A la recherche de la matière perdue

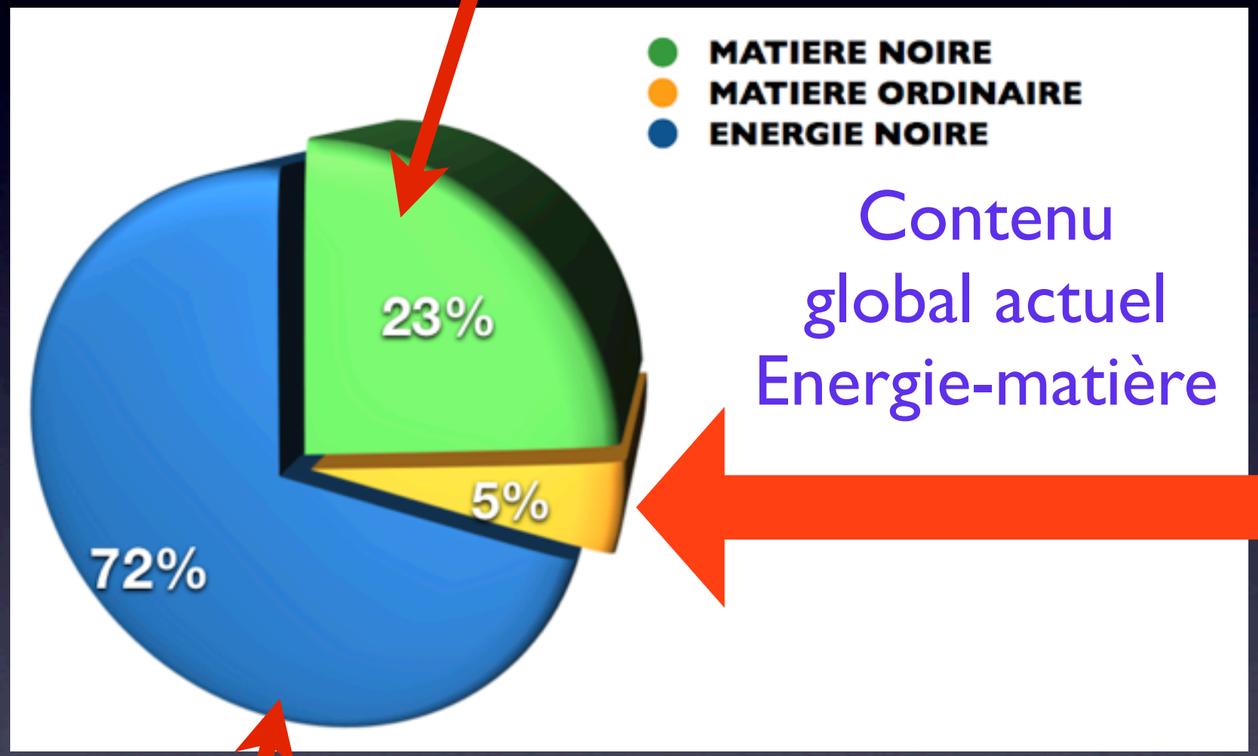
ou

La Saga des Baryons

Alain Mazure
Laboratoire d'Astrophysique de Marseille/CNRS

CPPM FEVRIER 2010

Matière noire



Contenu global actuel Energie-matière

Energie noire

BARYONS = MATIERE «ORDINAIRE»

CAR IL Y A LA MATIERE «NOIRE» ET L'ENERGIE «NOIRE»

SEULEMENT 4 A 5 %

POURQUOI S'Y INTERESSER?

POURQUOI S'Y INTERESSER?

