

# Le *Big-Bang* et les constituants élémentaires de la matière

- ✿ L' Hypothèse du *Big-Bang*
- ✿ Les acteurs
- ✿ La chronologie
- ✿ Peut-on remonter jusqu'au *Big-Bang* ?

# ✿ L' Hypothèse du *Big-Bang*

## o L'espace-temps :

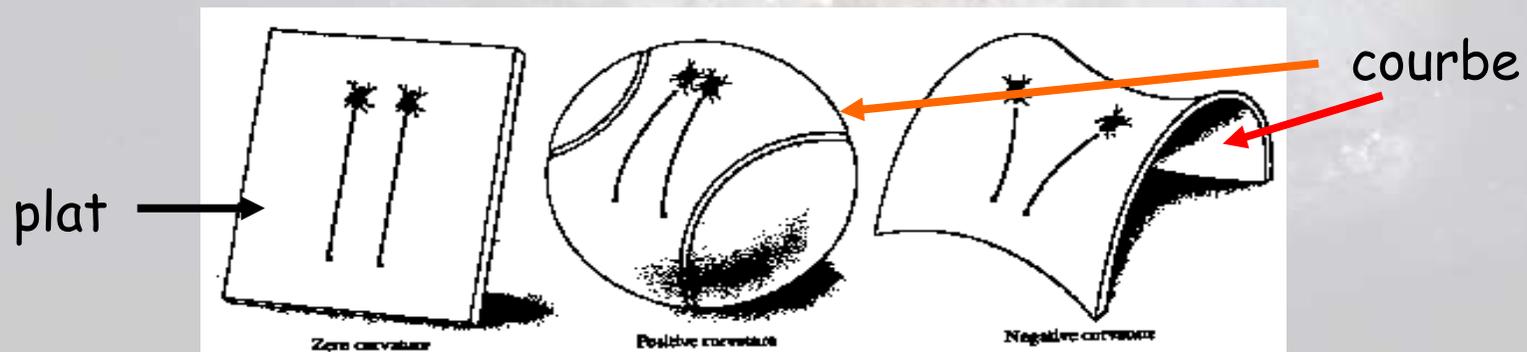
\* Nous vivons dans un espace à 4 dimensions

3 dimensions d'espace (longueur, largeur, hauteur)  
1 dimension de temps

\* Le cadre théorique pour décrire cet espace-temps est la Relativité (Générale) d'Einstein

L'espace et le temps sont intimement liés :

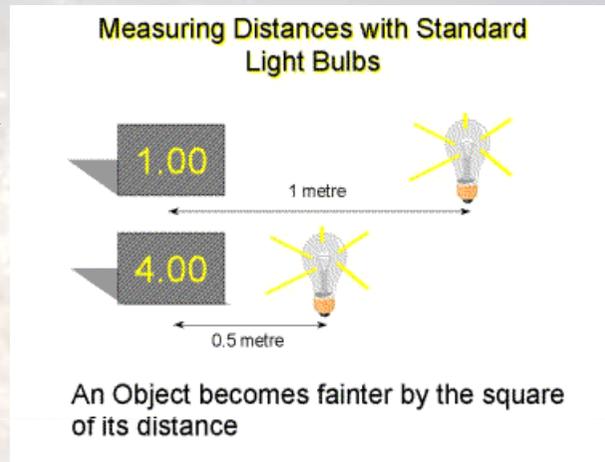
→ L'espace n'est pas figé, il peut avoir une **évolution temporelle**  
n'est pas nécessairement plat



## o L'expansion de l'Univers

- \* **La loi de Hubble** : ~ 1930, Hubble observe les galaxies lointaines  
→ mesure leur distance à la Terre

plus un objet est lointain,  
moins il est lumineux



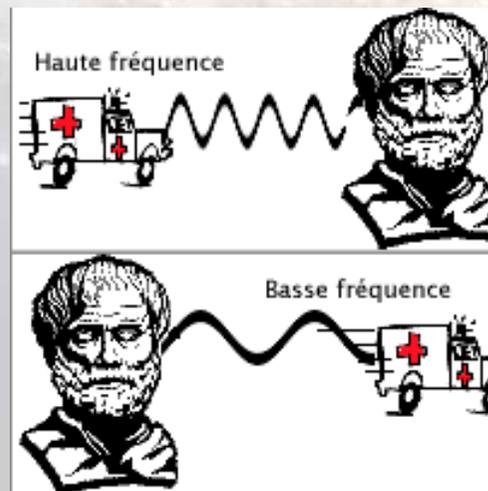
⇒ pour un objet dont on connaît la puissance (Céphéides pour Hubble)

**luminosité ⇒ distance**

→ mesure leur vitesse par rapport à la Terre

mesure de la longueur d'onde de la lumière émise par ces objets lointains

⇒ le plus souvent  
**décalée vers le rouge**  
**« redshift »**

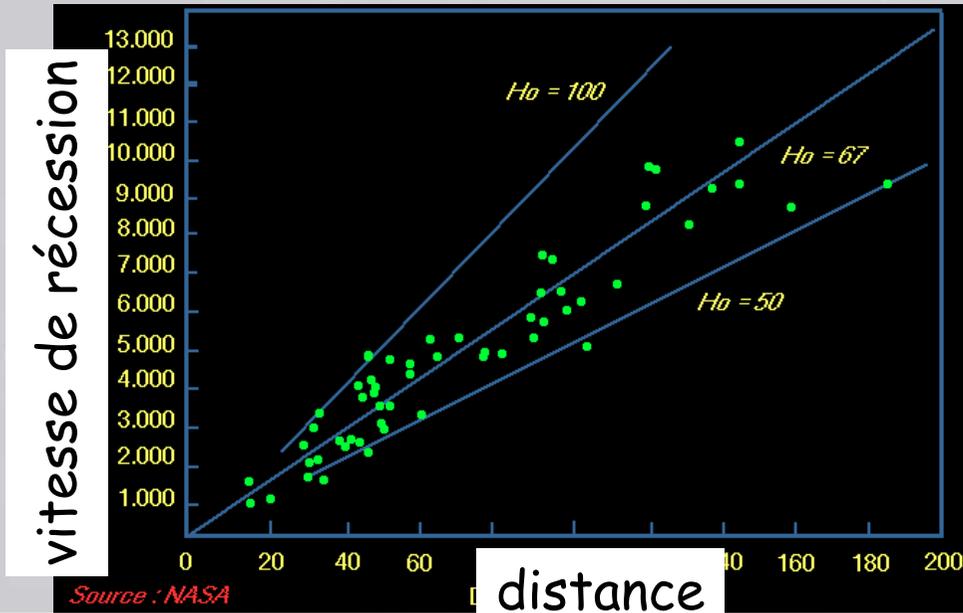


**C'est un Effet Doppler**

→ Les galaxies lointaines s'éloignent de nous  
→ d'autant plus rapidement qu'elles sont loin

$$v = H_0 d$$

Un diagramme de Hubble :



