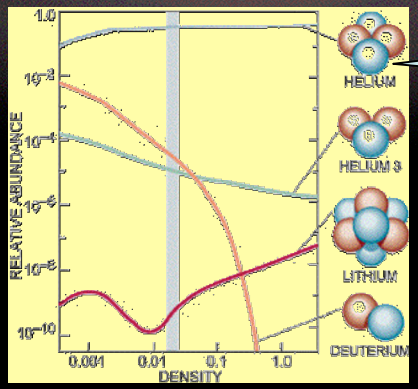
BIG BANG

CHRONIQUE DE L'ESPACE TEMPS

Inflation
Big Bang plus
10^{-35}? seconds



Big Bang plus 3 min

Big Bang plus
380,000 Years

Big Bang plus
14 Billion Years

LA VIE !

Tout ce que vous avez voulu savoir sur le « Big Bang » !

- ***OBJECTIF***

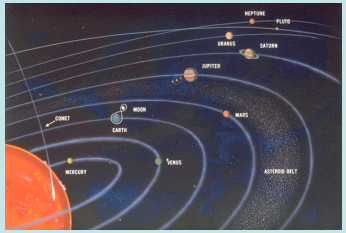
  MONTRER QUE:

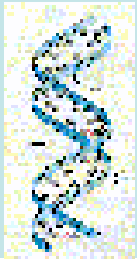
  – ***LE MODELE COSMOLOGIQUE « STANDARD » OU « CONCORDANT »* N'EST PAS QU'UN « SCENARIO »**

  – **MAIS UN MODELE SCIENTIFIQUE AU *POUVOIR DESCRIPTIF ET PREDICTIF* PUISSANT**

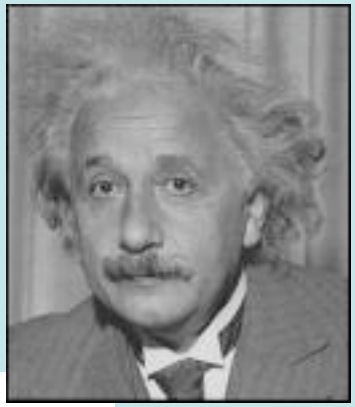
  – **BASE SUR *LES PRINCIPES FONDAMENTAUX* DE LA PHYSIQUE THEORIQUE, DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES ET DE L'ASTROPHYSIQUE**

  – **MODELE QUI PERMET (ENTRE AUTRES) DE *COMPRENDRE* POURQUOI NOUS SOMMES LA POUR EN PARLER !!!!**





LE CADRE:
LA RELATIVITE GENERALE (I)
(Einstein 1915 !!)



Introduit le concept d'Espace-Temps

(courbe) doté d'une métrique (distance)

$ds^2 = A\, dr^2 + B\, dt^2$

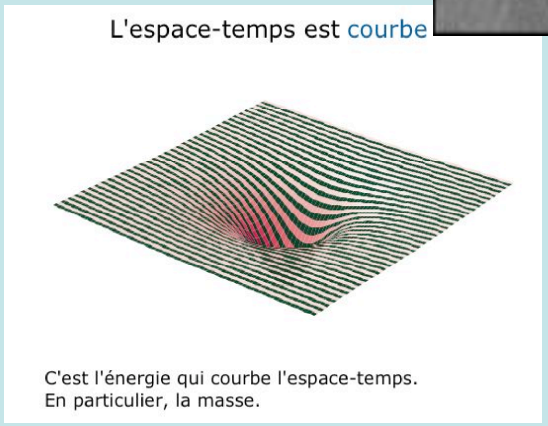
où Temps et Espace équivalents

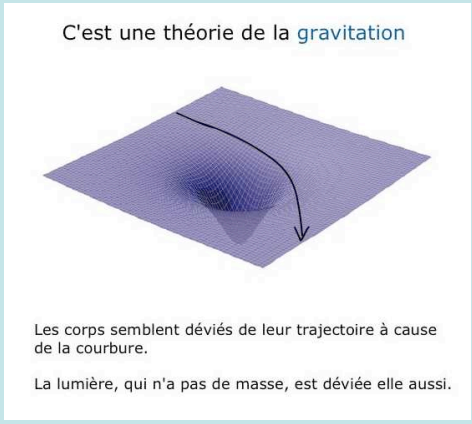
IDEES MAJEURES

- **Plus de FORCE mais la GEOMETRIE (trajectoires = géodésiques)**

- **GEOMETRIE <----> CONTENU**

$$G_{\mu\nu} = (8 \pi G / c^4)\ T_{\mu\nu}$$





LE CADRE:
LA RELATIVITE GENERALE (II)

CONTENU <-----> GEOMETRIE <-----> « GRAVITATION »

•Qu'est ce que le contenu en Cosmologie?

↕

Fluide de photons ou de galaxies…

Caractérisé par une densité ρ et une pression p

Avec une relation entre p et ρ

Equation d'état:

$$p = w \rho c^2$$

La « gravitation » peut devenir *répulsive* pour certaines équations d'état avec w < 0 comme:

$$p = -\rho c^2 \text{ <---> } w = -1$$

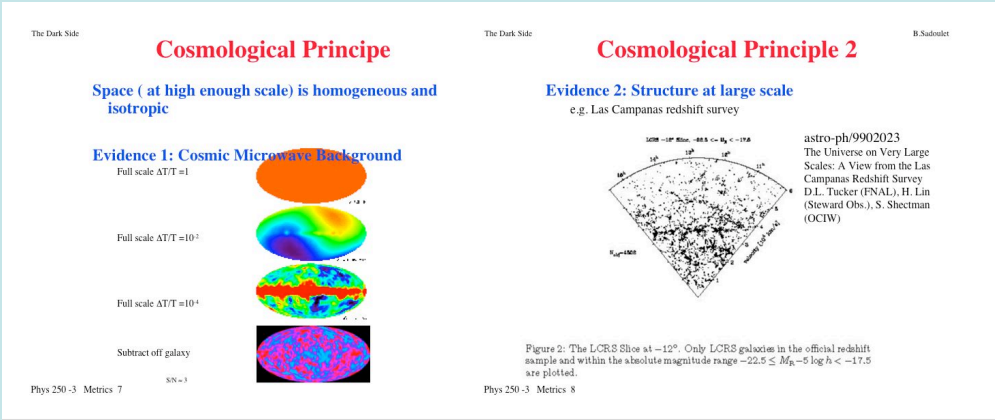
<--> Constante Cosmologique !!

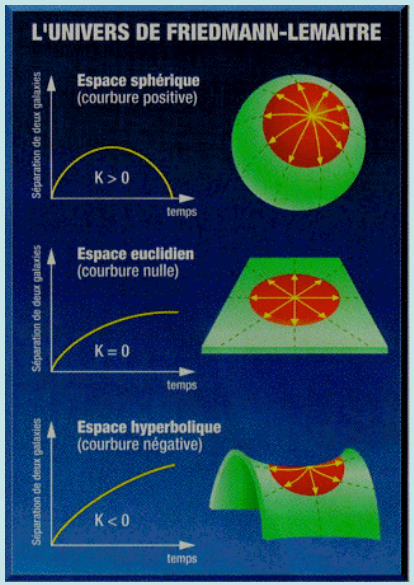
w= 1/3 <-> Univers de Rayonnement

w = 0 <-> Univers de Matière

Le Principe Cosmologique

- L' Univers est homogène et isotrope
  - ***Il existe un temps cosmique unique t***
  - ***La métrique se simplifie, les distances spatiales dépendent d'un facteur d'échelle R(t)***
- Description simple du contenu énergétique : un ou des fluides de densité d'énergie ρc^2 et pression p





UN FAIT: L'UNIVERS EN EXPANSION

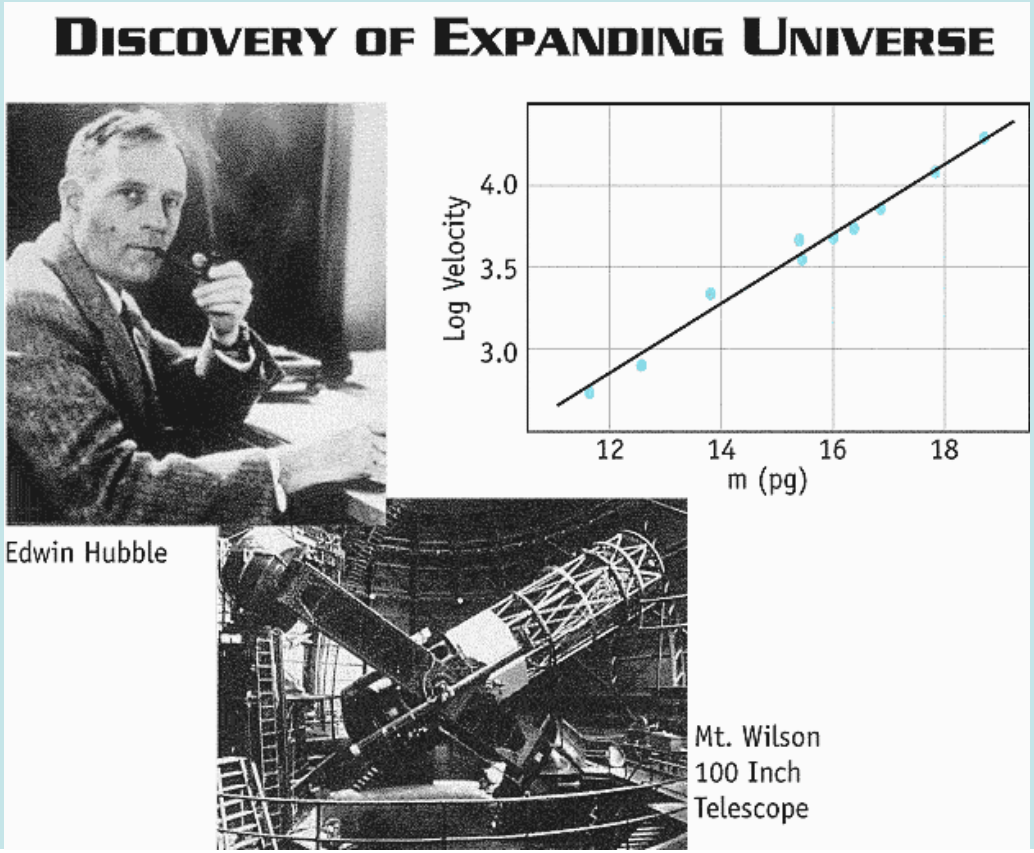
OBSERVATION DE LA FUITE DES GALAXIES :

ELLES S'ELOIGNENT TOUTES

***(PAS SEULEMENT DE LA NOTRE!)* LES UNES DES AUTRES**

AVEC UNE VITESSE PROPORTIONNELLE A LEUR DISTANCE:

LA LOI DE HUBBLE (20's- 30's)



L' Univers en expansion:
UNE SINGULARITÉ INITIALE !

