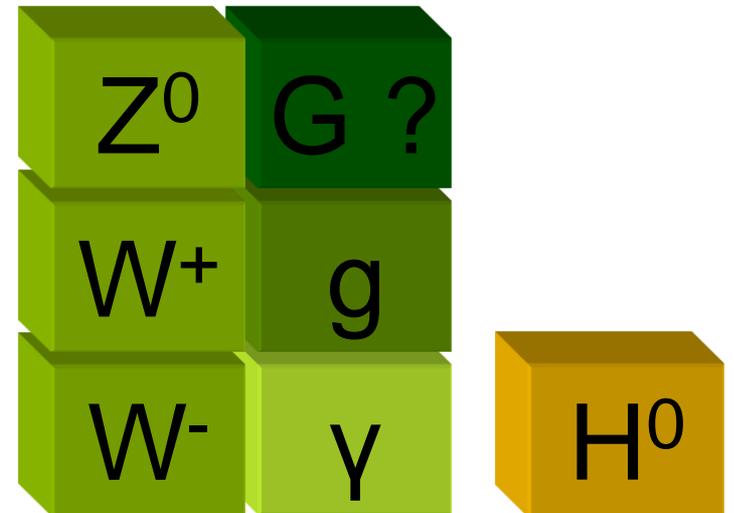
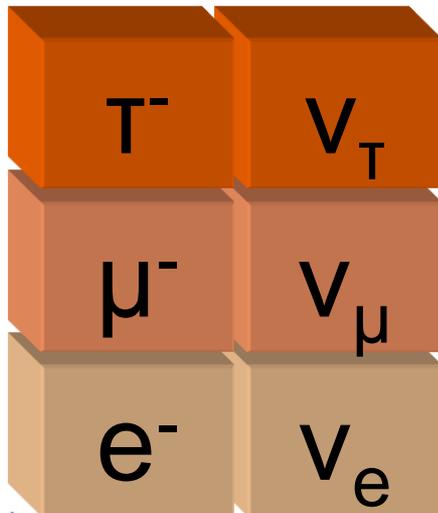
# Les particules « élémentaires »