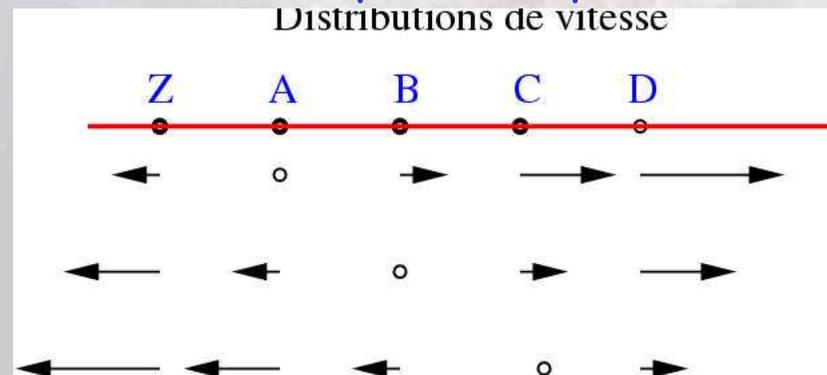
La constante de proportionnalité est la **Constante de Hubble**

Son inverse donne une estimation de l' **Age de l'Univers**

\* **Le principe cosmologique :**

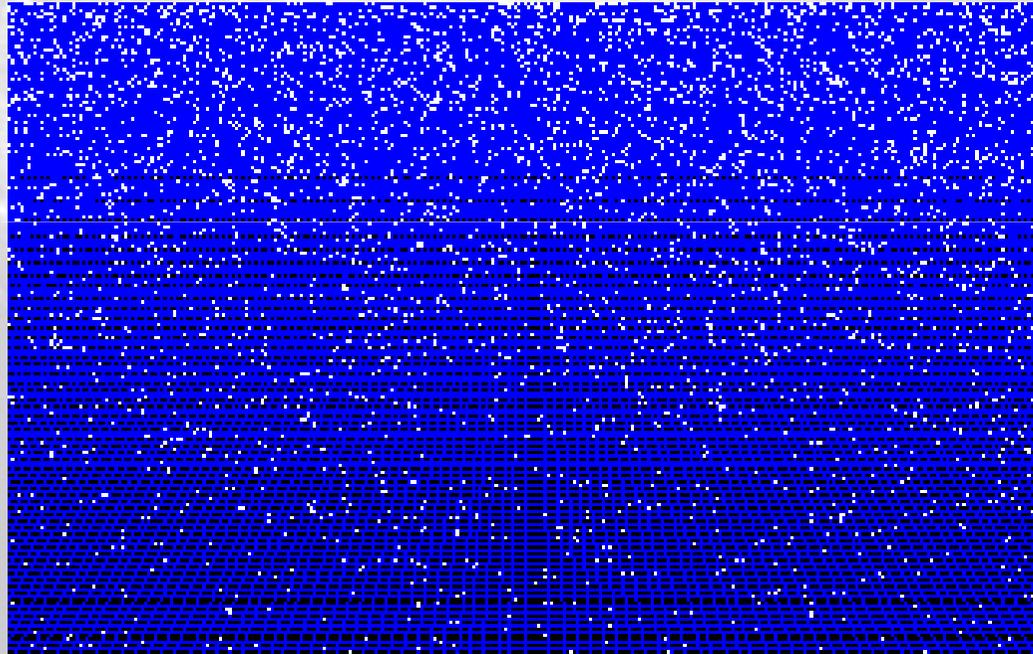
intuitivement l'univers doit apparaître identique à tout observateur, quelque soit la direction vers laquelle il regarde : Homogénéité et isotropie

La loi de Hubble est alors la seule possible pour un univers en expansion



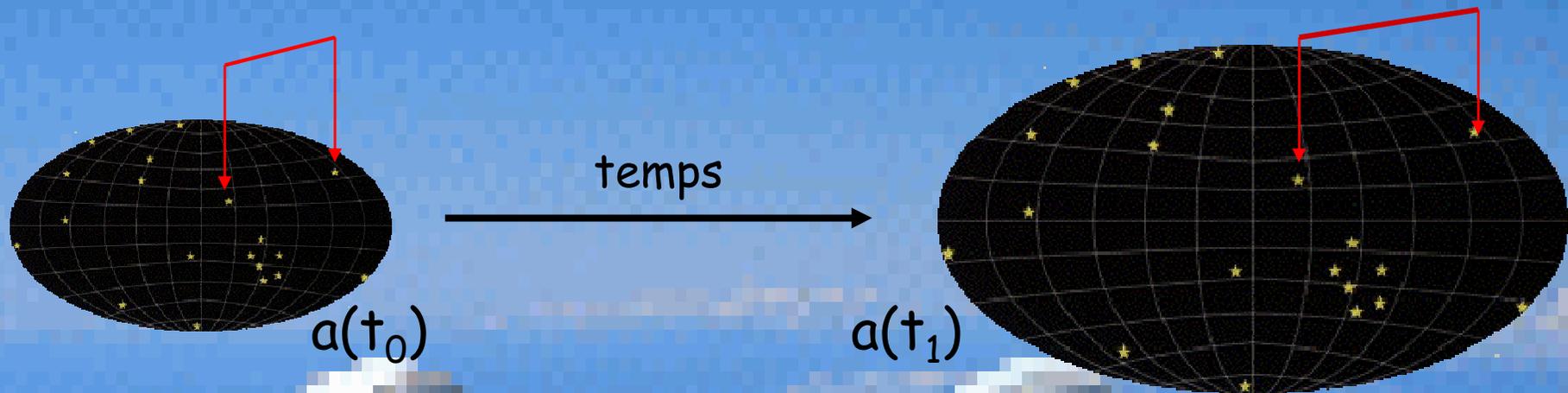
\* Plus une galaxie est loin, plus elle nous apparaît dans le passé  
car sa lumière prend du temps pour nous parvenir  
(On voit le Soleil maintenant tel qu'il était il y a 8 minutes)

Les galaxies semblent s'éloigner de nous,  
car depuis qu'elles ont émis leur lumière, **l'univers a gonflé !**



C'est **l'expansion** de l'Univers

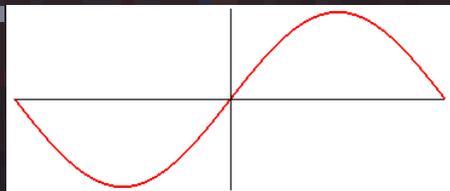
# Notre Univers est en expansion



La distance entre 2 points immobiles augmente avec le temps :  
⇒ Vitesse apparente des galaxies (loi de Hubble)  
⇒ Toute les échelles spatio-temporelles ont été dilatées