En « inversant le film:

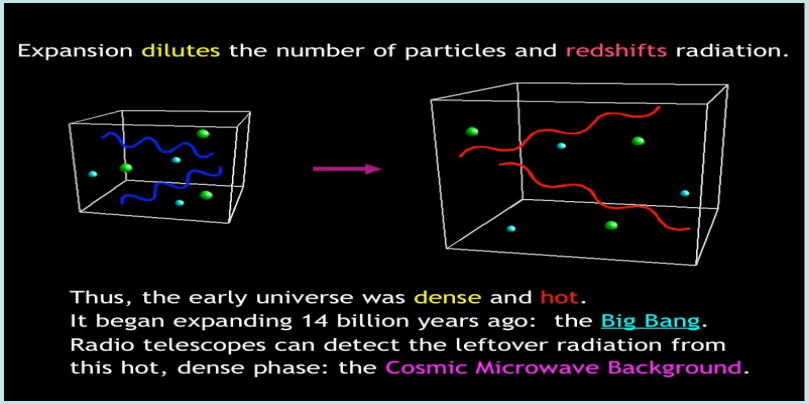
Gamow

Une trace fossile:
Un rayonnement à 3K!

L'Univers primordial était
(infiniment)
dense et chaud !
« Big Bang »

Température T et densité ρ -> ∞
Et facteur d'échelle R(t) -> 0

Mais rien dans les équations ne donne la cause d'une explosion!!

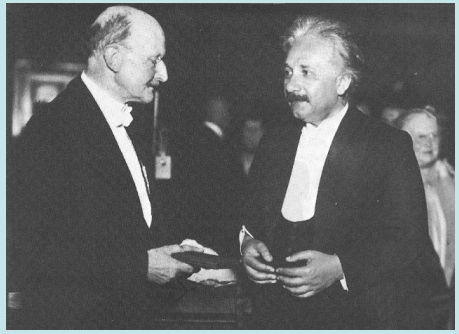


Nom donné par F Hoyle:
détracteur du modèle et partisan d'un Univers sationnaire
« Steady State Cosmology »!

L'expansion dilue le nombre de particules et « rougit » le rayonnement

Quid du « Big Bang » ?

- **Dans le « Modèle Standard » décrit par la Relativité Générale, une singularité apparaît:**
  - **R = 0 pour un temps fini (pris comme origine) depuis l'instant actuel**
  - **T, ρ et dérivées -> ∞**



Planck et Einstein

Mais Quid de t -> 0 ?

- **En fait, en remontant le passé on arrive au temps de Planck:**

$$t_{Planck} = (h / G c^5) \sim 6\ 10^{-44}\ s$$

Pour lequel l'Univers a une taille

$$R_{Planck} = (h / G c^3)^{1/2} \sim 10^{-35}\ m$$

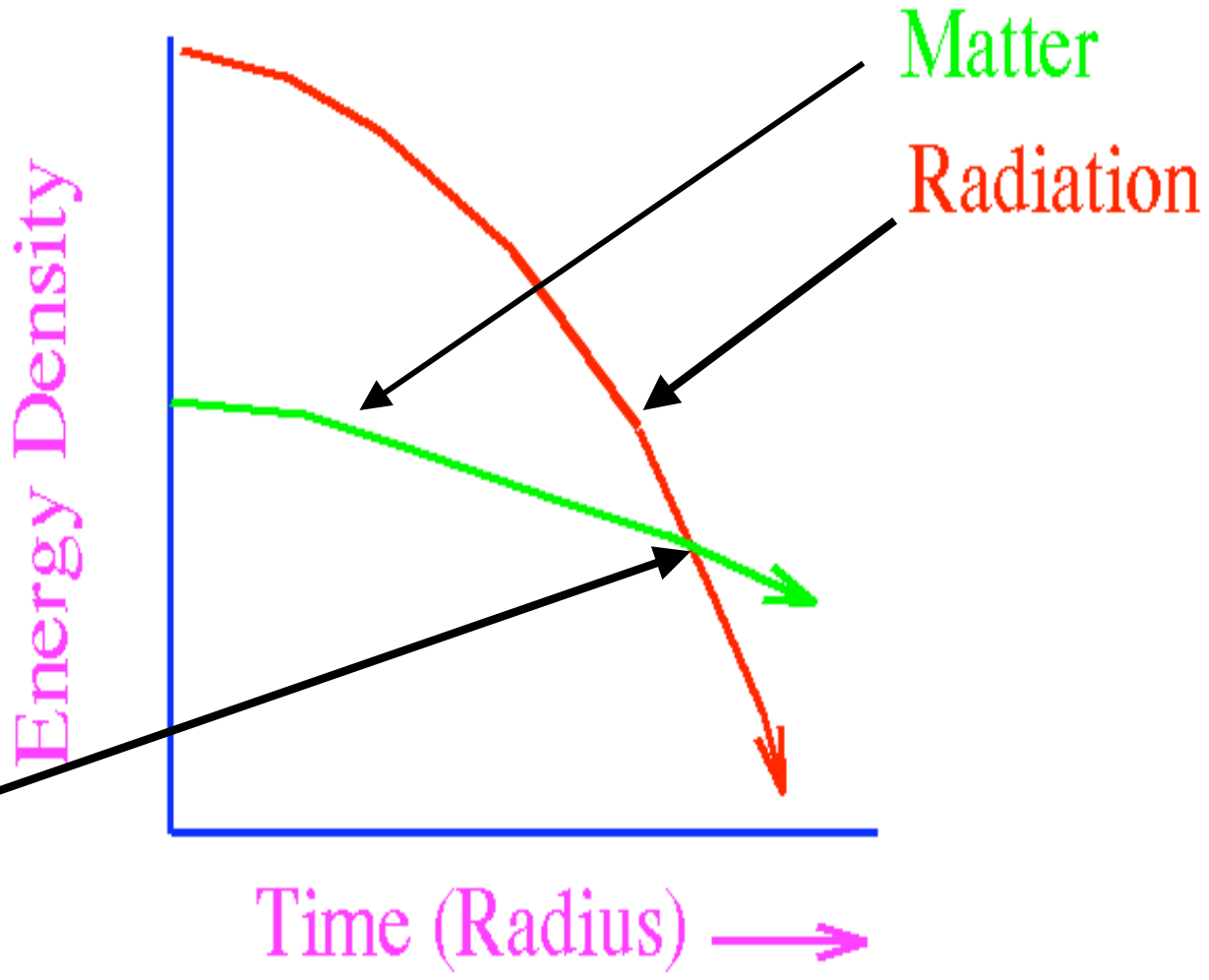
où la Relativité Générale et la Mécanique Quantique doivent s'unifier !

Une telle théorie unifiant RG et MQ (supercordes?) encore spéculative!!!

t_{Planck} est donc une « limite actuelle » à la théorie et à l'interprétation

Avec l'Expansion, l'histoire de l'Univers est une histoire de température et de densités et de domination de types d'Energie-Matière

- **Compte tenu des équations d'état :**
- **La densité de la matière et celle du rayonnement décroissent de manière différente (T^3 et T^4)**
- **Donc le rayonnement domine la matière et vice versa en fonction de la température donc du temps cosmique.**
- **Il existe une époque dite d'équilibre**
- **Univers actuel: matière !**



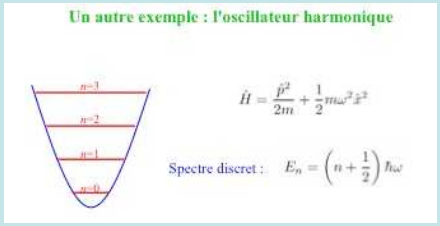
QUID DE L'ENERGIE DU VIDE ? (I)

- **Comme on l' a vu, autour de l'Ere de Planck, l'Univers est un « système quantique »**

- **Un tel système a toujours une énergie non nulle : celle du « vide »**

  Au sens quantique, cad celle de son état fondamental (le plus bas possible)

- **En Mécanique Quantique: un oscillateur harmonique a un état fondamental d'énergie non nulle !**



Pas seulement une curiosité de théoricien

HEUREUSEMENT LES THEORICIENS SONT AU TRAVAIL !

QUID DE L'ENERGIE DU VIDE ? (II)

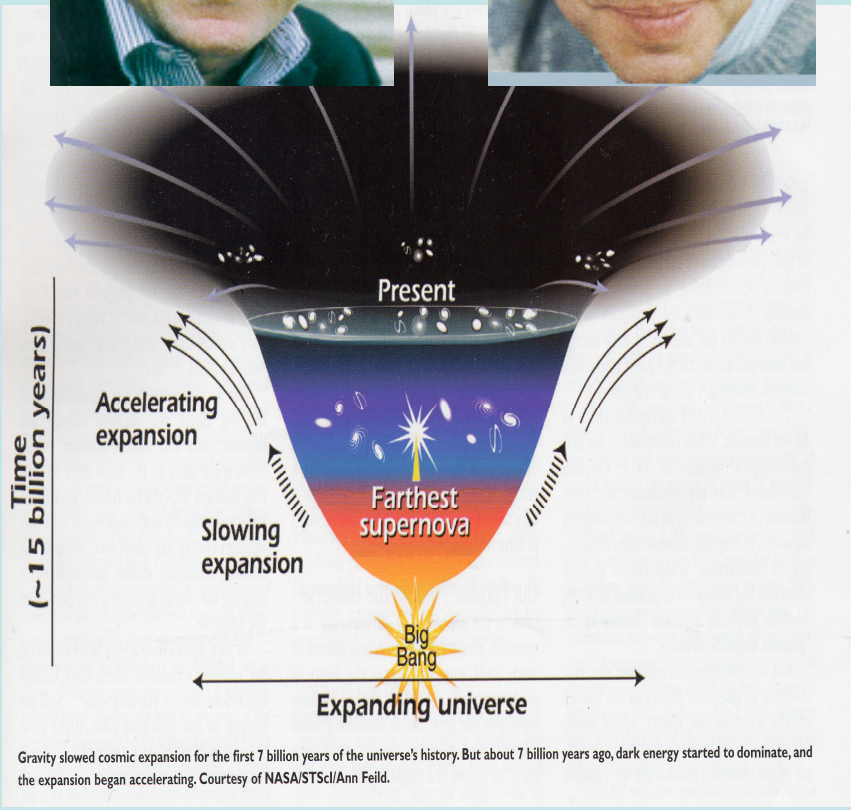
- **Ce « vide quantique » possède la « bonne propriété » :**

  $p = w \rho$ avec $w < 0$ =>
  source de « gravitation répulsive »

Cette « *anti-gravité* » domine le contenu en énergie de l'Univers primordial (~10^{-40} s) et est alors le moteur d'une expansion exponentielle qui fait croître les dimensions de facteur 10^{30} !!