Les fermions

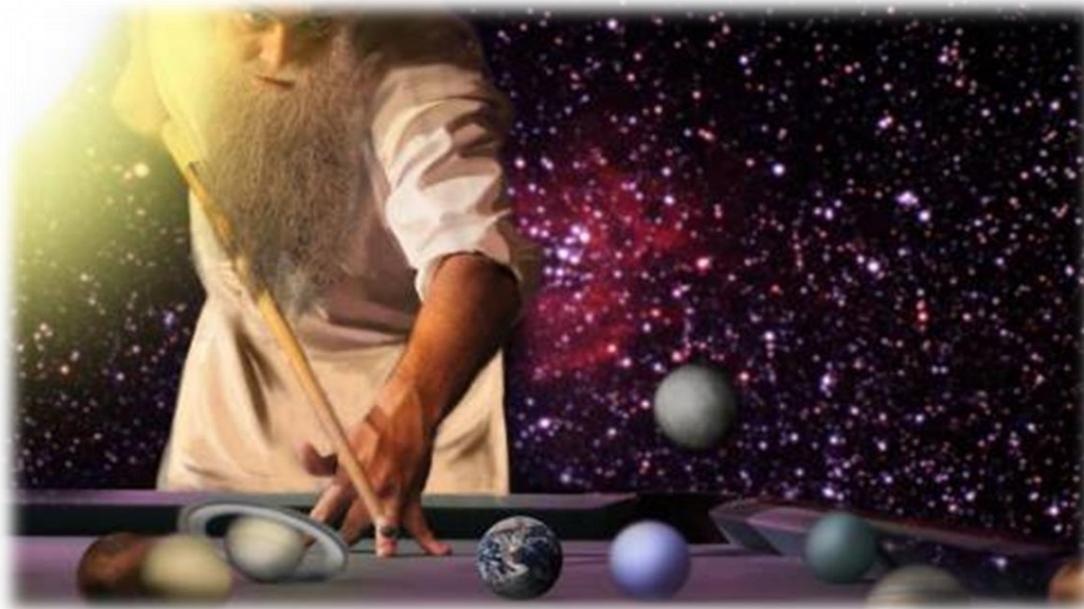
Les bosons

Les leptons

Les quarks



# Une vision de l'Univers



# Infiniment grand

Univers

Super-amas