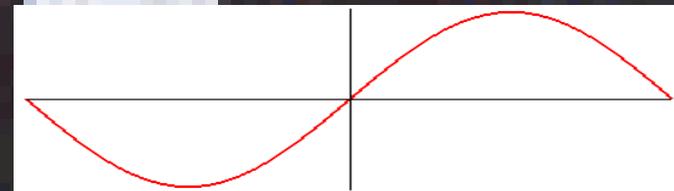
## La lumière rougit

Longueur d'onde (bleue)



temps  
*Redshift (z)*

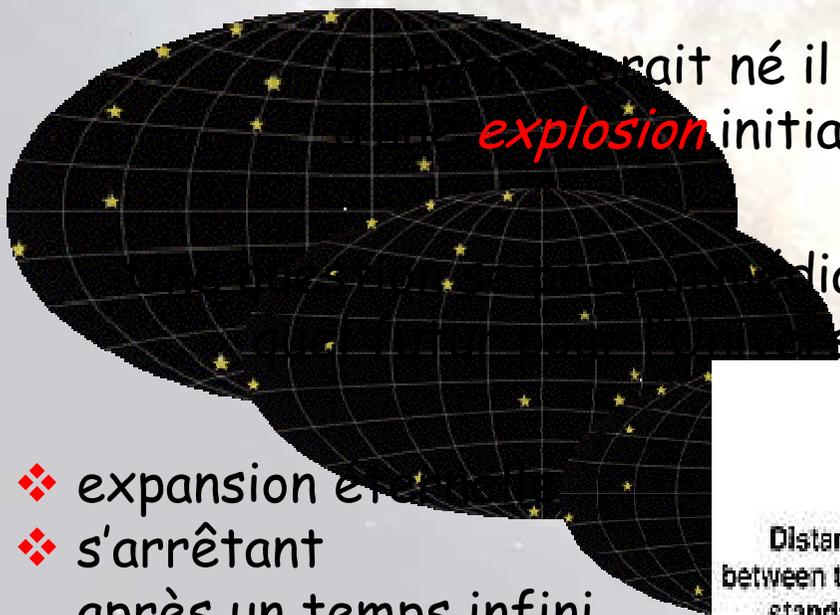
Longueur d'onde (rouge)



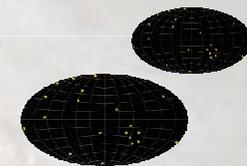
## o Le Big-Bang

Si l'univers est en expansion, en remontant le temps 2 points quelconques doivent se rapprocher de plus en plus...

Aujourd'hui → 15 milliards d'années Passé

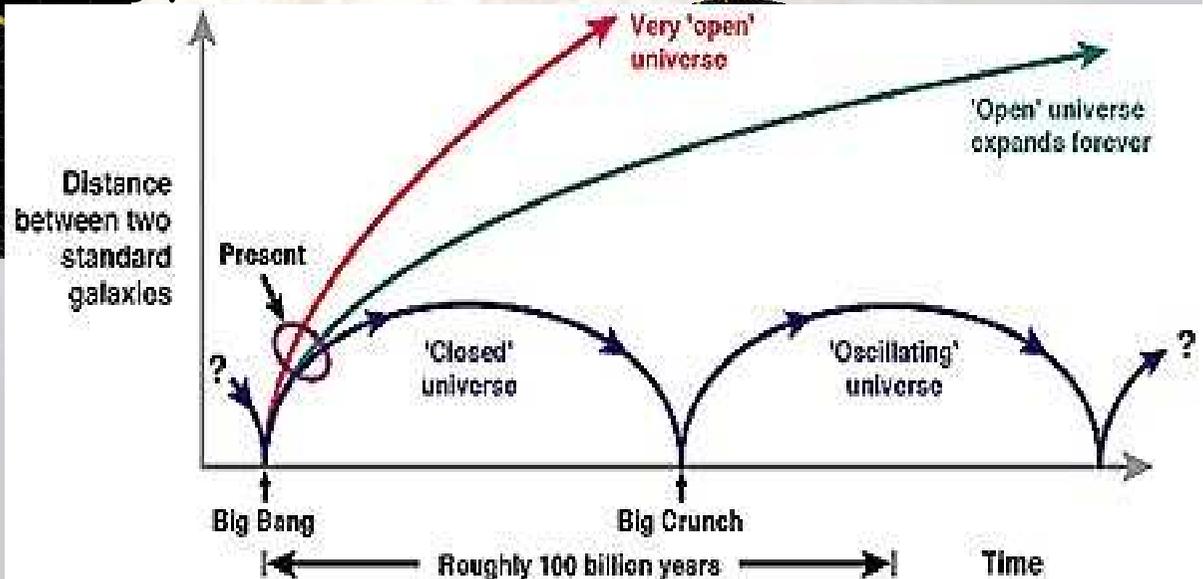


Il paraît né il y a ~ 15 milliards d'années  
*explosion* initiale, le *Big-Bang*



- ❖ expansion éternelle
- ❖ s'arrêtant après un temps infini
- ❖ inversée : fin de l'univers dans un *Big Crunch*