C'EST L'INFLATION (80's)!!!!!

(A. Guth, A. Linde et….. de Sitter)



Gravity slowed cosmic expansion for the first 7 billion years of the universe's history. But about 7 billion years ago, dark energy started to dominate, and the expansion began accelerating. Courtesy of NASA/STScI/Ann Feild.

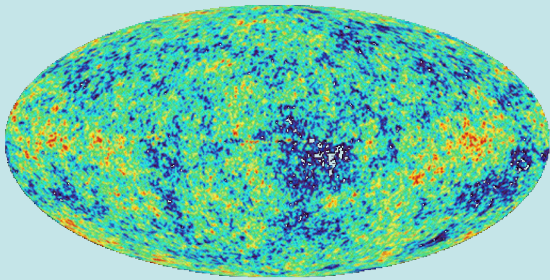
L'INFLATION: UN « MUST »

- **« Moteur » pour le Bang : expansion gouvernée par la pression négative!**
- **Résoud des problèmes de causalité:**

  Deux zones de direction opposées dans le ciel n'ont pu échanger d'information, pourquoi le CMB est il si uniforme?
- **Pourquoi y a t'il des structures (étoiles, galaxies, amas de galaxies…la vie) si l'Univers est si parfaitement homogène comme le postule le Principe Cosmologique?**

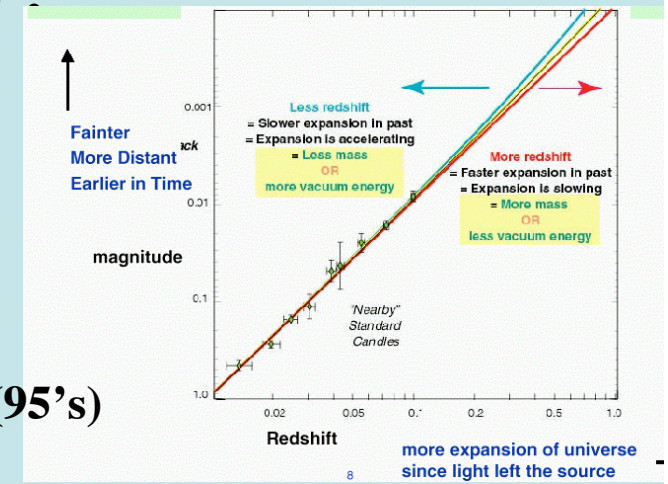
Le "Big Bang" prédit (Gamow contre Hoyle!) un rayonnement fossile à 3K qui est mesuré (COBE) et est très isotrope

$$\Delta T / T \approx 10^{-5}$$

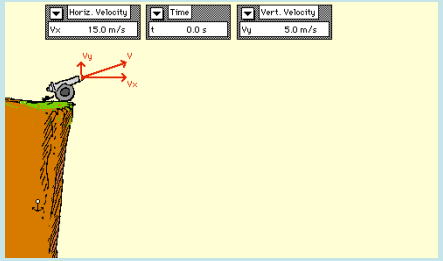


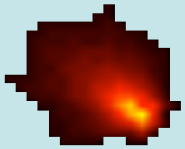
ENCORE L'ENERGIE DU VIDE? L'ENERGIE NOIRE 14 MILLIARDS D'ANNEES APRES !

- **L'expansion de l'Univers *est en accélération* contrairement à ce qu'on attend pour un Univers dominé par de la *matière* qui avec une *gravitation attractive* devrait la *ralentir* !!**

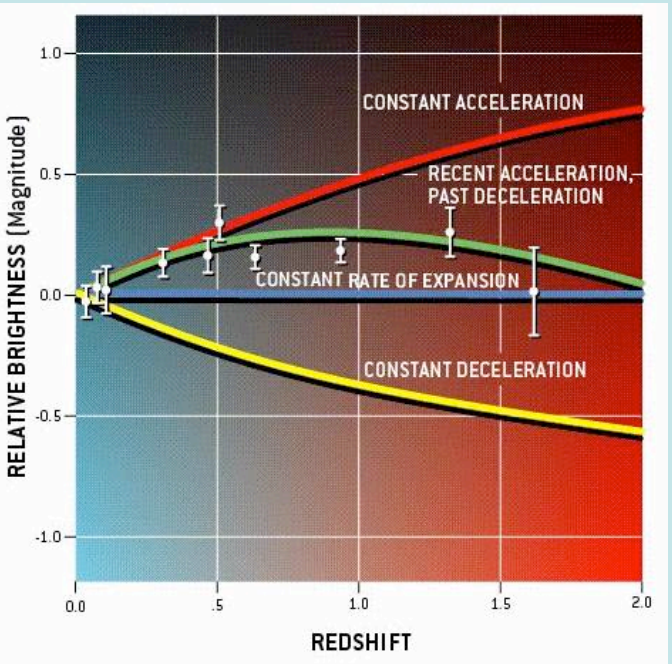


S. Perlmutter et al (95's)



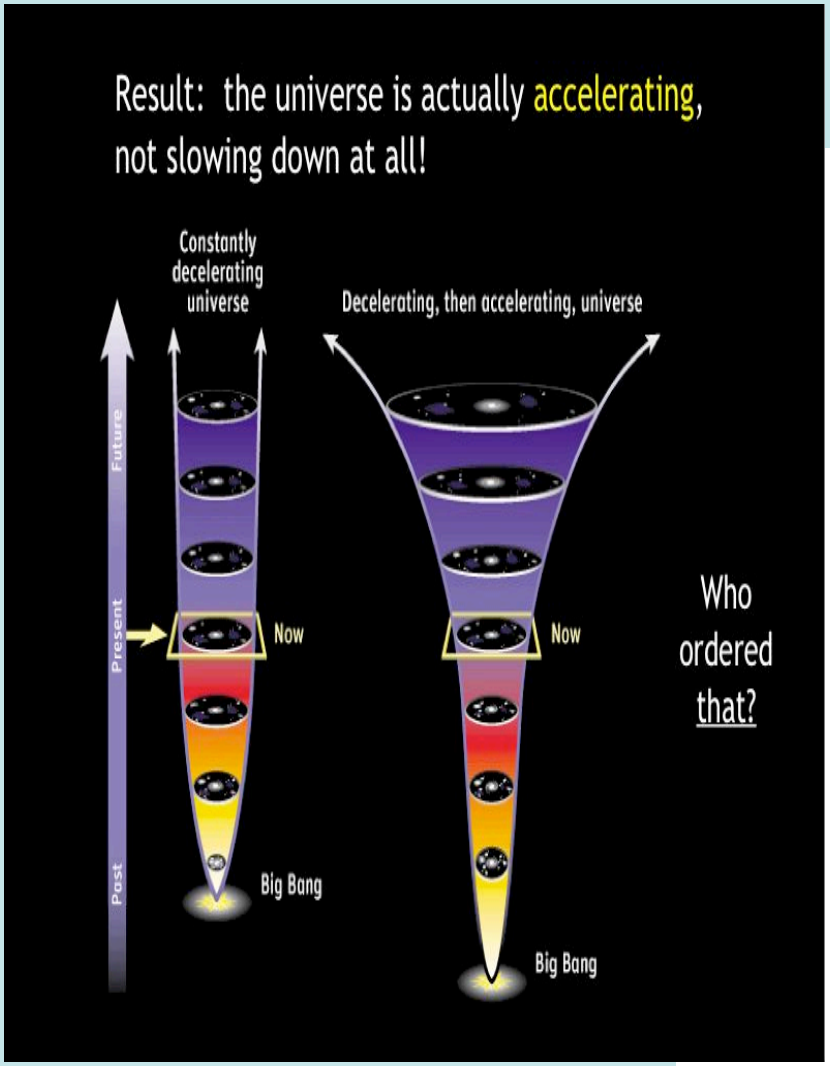


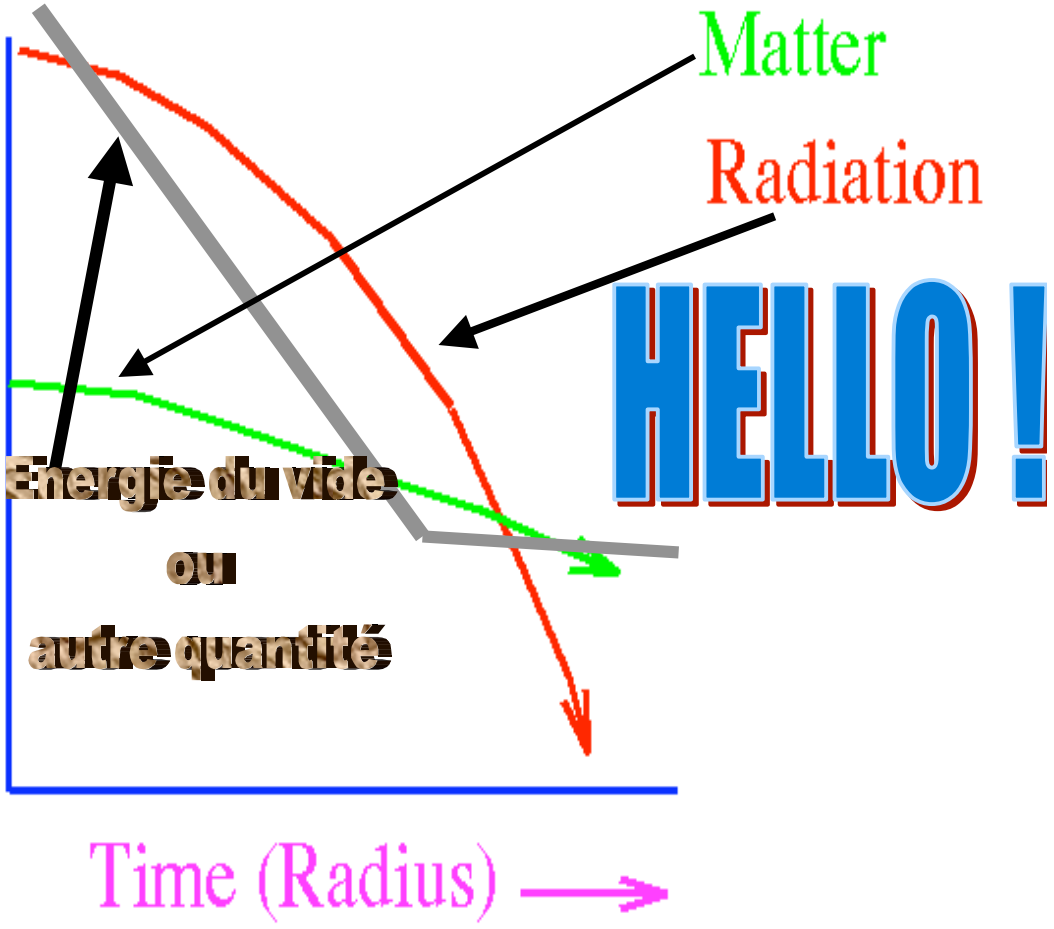
MESURE DE L'ECLAT APPARENT DE CHANDELLES STANDARD (CAD DES ASTRES AYANT LE MEME ECLAT ABSOLU) EN FONCTION DE LA DISTANCE: LES SUPERNOVAE



La variation de cet éclat en fonction de la distance teste l'accélération

L'ENERGIE NOIRE: UN FOSSILE DU VIDE ?