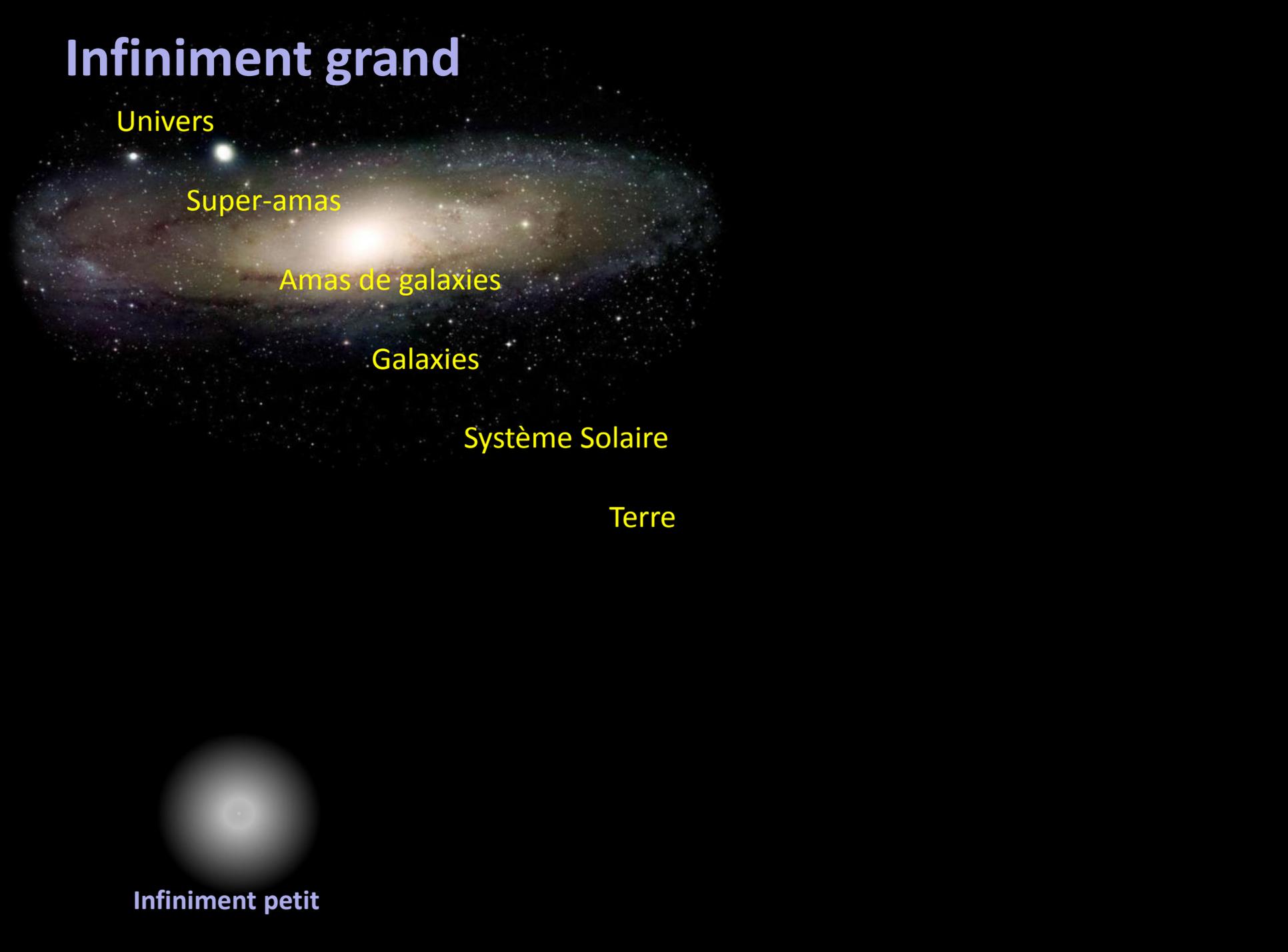
Amas de galaxies

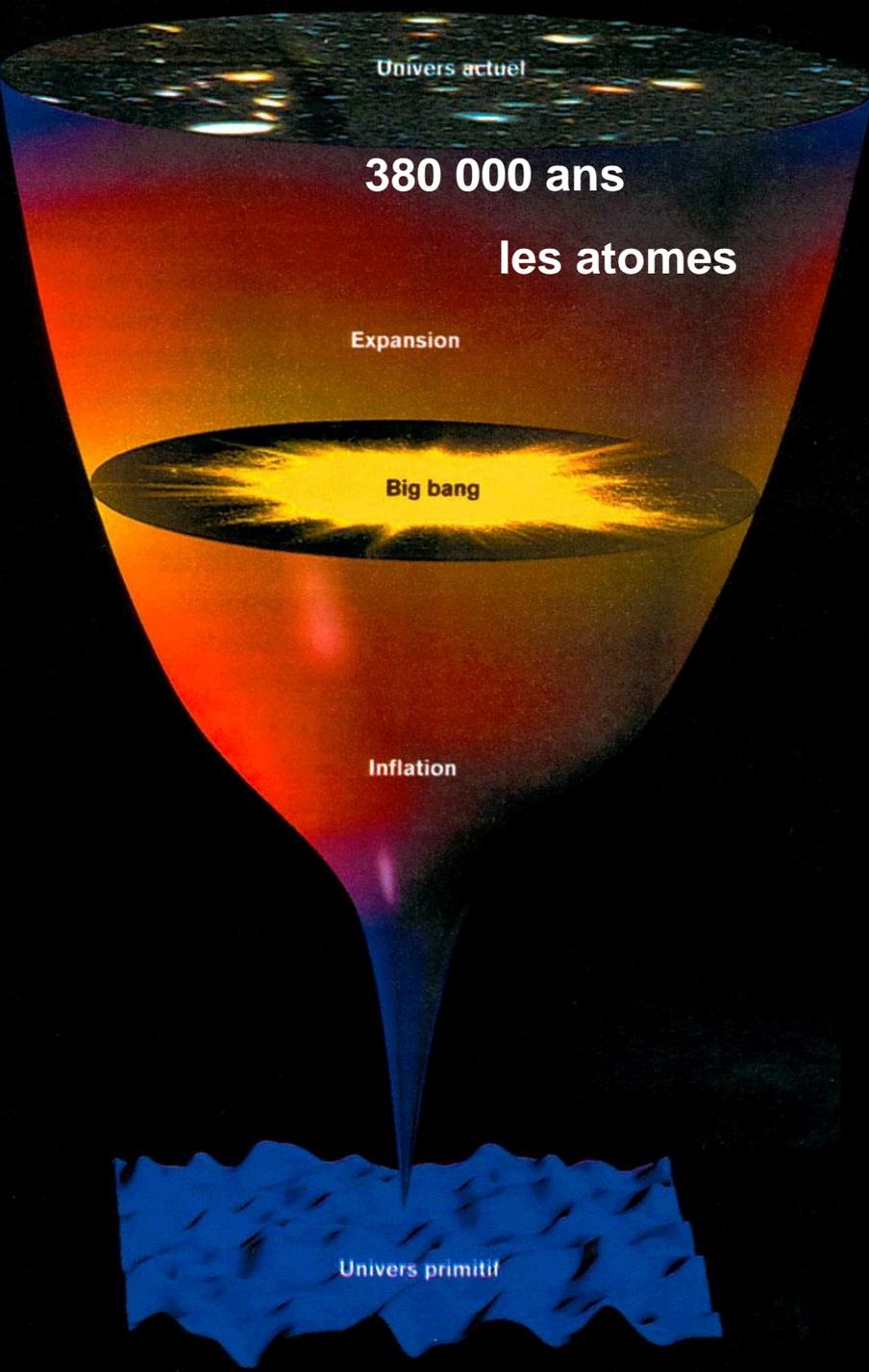
Galaxies

Système Solaire

Terre

Infiniment petit