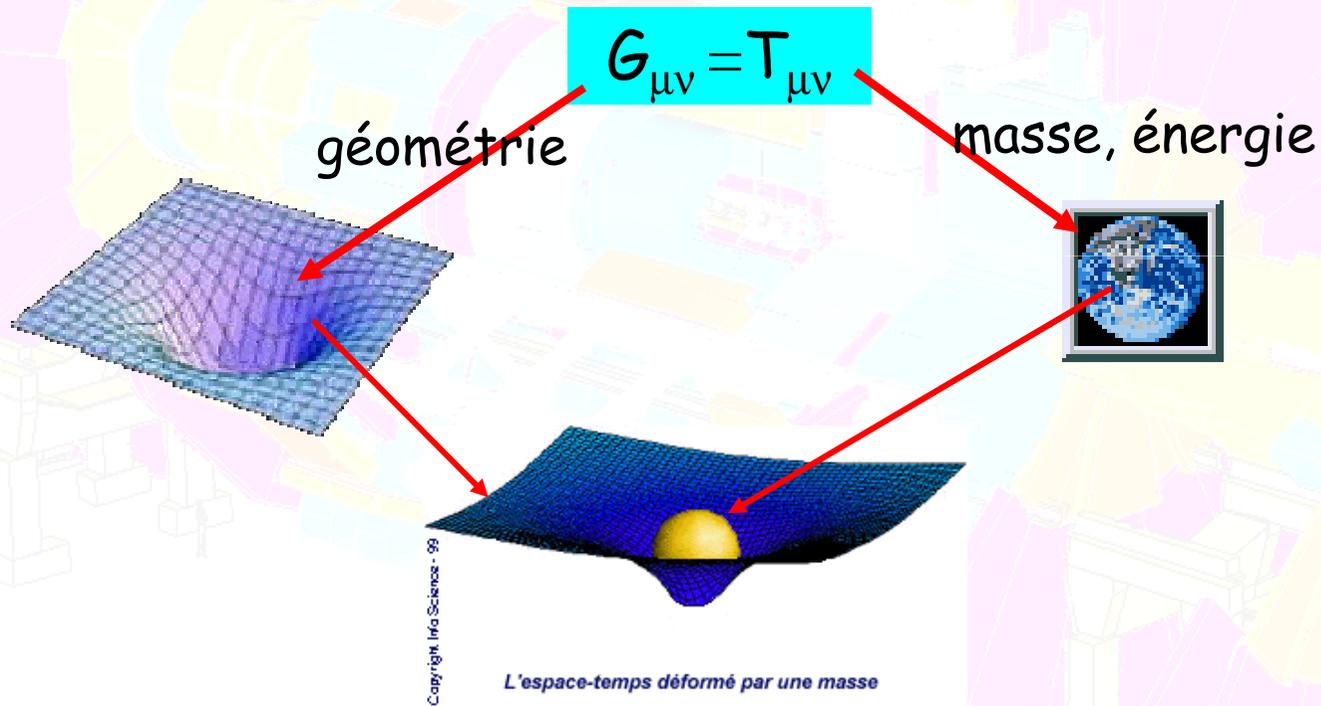
Immédiatement :  
 ... ?



## ✿ Les acteurs

### o L'espace-temps :

La géométrie de l'Univers et son évolution temporelle sont déterminées par son contenu



⇒ Pour mieux comprendre les premiers instants de l'Univers, il faut comprendre ce qu'il contient