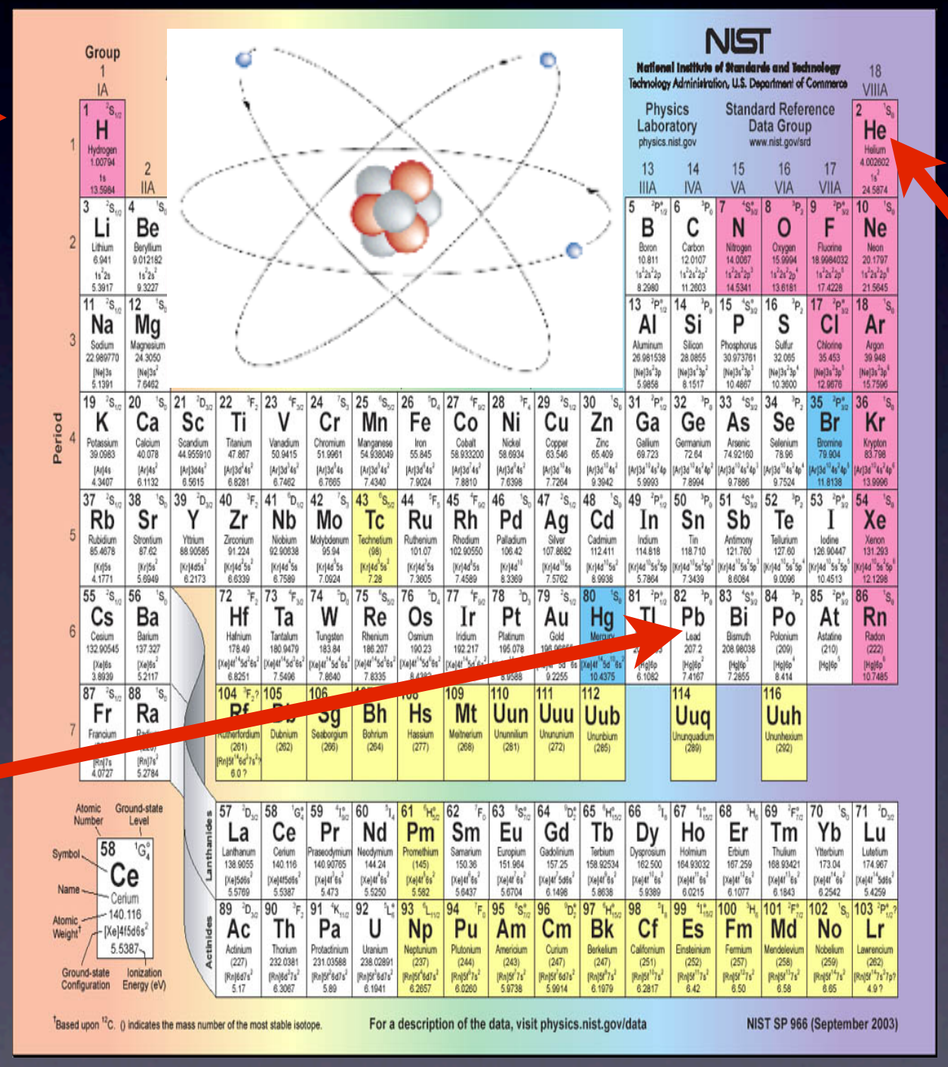
- *UNE THEORIE N'EST JAMAIS VERIFIABLE MAIS DOIT ETRE MISE EN DEFAUT OU FALSIFIABLE*
- *SUIVRE LA SAGA DES BARYONS EST UN TEST DE COHERENCE*
- *MATIERE NOIRE ASSEZ ENNUYEUSE: PUREMENT GRAVITATIONNELLE*
- *TANDIS QUE LES BARYONS... : SE METTENT SOUS FORME DE GAZ, CHAUD, FROID, CONDENSE, DIFFUS, NEUTRE, IONISE*

GAZ...TRONOMIE!