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/cm<sup>3</sup> ?



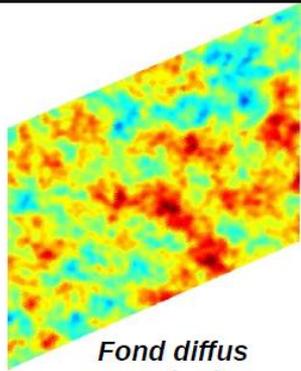
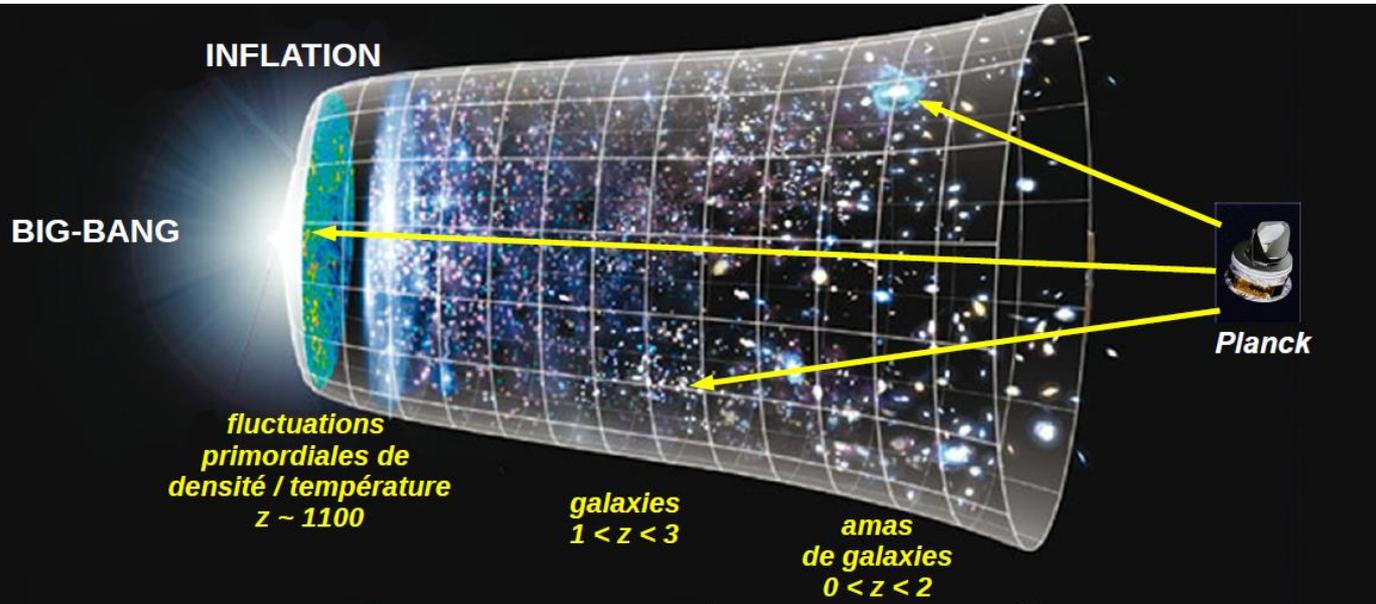
# L'Univers actuel