# o Les constituants élémentaires de la matière et leurs interactions

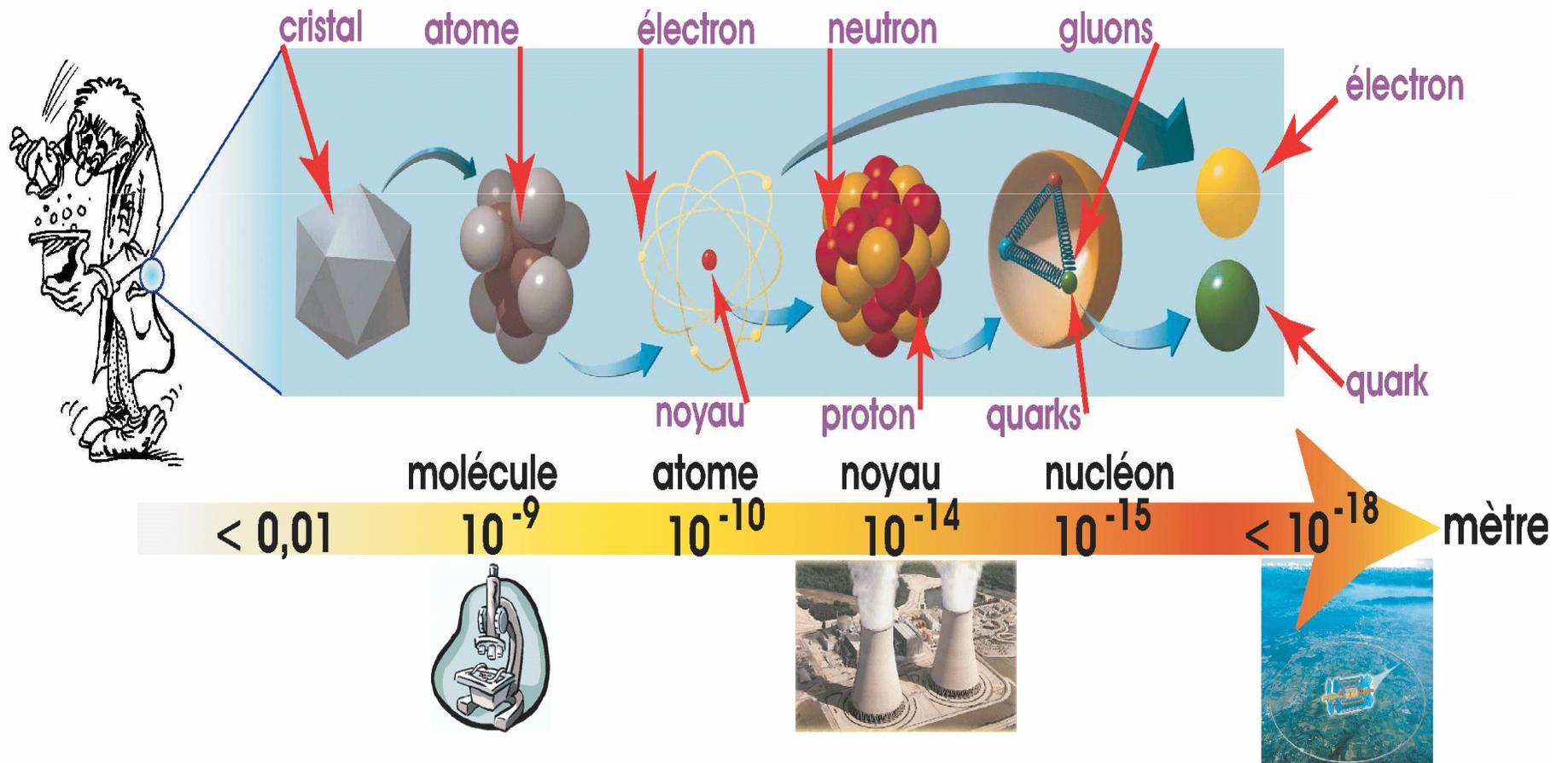
## Les sous-structures

Liquides, solides  
matière condensée

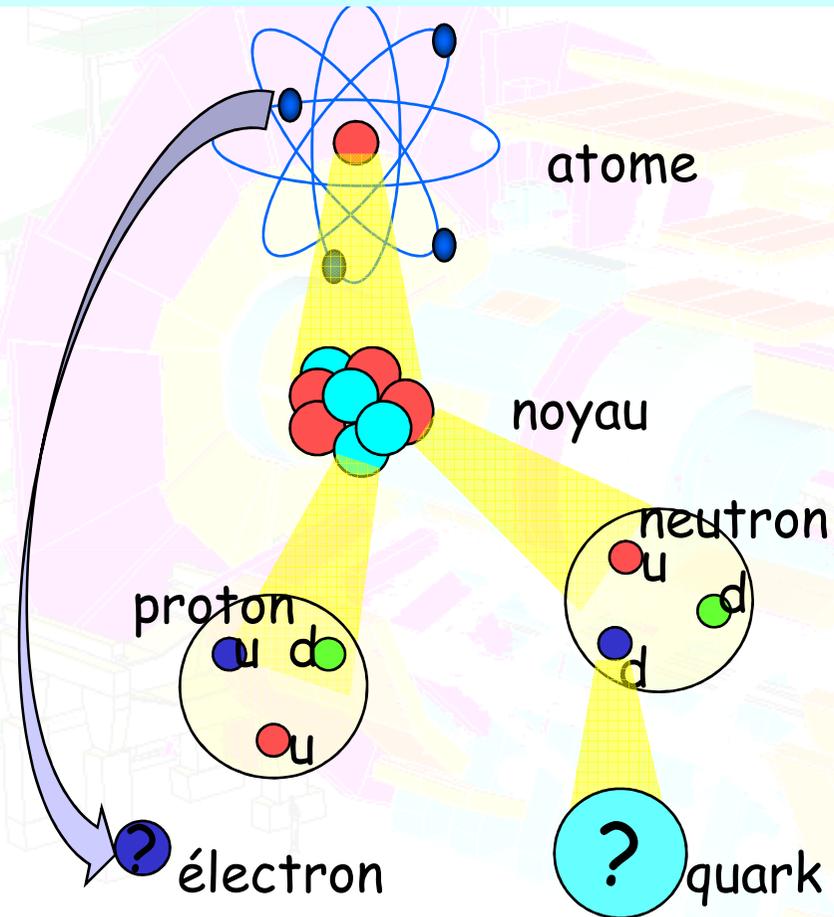
atomique

nucléaire

particules



## De l'atome aux quarks et électrons



## Les distances

1 Å : Angström  
0.0000000001 m

L'atome est  
essentiellement vide !!!

1 fermi :  
0.00001 Å

< 0.001 fermi

À la naissance de l'Univers, la température est très élevée :  
seuls les **constituants élémentaires** sont présents  
Quarks, électron et ...

# \* 3 familles de particules de matière ("fermions") et leurs antiparticules

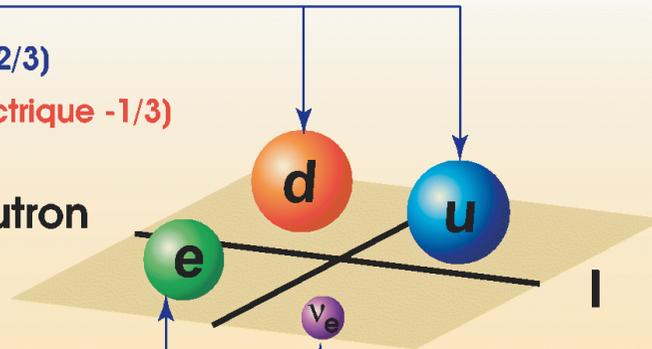
## La matière ordinaire

Quarks:

**Up** (charge électrique 2/3)

et **Down** (charge électrique -1/3)

Ils composent  
le proton et le neutron



Leptons :  
l'**électron** et son  
**neutrino** associé

Matière ordinaire,  
dont nous sommes constitués

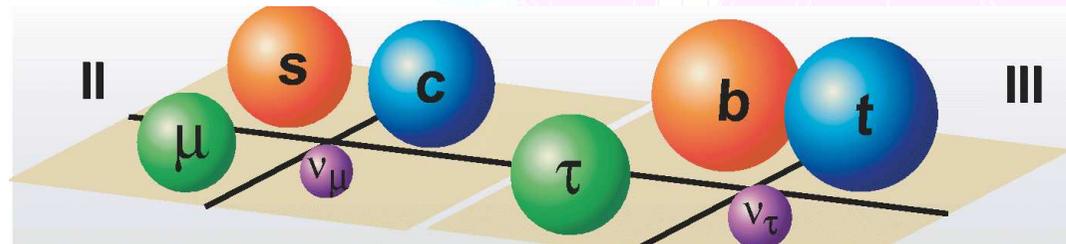
Toutes ces particules  
ont été observées,  
certaines bien après leur  
"invention théorique"

par exemple :

le **neutrino**, "inventé" en 1930 (Pauli)  
observé en 1956  
(Reynes (Nobel 1995) et Cowan)

... **et 2 copies plus lourdes**

Instables (sauf  $\nu$ ),  
existaient aux premiers instants de l'univers,  
observées actuellement dans les accélérateurs  
et dans les rayons cosmiques



## \* Les interactions entre les particules

L'interaction entre 2 particules est modélisée par...

### l'échange d'une troisième

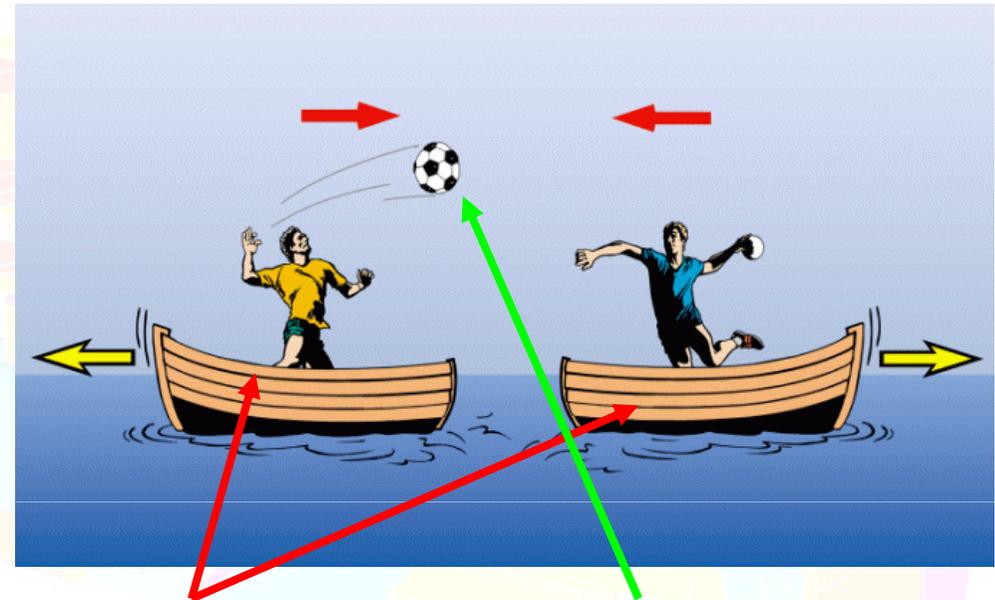
- En envoyant ou recevant le ballon les bateaux reculent :

**interaction répulsive**

(il existe des interactions répulsive ou attractive)