LA MATIERE ORDINAIRE REPRESENTEE DANS UN TABLEAU CELEBRE

UN TABLEAU CELEBRE

L'ELEMENT LE PLUS SIMPLE: L'HYDROGENE

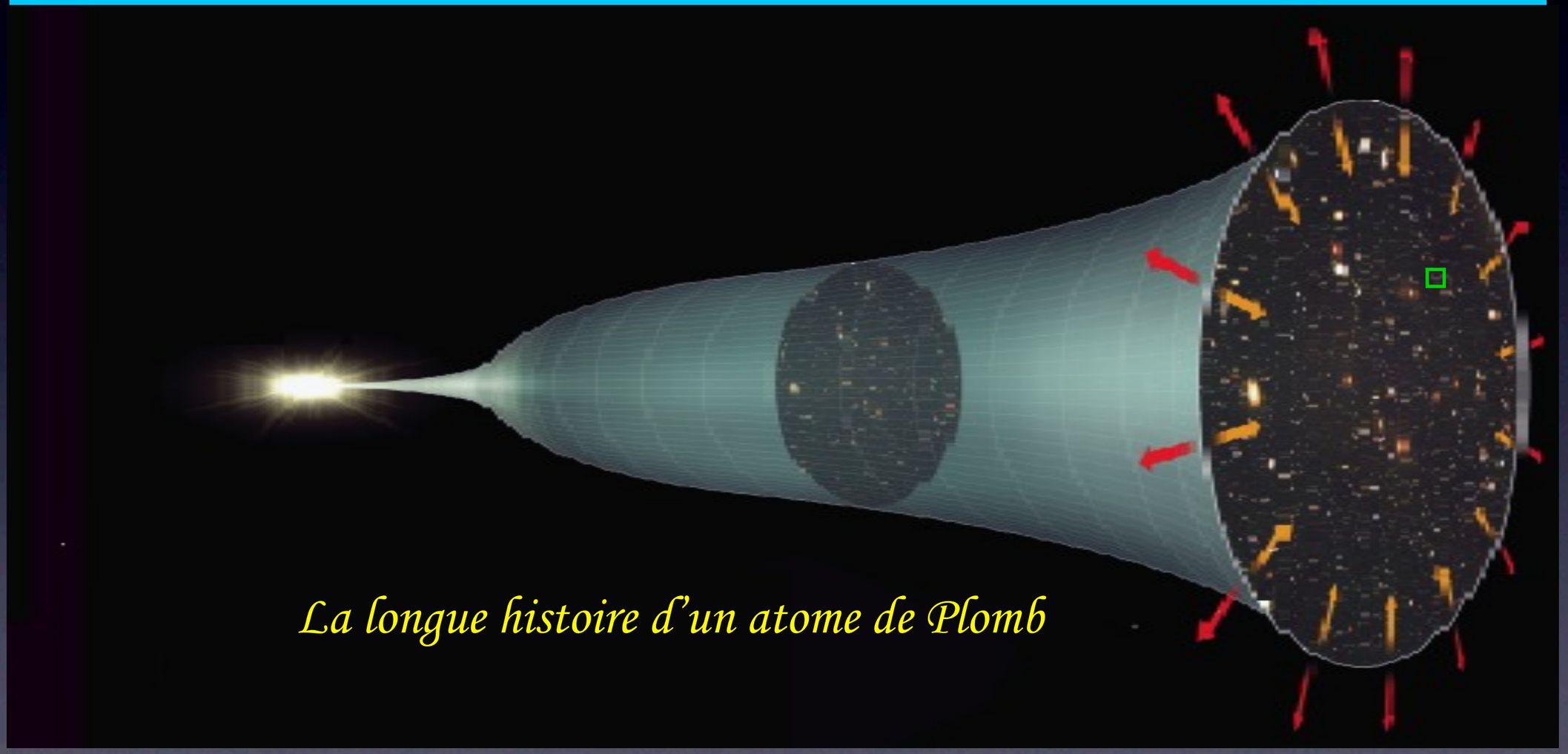


LE 2EME L'HELIUM

LE PLOMB

L’ ORIGINE DE TOUS CES ELEMENTS ?

RACONTEE PAR J. BUSTO



LE CADRE

DE CETTE SAGA

C'EST L'UNIVERS

CONTRAIREMENT A CE QUE L'ON A PENSE JUSQU'AU DEBUT DU 20EME SIECLE

L'UNIVERS, CE N'EST PAS QUE LA VOIE LACTEE...:

CE SONT DES MILLIARDS D'AUTRES GALAXIES !

UN MONDE DE GALAXIES

EN EXPANSION !