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

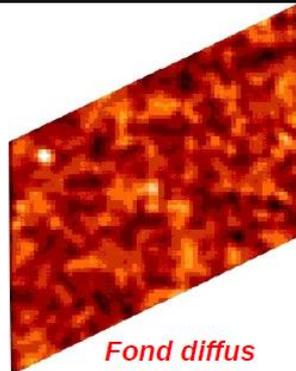
$$ds^2 = c^2 dt^2 - a(t)^2 \left( \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\Omega^2 \right)$$



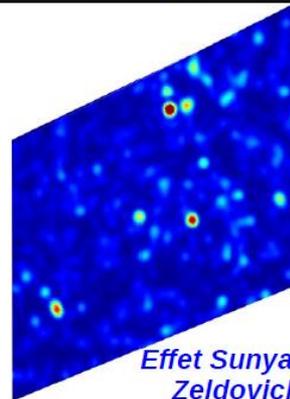
# L'Univers actuel



Fond diffus cosmologique  
CMB

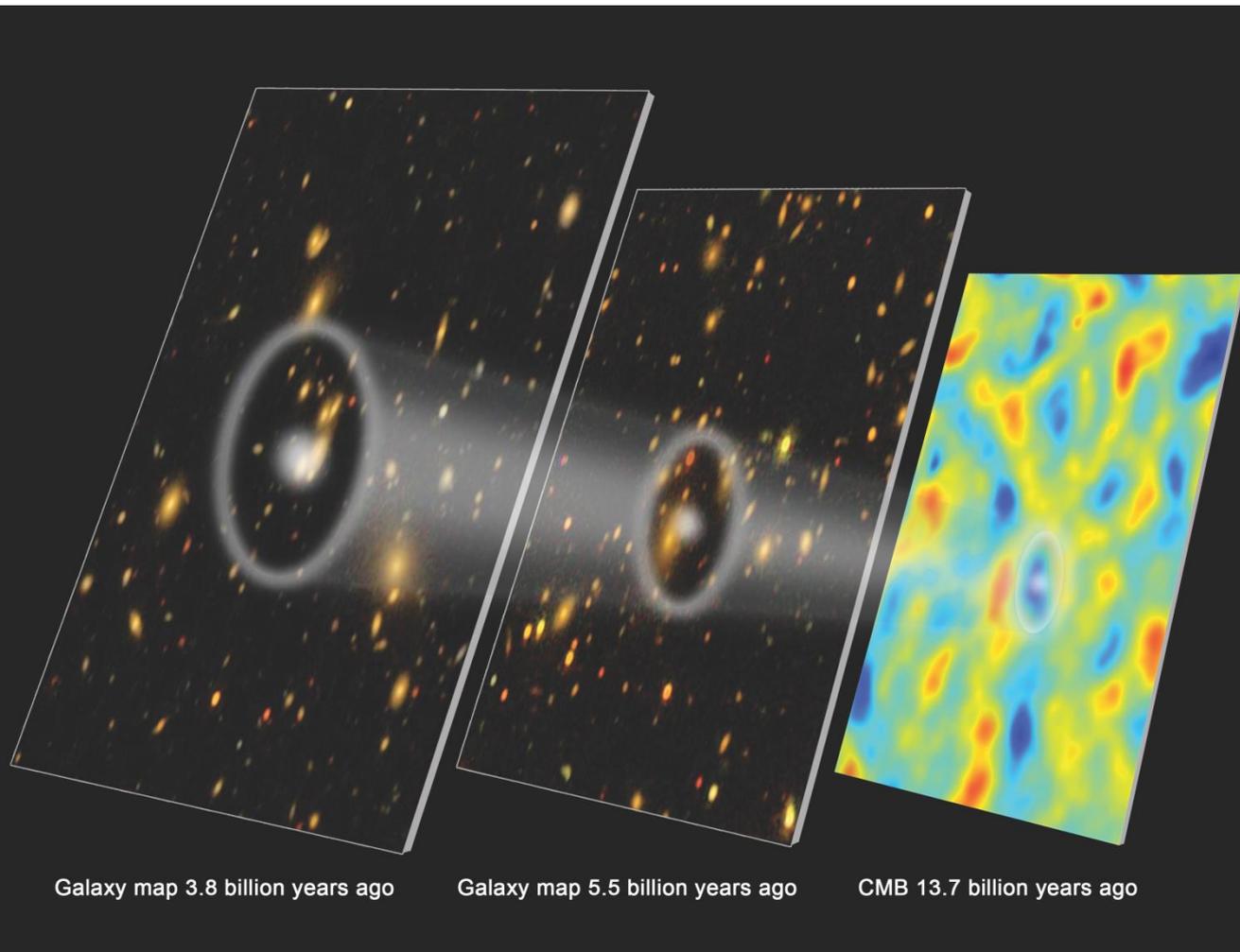