- Plus le ballon est lourd, moins il est facile de l'envoyer loin :

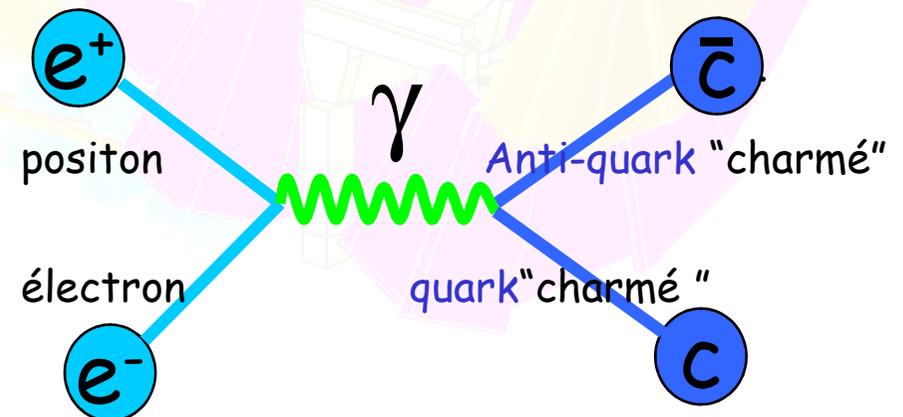
**porté de l'interaction**



matière

particule médiatrice

### une annihilation en une troisième



## Les particules d'interaction : les "bosons"

Nous connaissons **4 interactions** (forces):

Type	Intensité	Particules médiatrices	Domaine d'action
forte	1	gluon	noyau, proton, neutron...
Électro-magnétique	0.01	photon (la lumière)	atome, molécule, chimie...
faible	0.000001	$W^{\pm}, Z$	énergie solaire, radioactivité $\beta$ ...
gravitationnelle	$10^{-38}$	graviton ? (à découvrir)	pesanteur, système solaire, astronomie...

Tous les phénomènes usuels à l'échelle humaine sont régis par les forces Gravitationnelle et Électromagnétique

(Une dernière particule bizarre complète le Zoo du modèle standard : le **boson de Higgs**, encore à découvrir)

## ❁ La Chronologie

- Pour décrire l'histoire de l'univers, il est pertinent de suivre l'évolution de sa **température T** : en vieillissant il refroidit
- Entre  $t = 10^{-43}$  s et  $t = 10^{-6}$  s,  $T > 10^{15}$  K, tout n'est que spéculation
- Parler d'un âge inférieur à  $10^{-43}$  s n'a pas (encore) vraiment de sens

Grossièrement parlant, à cet instant, tout l'univers que nous observons aujourd'hui est contenu dans un volume de

$10^{-33}$  cm de diamètre, soit

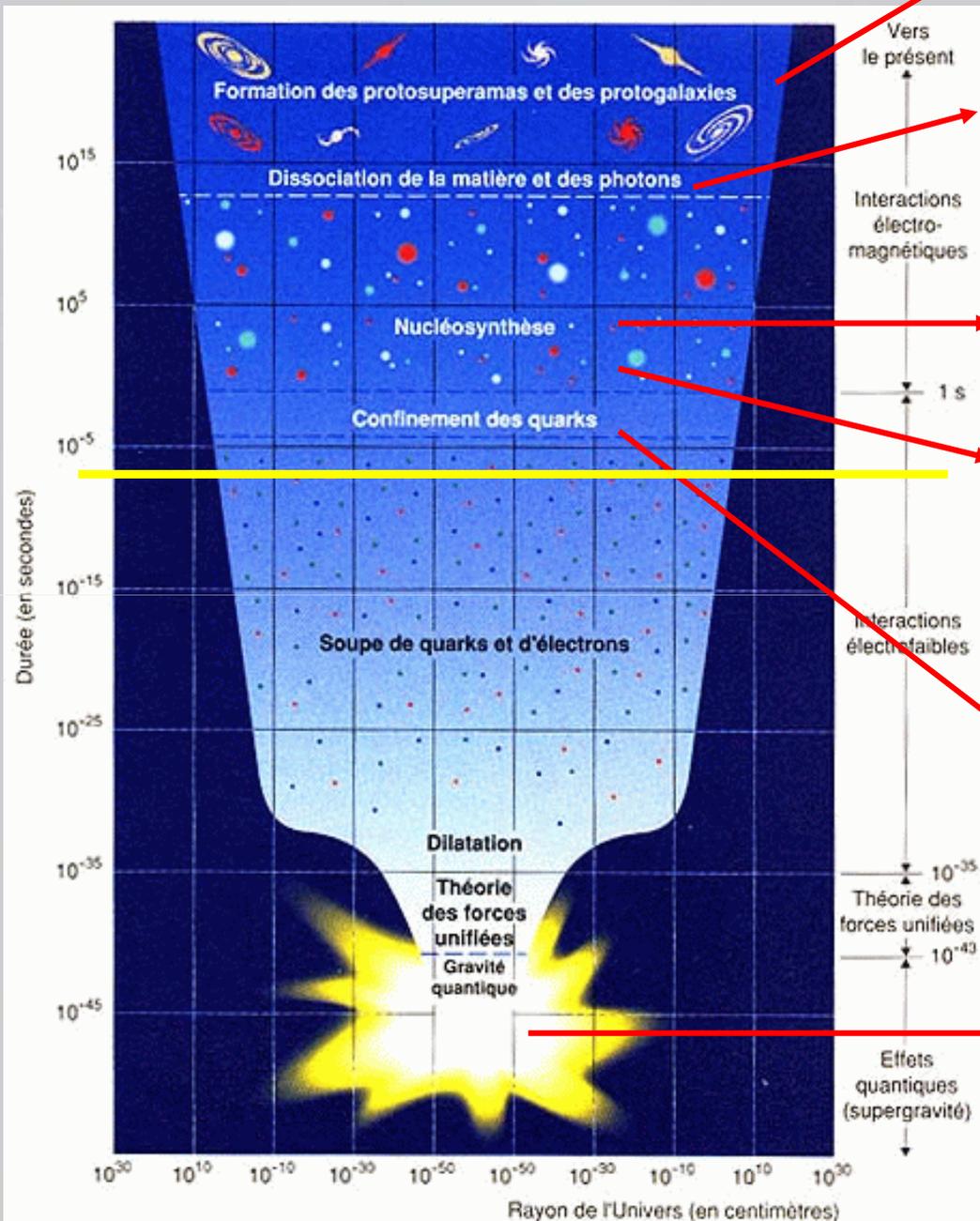
~ 10 millions de milliards de milliards de fois  
plus petit qu'un atome d'hydrogène !