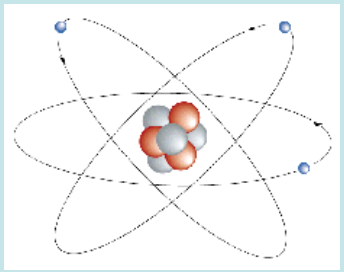


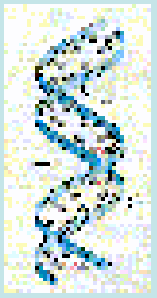
QUID DE LA MATIERE ! (I)

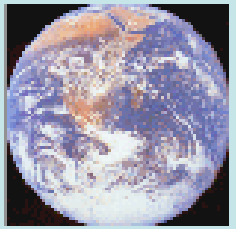
- **QUELLE MATIERE ?**
  - **LA MATIERE « ORDINAIRE »**
- **PAS D'ANTIMATIERE !**
- **MATIERE « NOIRE » !**
  (depuis les 30's
  - **déduite par ex de la *ROTATION* des galaxies spirales**
  - **des effets de lentille gravitationnelle**
  - **Formation des « grandes structures »**
  - ***NOIRE:***

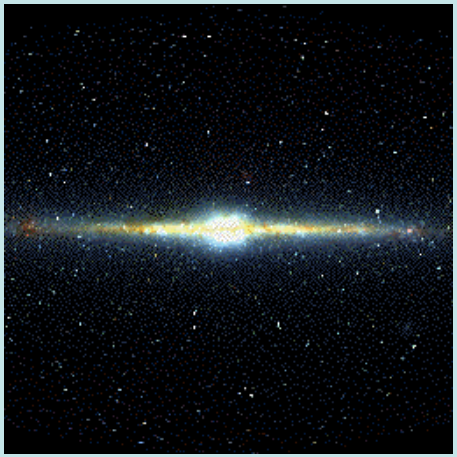
NON BARYONIQUE INTERAGIT PUREMENT PAR GRAVITATION

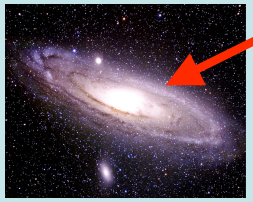
PAS DE RAYONNEMENT

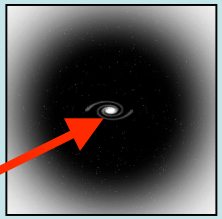


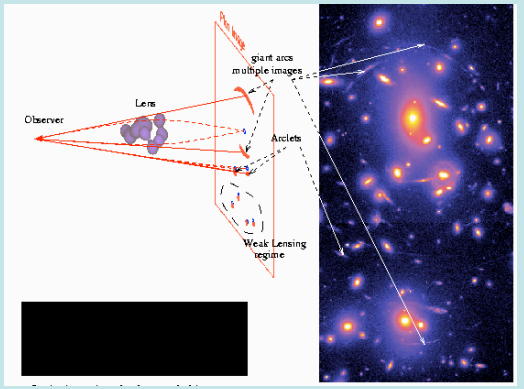




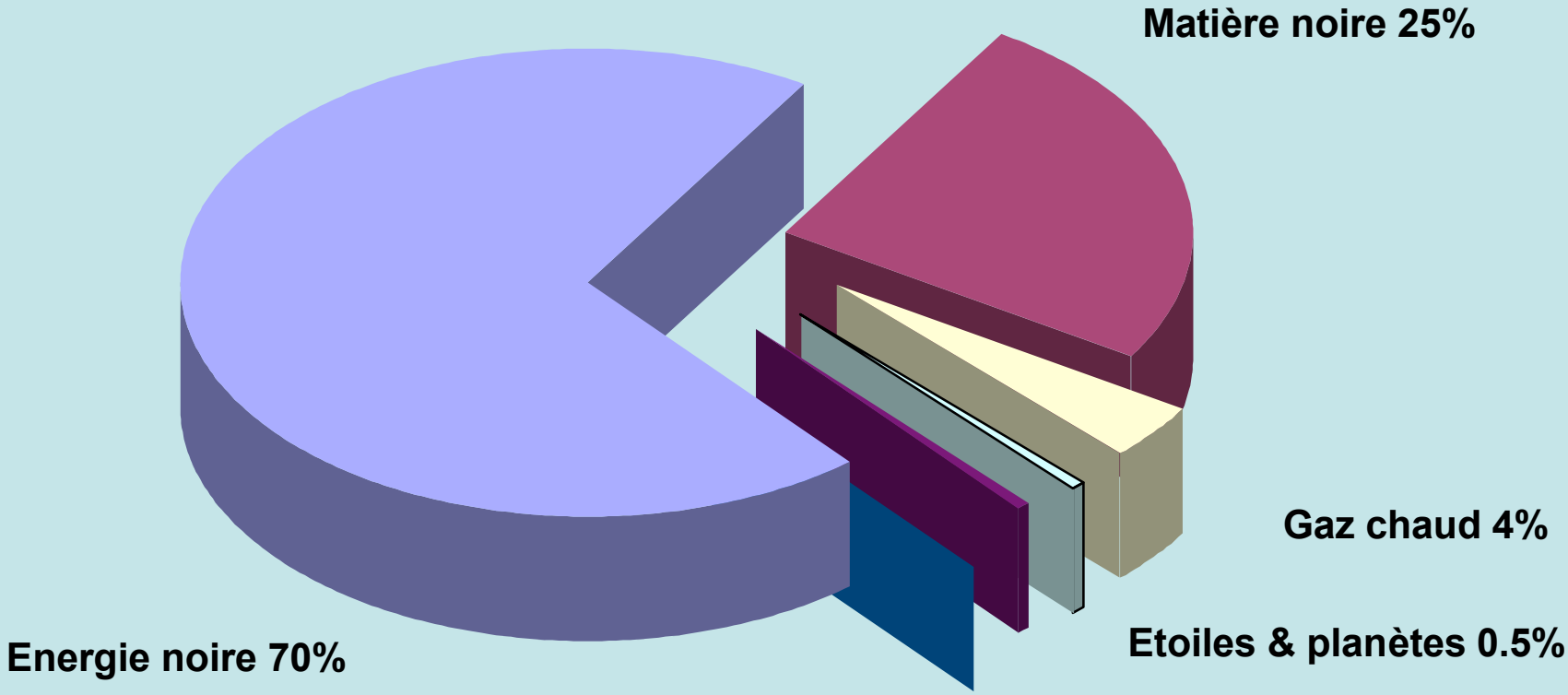








Etonnante composition…La matière dans l 'Univers est essentiellement non baryonique

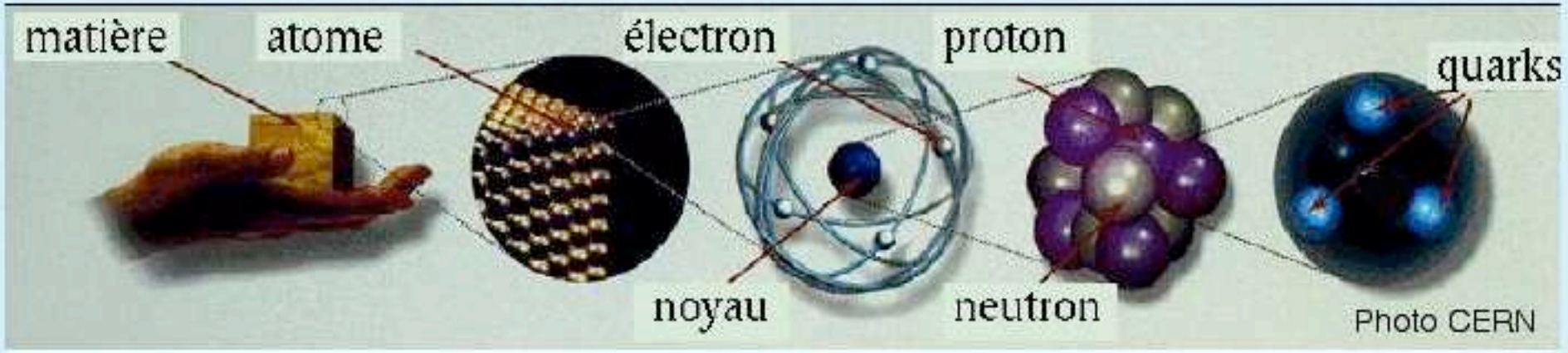


BILAN COSMIQUE

LA MATIERE NOIRE DOMINE LA MATIERE !

QUID DE LA MATIERE? (II)

Qu 'est ce que la matière « ordinaire »
De quoi est-elle constituée ?



nombre de protons du noyau = nombre d'électrons de l'atome
caractérise l'élément chimique

Seuls l'électron et les quarks u et d sont fondamentaux
… la matière est constituée de quarks et d'électrons

« BIG BANG » ->
LA MATIERE BARYONIQUE ET NON BARYONIQUE!