Fond diffus infrarouge  
CIB

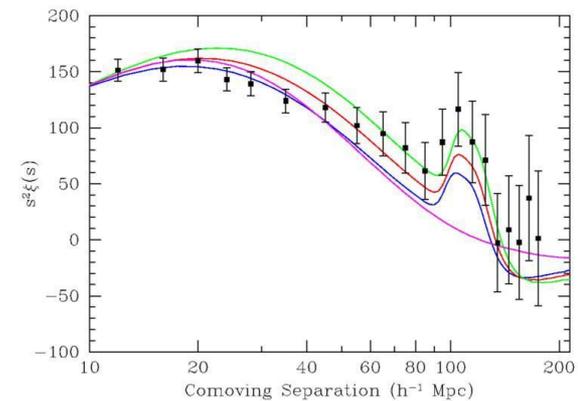


Effet Sunyaev-Zeldovich  
SZ

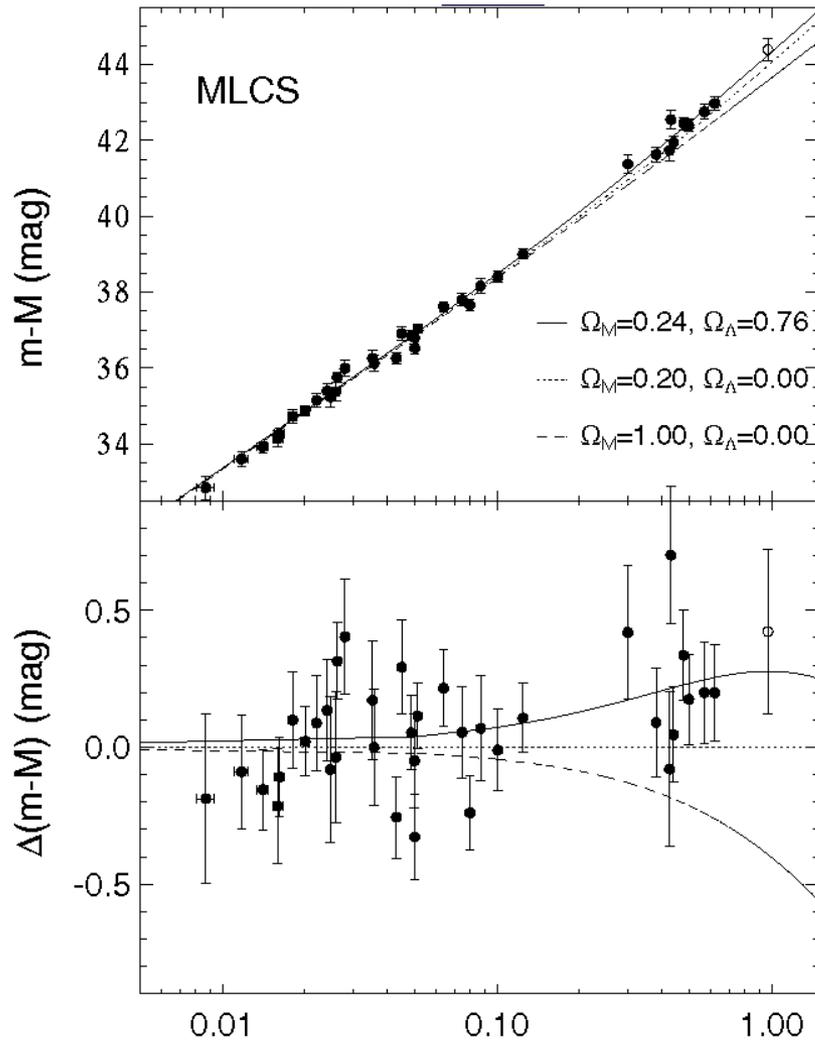
# L'Univers actuel



**BAO**



# L'Univers actuel



**SN1a**



# L'Univers actuel

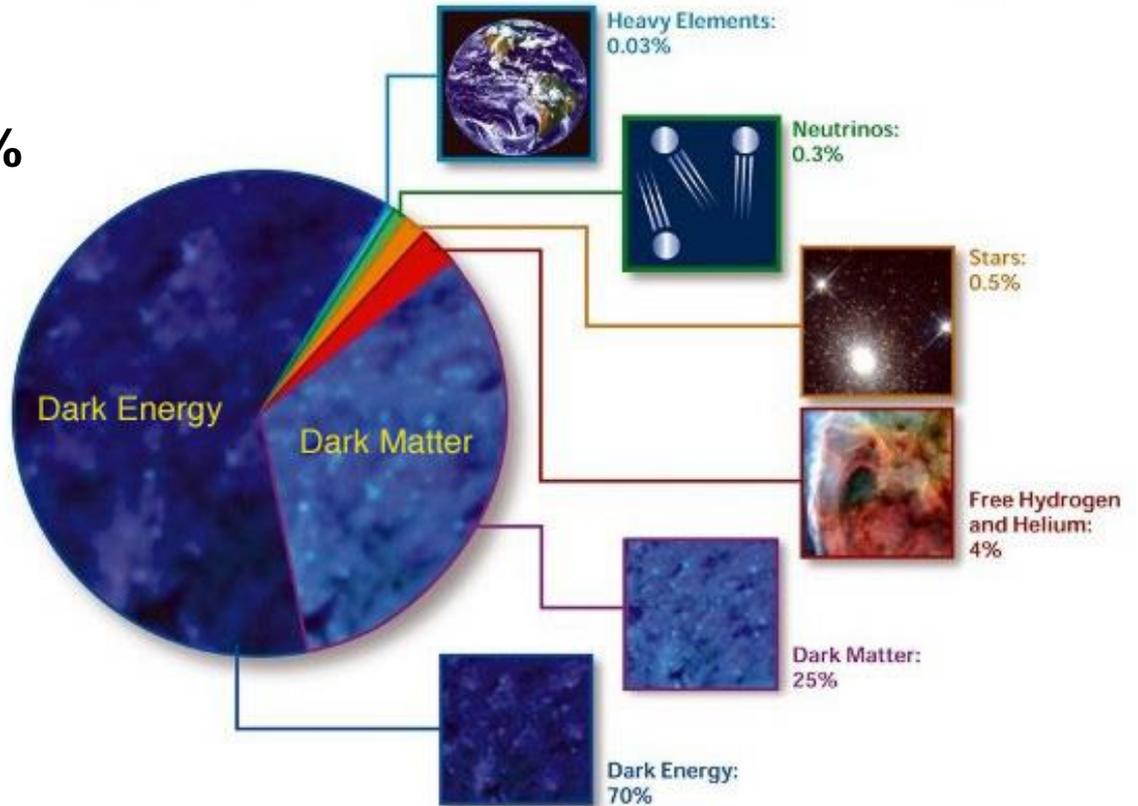
- ❖ Plat
- ❖ Homogène et isotrope
- ❖ Décrit par la métrique de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker
- ❖ **En expansion accélérée**

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



# Notre compréhension de l'Univers

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



Seulement **~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 ?