- \* Les 4 forces ne forment qu'une seule
- \* Toutes les particules et antiparticules baignent dans une soupe cosmique

L'histoire de l'Univers pour  
les 4 forces :



## Et pour les particules de matière



$T \sim 0 \text{ K}$ , formation des étoiles et galaxies

$T \sim 3000 \text{ K}$ , formation des atomes

$T \sim 10^9 \text{ K}$ , formation des noyaux  
~74% Hydrogène, 26% Hélium

$T \sim 3 \cdot 10^9 \text{ K}$ , les anti-électrons (positons) disparaissent...  
**Il n'y a plus d'anti-matière**

$T \sim 10^{13} \text{ K}$ , les quarks se regroupent dans les protons et neutrons  
Les anti-quarks disparaissent...

$T \sim 10^{32} \text{ K}$ , soupe cosmique

o Retour sur *le découplage* :  $T \sim 3000 \text{ K}$ ,  $t = 700000 \text{ ans}$

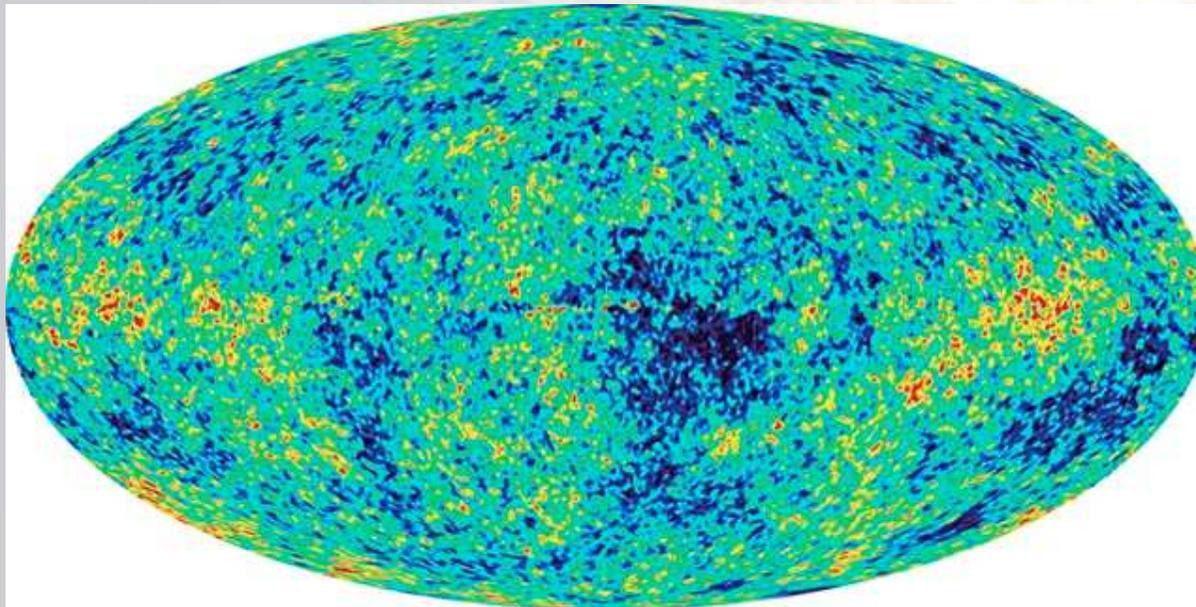
\* Avant cet instant, les photons ne voyagent pas facilement : ils sont constamment absorbés et re-émis par les électrons

*L'Univers est opaque*

\* À  $T < 3000 \text{ K}$ , les électrons libres n'existent plus : ils ont formé les atomes. Ils ne perturbent plus le voyage des photons

*L'Univers devient transparent*

La lumière libérée à cet instant est le *Rayonnement Fossile* observable de nos jours, dans tout le ciel, à  $\sim 3 \text{ K}$ , puisque l'univers s'est dilaté d'un facteur 1000 depuis



Découvert par hasard en 1964 par Penzias et Wilson (Prix Nobel 1978) c'est un des plus forts indices en faveur du *Big-Bang*

## Résumé des indices en faveur du *Big-Bang*

- ✓ Le **décalage vers le rouge** de la lumière des galaxies lointaines

Loi de Hubble, l'Univers semble être **en expansion**

- ✓ Le **Rayonnement Fossile à 3 K**

Vestige après expansion du bain de lumière extrêmement chaud qui a du exister aux premiers instants de l'Univers

- ✓ L'**abondance des noyaux légers**

La formation des noyaux ("**Nucléosynthèse**") pendant le *Big-Bang* prédit ~75% d'Hydrogène et 25% d'Hélium  
Cela correspond très bien à la proportion présente lors de la formation des étoiles

## \* Peut-on remonter jusqu'au *Big-Bang* ?

- o Les plus petites longueurs explorées jusqu'à maintenant sont de l'ordre de 0.001 fermi = 0.0000000000000000001 cm  
Pour remonter au *Big-Bang*, à  $10^{-33}$  cm,  
il faut gagner 17 ordres de grandeur !

Aucune expérience actuelle ou à venir ne sera capable d'un tel exploit

- o Les futures expériences seront cependant capables d'apporter de nombreux éclaircissements. Par exemple :
  - L'origine de la masse
  - Asymétrie matière-antimatière

⇒ Faire les mesures les plus précises possibles pour extrapoler vers des échelles de longueur et d'énergie inaccessibles à l'expérience

- o Un exemple d'expérience : un détecteur pour la physique des particules

la **Mécanique Quantique** associe à une particule d'énergie  $E$  une onde de longueur d'onde  $K/E$   
( $K$  est une constante)

Plus  $E$  est grande, plus les détails des objets observés sont fins

la **Relativité Restreinte** donne une équivalence entre Masse et énergie :  $E = Mc^2$   
( $c$  est la vitesse de la lumière)