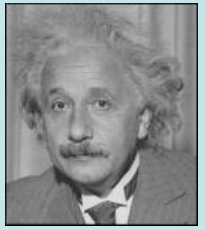
- **UNIVERS (TRES) CHAUD**

ET

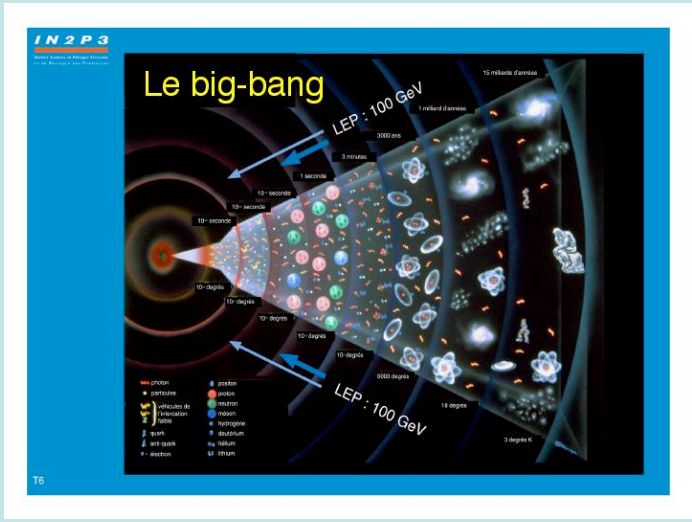
« $E = MC^2$ »

<=>

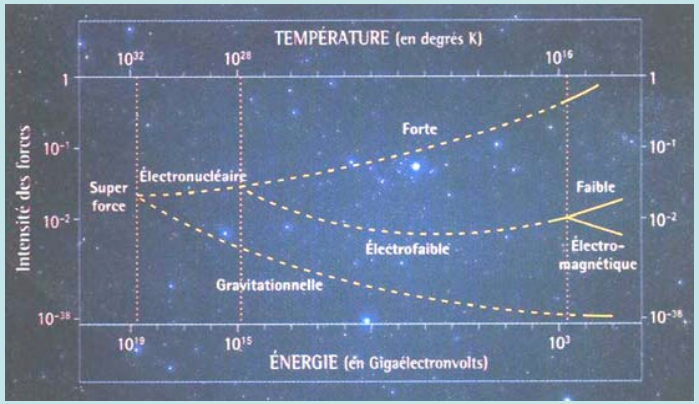
LE PLUS GRAND ACCELERATEUR DISPONIBLE !



On peut écrire la chronologie



- **L'Energie (la température) décroît, rendant possible au *cours du temps* la création d'un type donné de particule**



L'Univers primordial: le cadre naturel pour une Théorie de Grande Unification

t = 10^{-35} s, T = 10^{28} K : la fin de la grande unification

t = 10^{-11} s, T = 10^{15} K : la transition électro-faible

t = 10^{-6} s, T 10^{12} K : la transition quarks-hadrons

t = 10^{-2} s, T = 10^{9} K : la désintégration des neutrons

QUID DE L'ANTIMATIERE ?
UNE QUESTION A LA PHYSIQUE DES PARTICULES

Quand on crée de la masse à partir d'énergie matière et antimatière sont créées en quantités strictement égales.

Mais , si de la matière et de l'antimatière entrent en contact, il y a des annihilations qui produisent des photons gamma.

Or nousn'observons rien de tel dans l'univers

→

→

.... Qu'est devenue l'antimatière ?

Il peut y avoir disparition de l'antimatière si

- quarks et antiquarks se désintègrent
  ex. $p \rightarrow 2\,e^+ + e^-$ $\quad \bar{p} \rightarrow 2\,e^- + e^+$
  ☺ théories de grande unification
- dissymétrie matière - antimatière
  ☺ observée pour le kaon neutre (CPLEAR) et le B (expérience Babar)
- déséquilibre thermodynamique
  ☺ possible au tout début du big-bang

A. Sakharov

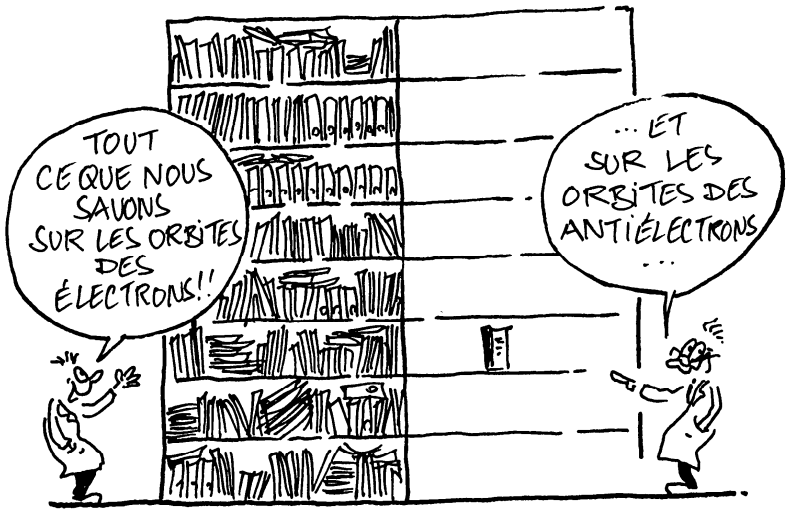
⇒ **Production d'un léger déséquilibre :**

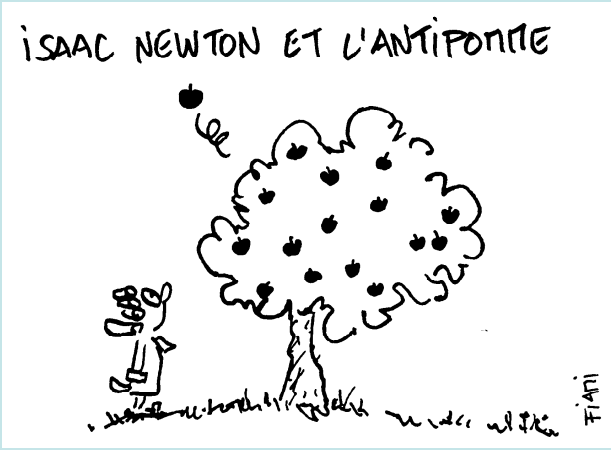
1 000 000 000 antiprotons ou antineutrons…

⇓

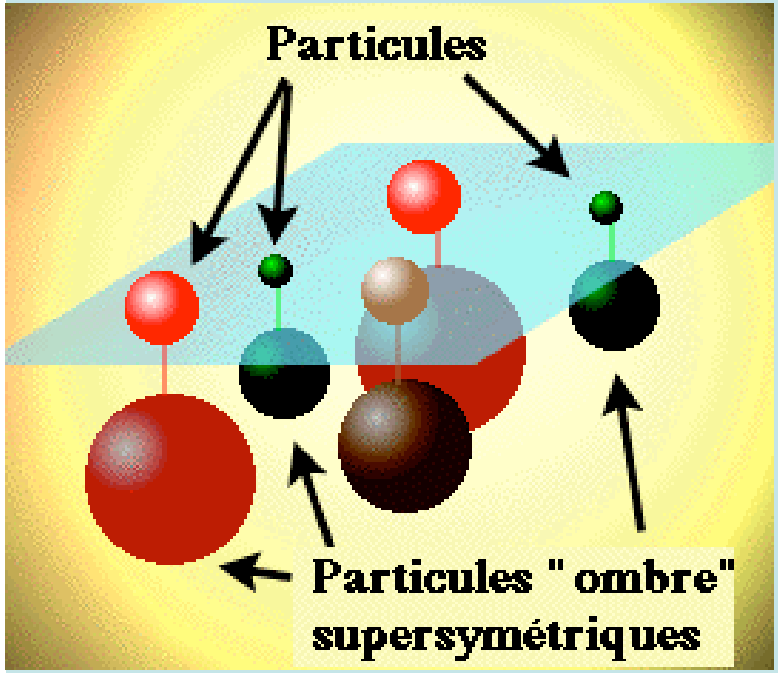
1 000 000 001 protons ou neutrons…

CNRS-IN2P3 et CEA-DSM-DAPNIA - T30

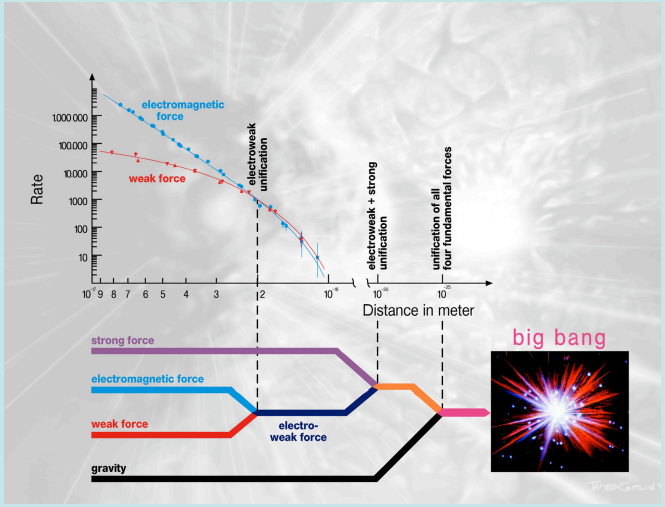




QUID DE LA MATIERE NOIRE ?



Supersymétrie: Prédit de nouvelles particules reliant fermions et bosons



Les théories de supersymétrie ont été développées, notamment dans le contexte des Théories de Grande Unification, pour tenter d'unifier les interactions forte, faible et électromagnétique et expliquer pourquoi les particules ont une masse.

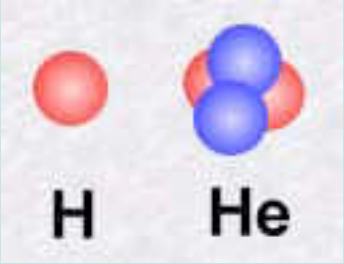
Dans cette théorie, chaque particule a un partenaire supersymétrique.

Une de ces particules le neutralino, pourrait représenter toute la matière noire manquante.

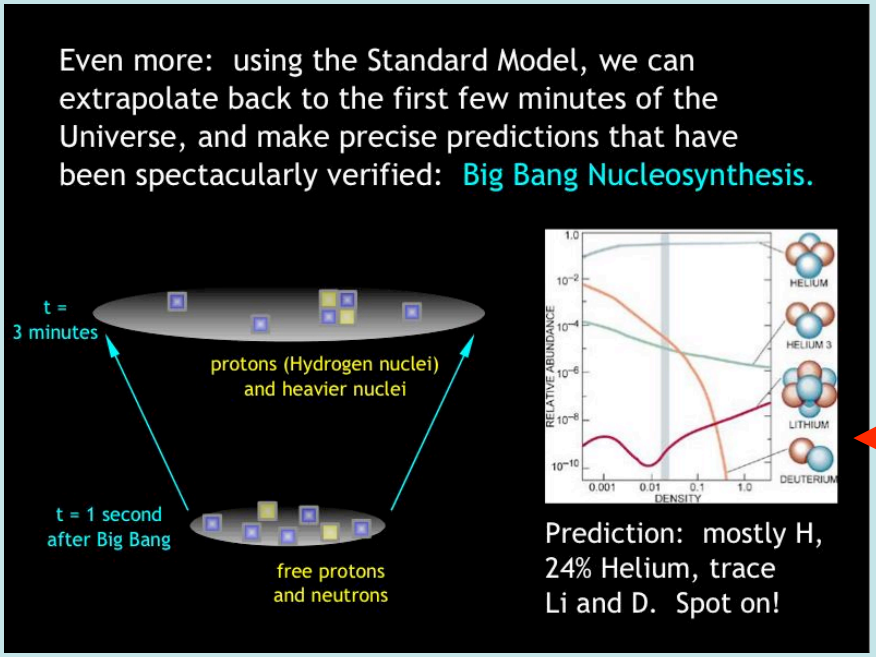
La matière noire
un objet de recherche
en laboratoire!
Il y en a dans cette pièce

QUID DES ELEMENTS LEGERS?