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) ?

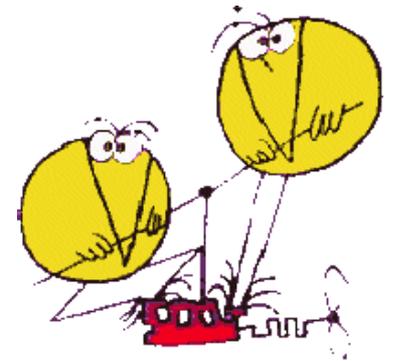
L'énergie noire

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



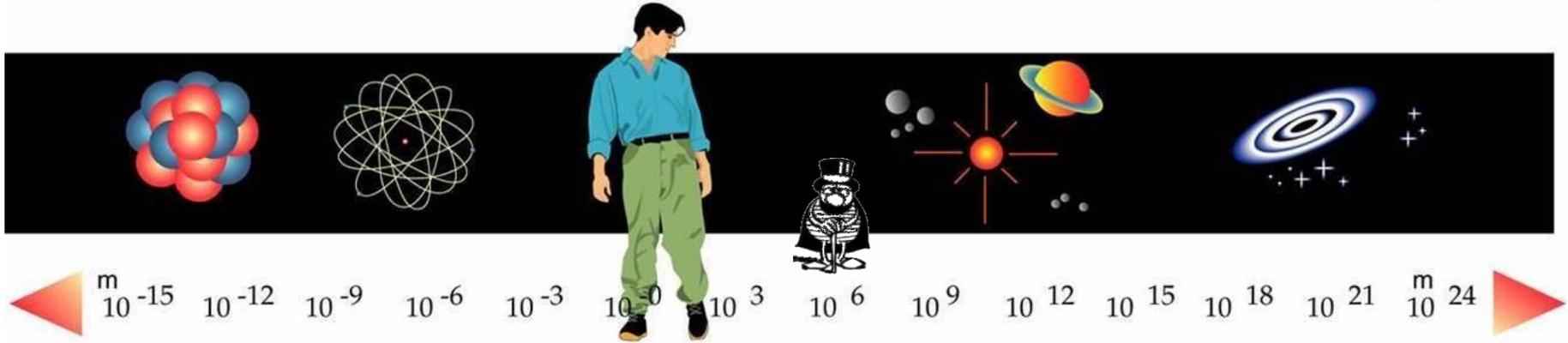
Comment répondre a ces questions ?

# 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.

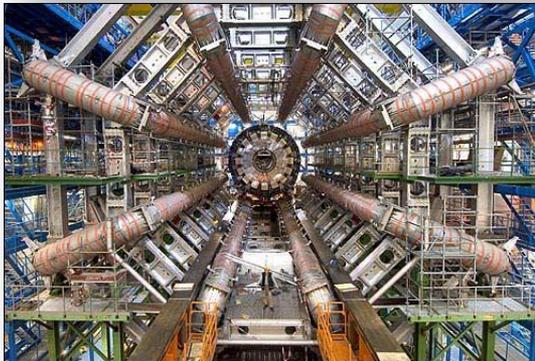


## Solutions :

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

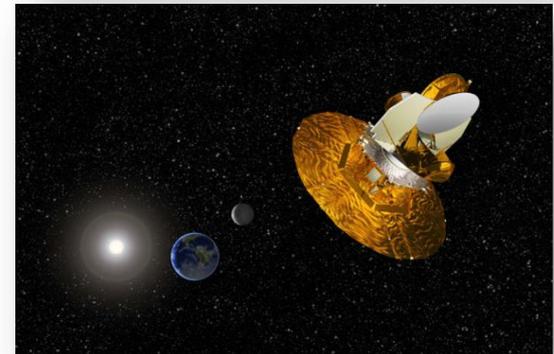
# Reproduire les conditions initiales

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.



Cargèse