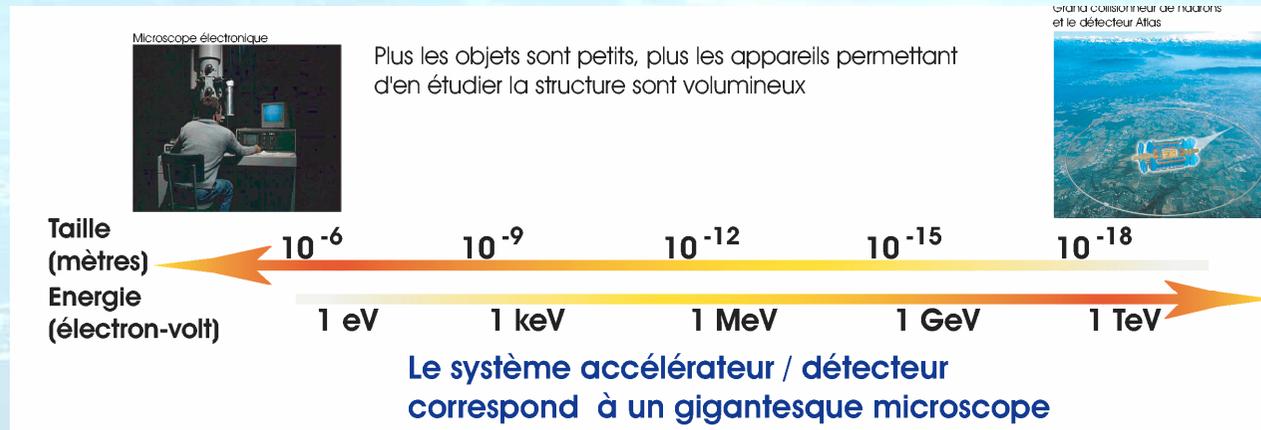
Pour produire une particule de masse  $M$ , il faut au moins une énergie  $Mc^2$



Pour observer l'infiniment petit et produire de nouvelles particules très massives, il faut beaucoup d'énergie

## o Les accélérateurs/collisionneurs de particules

❖ Fournir de l'énergie à des particules ordinaires :

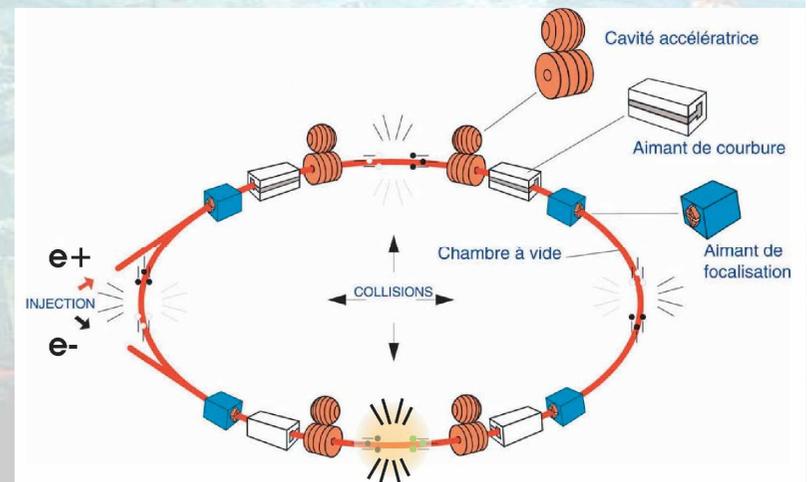


L'accélérateur le plus commun : un tube cathodique de télévision

❖ Les faire taper dans une cible :

{ un morceau de matière,  
ou d'autres particules  
également accélérées

Un collisionneur typique :  
électron-positron



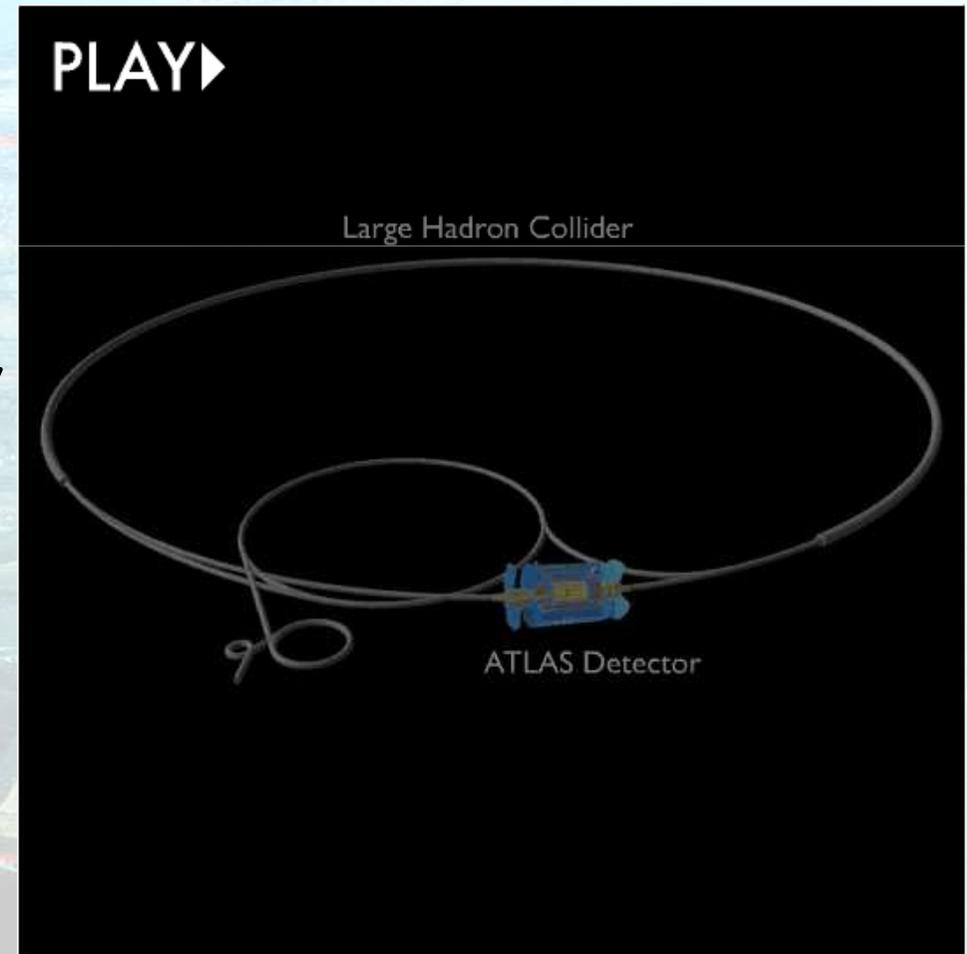
- o Observer une nouvelle particule

La collision de deux particules à haute énergie peut :

- o produire les nouvelles particules massives tant recherchées
- (o révéler de nouveaux phénomènes prédits ou inattendus)

Malheureusement,  
ces particules sont souvent instables,  
et se désintègrent rapidement

On les observe *indirectement*  
en **mesurant**  
leurs **produits de désintégration**



- 
- The background of the slide is a Cosmic Microwave Background (CMB) radiation map, showing a complex pattern of temperature fluctuations in shades of blue, white, and yellow against a dark background.
- ⇒ Les mystères du *Big-Bang* sont encore très nombreux
  - ⇒ Les expériences futures devraient permettre d'énormes progrès dans la prochaine décennie
    - \* en cosmologie
    - \* pour mieux comprendre les constituants ultimes de la matière et leurs interactions
  - ⇒ Malheureusement les tous premiers instants ne seront accessibles qu'à l'imagination des physiciens théoriciens