On dispose au bout de quelques fractions de seconde d'une « soupe » de particules: protons, neutrons qui peuvent interagir !

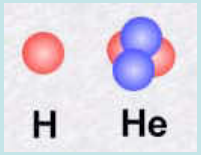


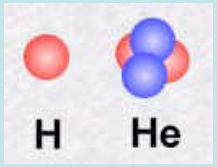
- **NUCLEOSYNTHESE PRIMORDIALE POSSIBLE**
- **n + p -> D + photon**
- **D + p -> He3 + photon**
- **Processus qui se produit autour de la 1ère seconde**
- **Prédit (*sans aucun paramètre libre*) Les abondances observées de H, He,... Be (*Un des 3 piliers du Big Bang !*)**



QUID DES ELEMENTS LOURDS? DE LA VIE !!! (I)

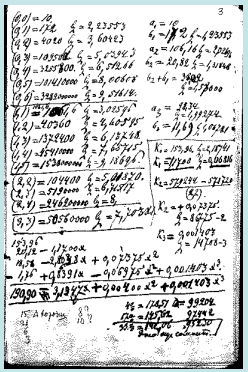
1) La NP produit essentiellement

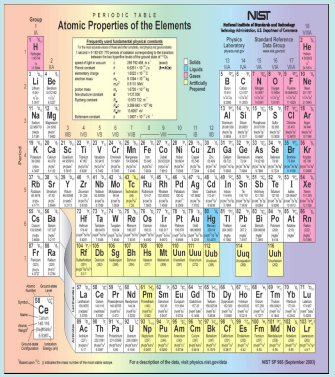


2) Pourquoi l'Univers actuel ne contient il pas que 

?

3) Où et quand se sont formés les éléments lourds nécessaires à l' apparition des planètes et de la vie?





Quid de Mendeleev?

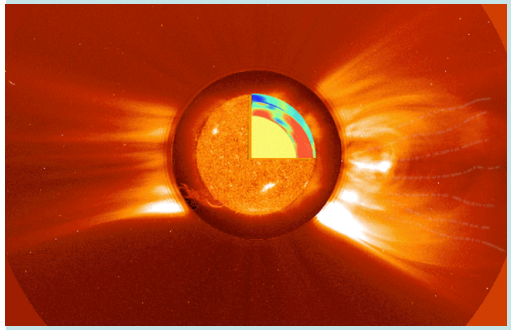
- **Il y a compétition entre l'expansion qui dilue les particules et les interactions (« collisions ») proches des particules en jeu (p, n, He**

- **De plus, le neutron intervient avec un « temps de vie » limité:**

$t_{NEUTRON}$ **~ 10 min !!!**

⇒ ***TOUT EST FINI AU BOUT DE 3 MINUTES SANS ELEMENTS LOURDS!***

QUID DES ELEMENTS LOURDS? (II)
LES ETOILES: DES CENTRALES NUCLEAIRES

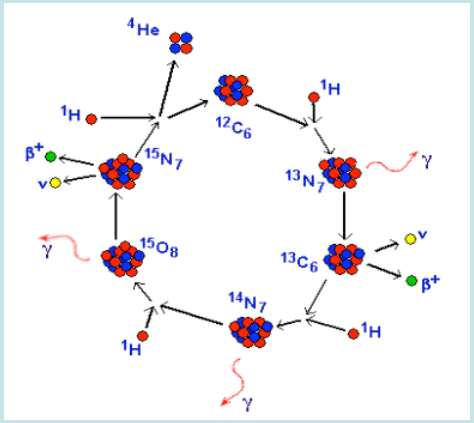


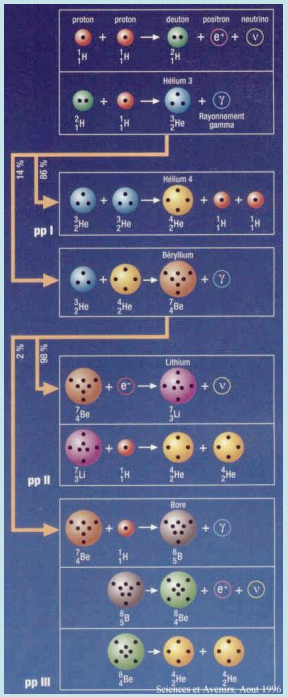
Conditions physiques au centre du Soleil
Température: 15 10^6 K
Masse volumique: 160 g/cm3 (eau: 1 g/cm3)

DIVERS PROCESSUS:
Cycle P-P
Chaîne de l' He
Cycle du Carbone

- **Production de l'énergie**

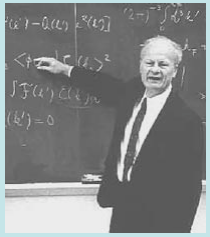
1926 : Eddington réaction nucléaire permanente au cœur du soleil : H -> He





- **Détail de la réaction nucléaire**

1938 : Bethe
(Prix Nobel 1967)



Discipline très prédictive

POUSSIERES D' ETOILES!!!

UN CYCLE:

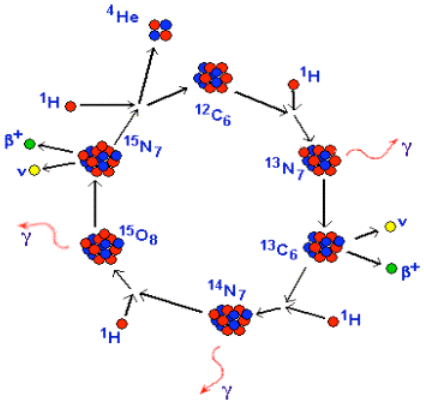
« NAISSANCE » « VIE » « MORT » DES ETOILES

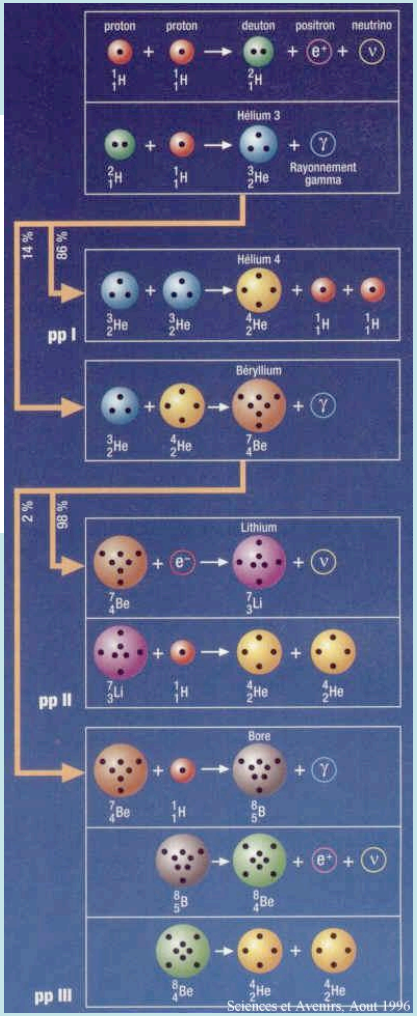
DIVERS PROCESSUS:

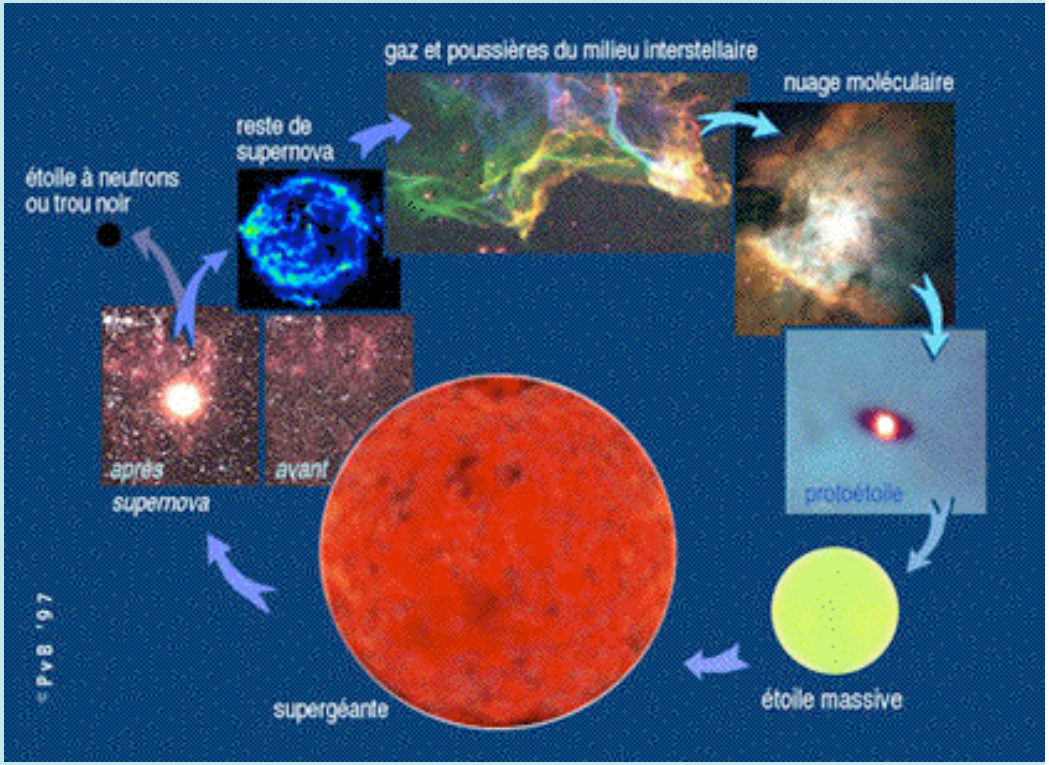
Cycle P-P

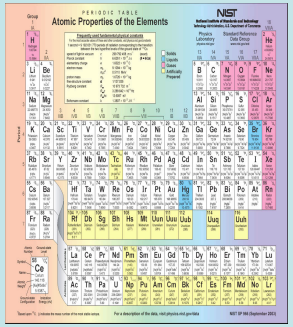
Chaîne de l' He

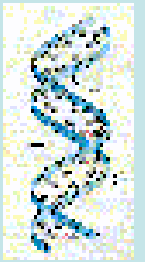
Cycle du Carbone



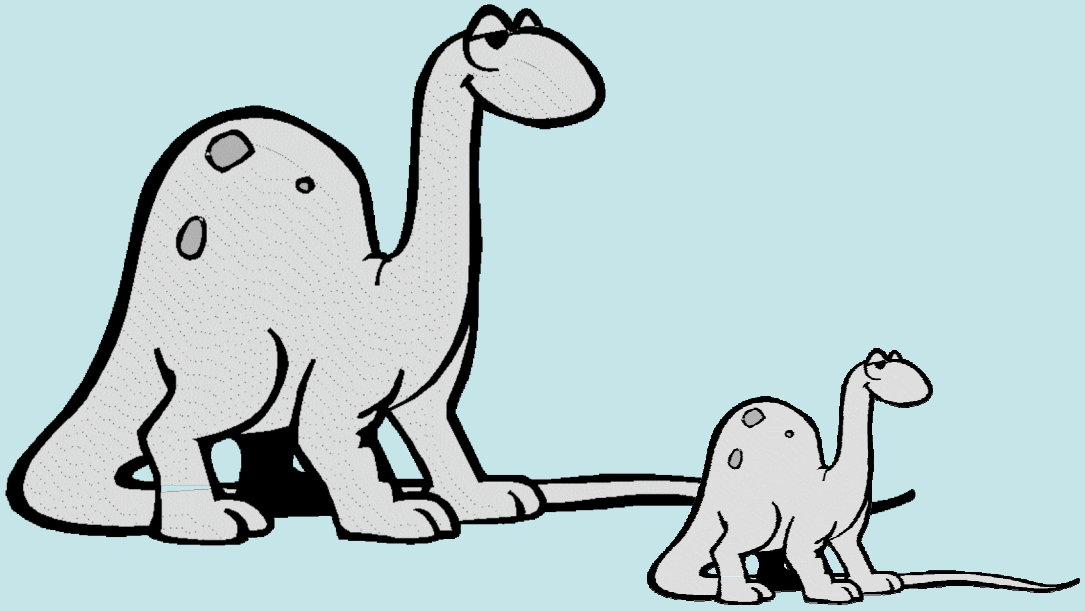








QUID DES ETOILES DES GALAXIES DES GRANDES STRUCTURES DE L'UNIVERS ? (I)



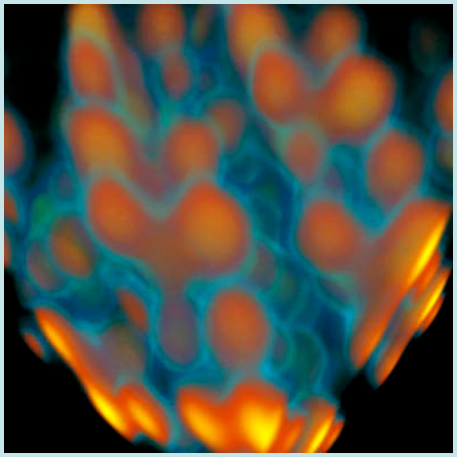
Les grandes structures ont commencé *tout* petit !!!

QUID DES ETOILES DES GALAXIES DES GRANDES STRUCTURES DE L'UNIVERS ? (II)

UN MECANISME: L'INSTABILITE GRAVITATIONNELLE !

• Une surdensité locale de matière va créer un « puits de potentiel » attirant la matière.

• La gravitation, pour la matière baryonique ou noire, étant toujours attractive, c'est phénomène *instable* qui s'amplifie conduisant à une *croissance très rapide* de la surdensité !



JEANS (20's)

Mais l'Univers est en expansion !

QUID DES STRUCTURES… ? (III)

QUID DE L'INSTABILITE GRAVITATIONNELLE DANS UN UNIVERS EN EXPANSION

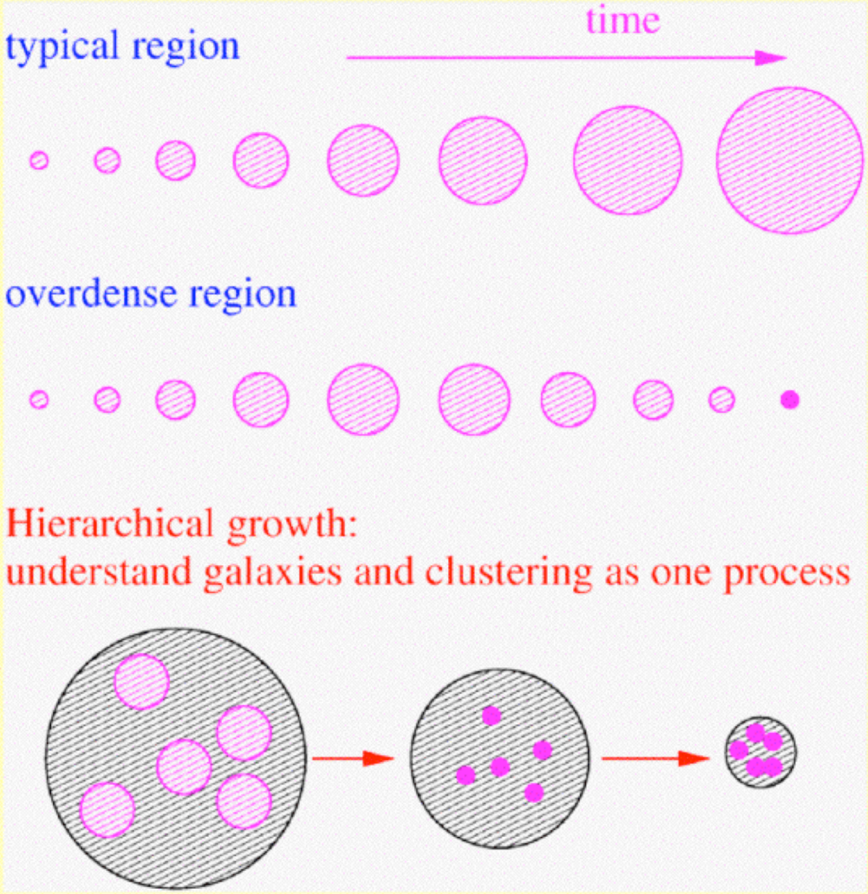
IL Y A COMPETITION ENTRE L'EXPANSION UNIVERSELLE ET L'EFFONDREMENT LOCAL !!

LA CROISSANCE DE LA SURDENSITE LOCALE EST BEAUCOUP MOINS EFFICACE

EFFICACE SI:

$t_{COLLAPSE} < t_{EXP}$

LIFSHITZ (40's)



Gravitational instability:

hierarchical collapse generates ever larger structures

QUID DES STRUCTURES…? (IV)

LES INGREDIENTS INDISPENSABLES POUR QUE CA MARCHE!!!!

I) L'INFLATION !!

• **Principe Cosmologique: l'Univers est (parfaitement) homogène !**

•

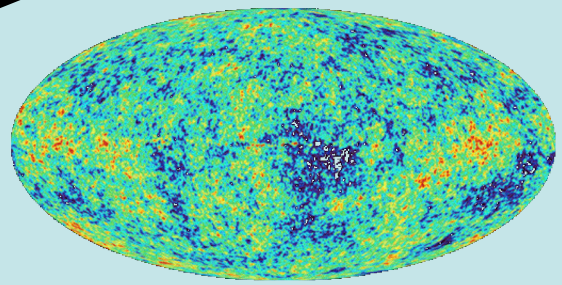
• **Dans le modèle « standard », il faut donc « mettre à la main » des inhomogénéités et leurs caractéristiques (Amplitude)**

• **Les modèles d'inflation de l'Univers primordial (vers 10^{-40} s) PREDISENT naturellement l'existence de telles inhomogénéités d'origine quantique ET de façon quantitative l'amplitude initiale ~ 10^{-5}**

LA PREUVE EXPERIMENTALE

A ces fluctuations de densité, la physique (de base) associe des fluctuations de température que les satellites COBE et WMAP ont mesurées sur le rayonnement fossile à 3 K

$$\Delta T / T \approx 10^{-5}$$



QUID DES STRUCTURES…? (IV)

LES INGREDIENTS INDISPENSABLES POUR QUE CA MARCHE!!!!

II) LA MATIERE NOIRE !!

- **La présence de fluctuations primordiales de densité est une condition nécessaire pour enclencher le processus «d'instabilité »**

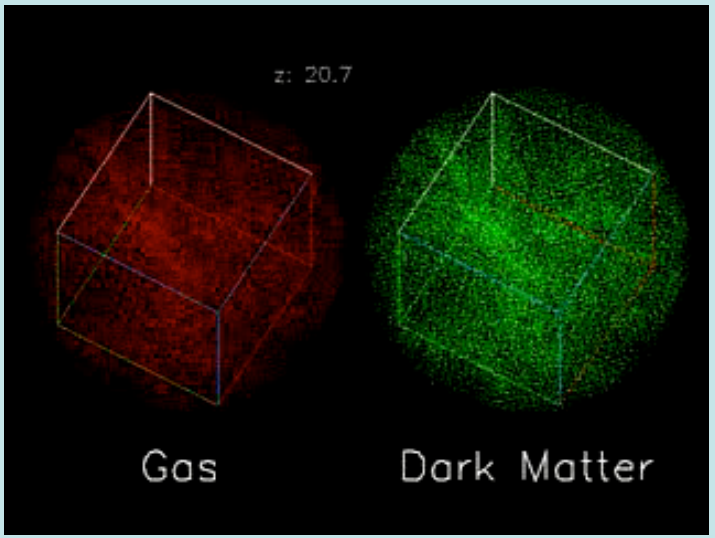
- **Mais il y a *compétition* entre *« l'expansion »* et la *« croissance »***

- **La matière baryonique seule avec son abondance n'aurait pu former les galaxies/étoiles/planètes… la vie**

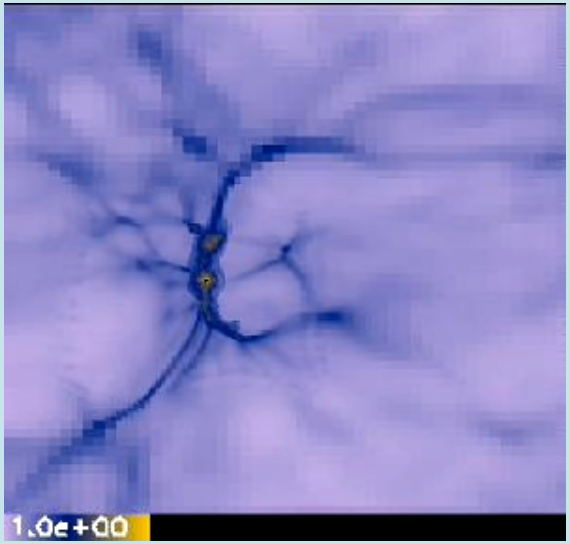
- **La présence de matière noire dominant la matière globale est le « moteur » de la croissance des fluctuations conduisant aux structures de matière ordinaire !!!**

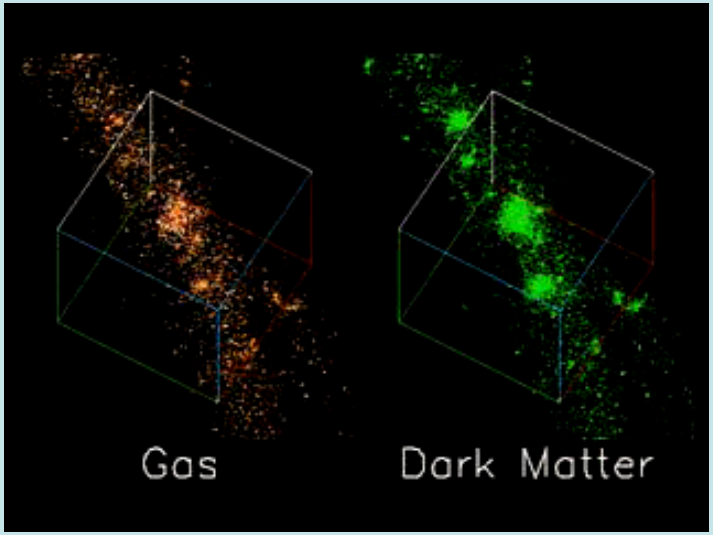
Expérience(s) sur l'Univers!!
Des millions de particules (baryons + MN) dans un ordinateur
Gravitation + Hydrodynamique + Rayonnement….

Evolution matière noire et matière baryonique au cours du temps cosmique



La 1ère étoile dans l'Univers





CONCLUSIONS

- **UN MODELE COSMOLOGIQUE BASE SUR LA PHYSIQUE LA PLUS FONDAMENTALE :**

RELATIVITE GENERALE,

MECANIQUE QUANTIQUE,

PHYSIQUE DES PARTICULES

ET L'ASTROPHYSIQUE

CONCLUSIONS

- **UN MODELE COSMOLOGIQUE DESCRIPTIF ET PREDICTIF CAPABLE DE RENDRE COMPTE:**
  - **DE LA FORMATION DES PARTICULES, DE LA MATIERE Y COMPRIS « NOIRE » ET DE SA CHRONOLOGIE**
  - **DES ELEMENTS (LEGERS ET LOURDS) NECESSAIRES A EXPLIQUER L'UNIVERS OBSERVABLE DONT LAVIE**
  - **DES GRANDES STRUCTURES COMME NOTRE VOIE LACTEE, NOTRE SOLEIL ET SES PLANETES *ET LEURS MILLIARDS DE MILLIARDS DE SEMBLABLES DANS L'UNIVERS***

CONCLUSIONS

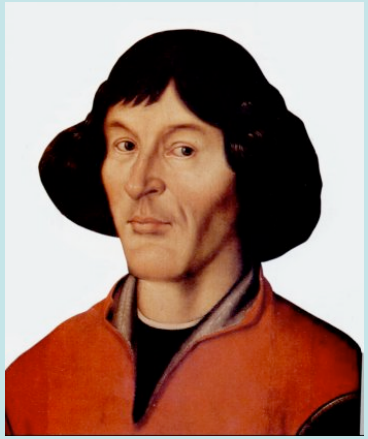
- ***UNE SCIENCE QUI CONDUIT, COMME L'ASTRONOMIE ET LA PHYSIQUE L'ONT FAIT AU COURS DES SIECLES PASSES A DE NOUVELLES « REVOLUTIONS COPERNICIENNES »***

  - **LA TERRE/ LE SOLEIL/LA VOIE LACTEE NE SONT PAS AU CENTRE DE L'UNIVERS**

  - **LA MATIERE EST DOMINEE PAR DES PARTICULES D'UNE NATURE DIFFERENTE DE CELLE QUI COMPOSE « *NOTRE* » UNIVERS**

  - **L'ORIGINE ET LE DESTIN DE L'UNIVERS SERAIENT LIES AU « VIDE QUANTIQUE »**

  - **L'EXISTENCE MEME DE CE QUI NOUS ENTOURE (DONT LA VIE) SERAIT *INEXPLICABLE* SANS LES ROLES JOUES PAR L'INFLATION ET LA MATIERE NOIRE !**



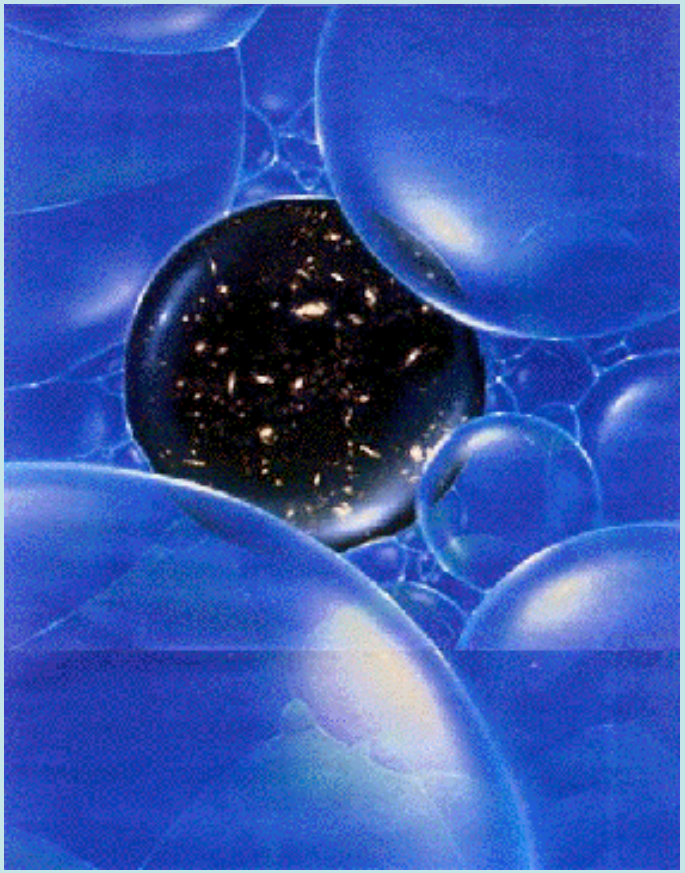
COPERNIC
1473- 1543

UNE REVOLUTION DE PLUS: PLURIVERS ?

Avec la "cosmologie quantique", théorie à peine ébauchée et promise à de fascinants développements, se profilent des univers multiples, simultanés, sans interaction entre eux, ne différant les uns des autres que par leur géométrie, leur topologie, leurs constantes fondamentales de la physique.

Tous ces univers ne seraient que l'écume de l'Univers majuscule, lui infini et éternel, sorte d'océan bouillonnant, en transformation perpétuelle, que les physiciens appellent le "vide quantique".

giordano_bruno



Notre univers observable occuperait une "bulle" transitoire, située au sein d'une "écume » formée par toutes les bulles nées des fluctuations spontanées du vide quantique.

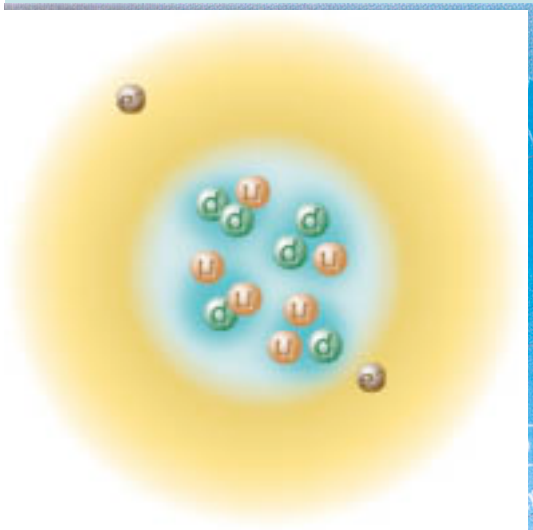
CONCLUSION
DES
CONCLUSIONS

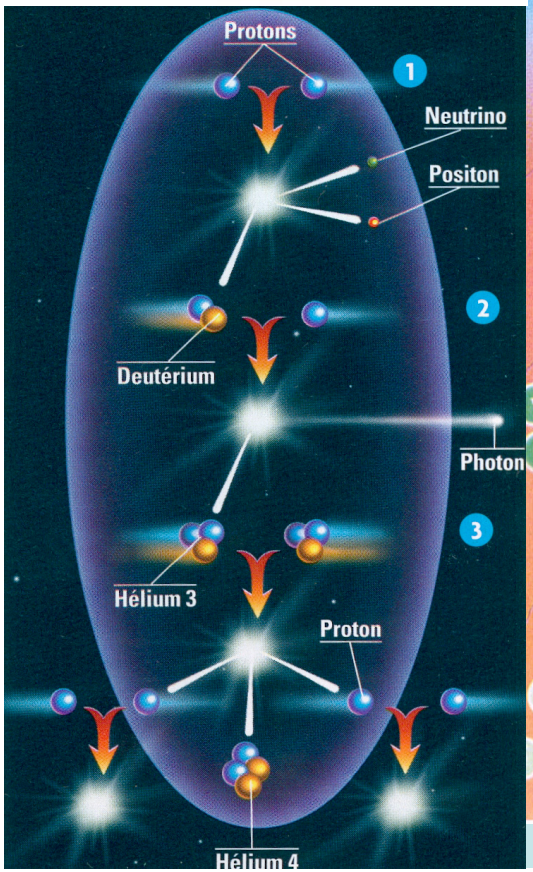
- **LA COSMOLOGIE ET LA PHYSIQUE FONDAMENTALE RENVOIENT AUX QUESTIONS QUI TOUCHENT A L'ESSENTIEL**

(« « L'ESSENCE-CIEL »»)

PENALISER LA RECHERCHE DANS CE QU'ELLE A DE PLUS FONDAMENTAL

C'EST PRENDRE LE RISQUE DE PENALISER L'EMERGENCE DE NOUVELLES REVOLUTIONS COPERNICIENNES





Le cosmos est
- **Les astres naissent vivent et meurent**
- **… et la vie apparaît**

L'univers est en route
- **Les atomes sont crées**
- **L'univers devient transparent**

Nucléosynthèse
- **Les noyaux sont crées**

Les neutrinos s'échappent

Baryogénese
- **Les protons et les neutrons sont crées**

Brisure des symétries
- **Les interactions se distinguent**
- **L'antimatière disparaît**
- **Les particules deviennent massives**