(La fuite des galaxies Hubble 1930)

ON COMPREND L'ESSENTIEL DE LA SAGA EN VOYANT L'EXPANSION DE L'UNIVERS COMME UN FILM QUI SE DEROULE

En "rembobinant" le film:
on imagine toute la matière se condenser et s'échauffer

L' UNIVERS IL YA 14 MILLIARDS D'ANNEES ETAIT
TRES TRES TRES DENSE ET CHAUD !!

Antiquark *u*

Quark *u*

Proton

Électron

Neutron

Noyau d'hydrogène

Atome d'hydrogène

Atome d'hélium

Protogalaxie

Voie lactée

Système solaire

Terre

Positon

Antiqu

Quark *d*

INFLATION

VICTOIRE DE LA MATIÈRE SUR L'ANTIMATIÈRE

DÉCOUPLAGE DES NEUTRINOS

RECOMBINAISON

APPARITION DES PREMIÈRES ÉTOILES

ACCÉLÉRATION DE L'EXPANSION

TEMPS DE PLANCK	10^{-43} seconde	10^{-32} seconde	10^{-6} seconde	3 minutes	380 000 ans	1 milliard d'années	10 milliards d'années	13.7 MILLIARDS D'ANNEES

C'est le Modèle du «Big Bang» !

Antiquark *u*

Quark *u*

Proton

Électron

Noyau d'hyd

Atome d'hydrogène

Protogalaxie

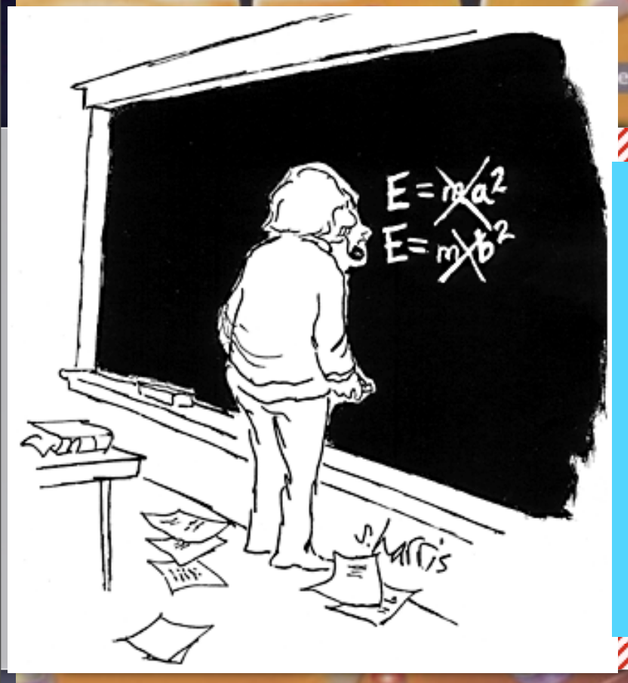
Voie lactée

Système solaire

T ~ 1/MILLIONIÈME SECONDE

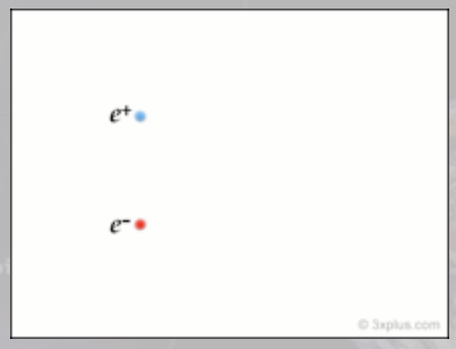
T ~ 100000 MILLIARDS DE DEGRES

INFLATION	VICTOIRE DE LA MATIÈRE SUR L'ANTIMATIÈRE	DÉCOUPLAGE DES NEUTRINOS	RECOMBINAISON	APPARITION DES PREMIÈRES ÉTOILES	ACCÉLÉRATION DE L'EXPANSION	
econde	10^{-6} seconde	3 minutes	380 000 ans	1 milliard d'années	10 milliards d'années	13,7 milliards d'années



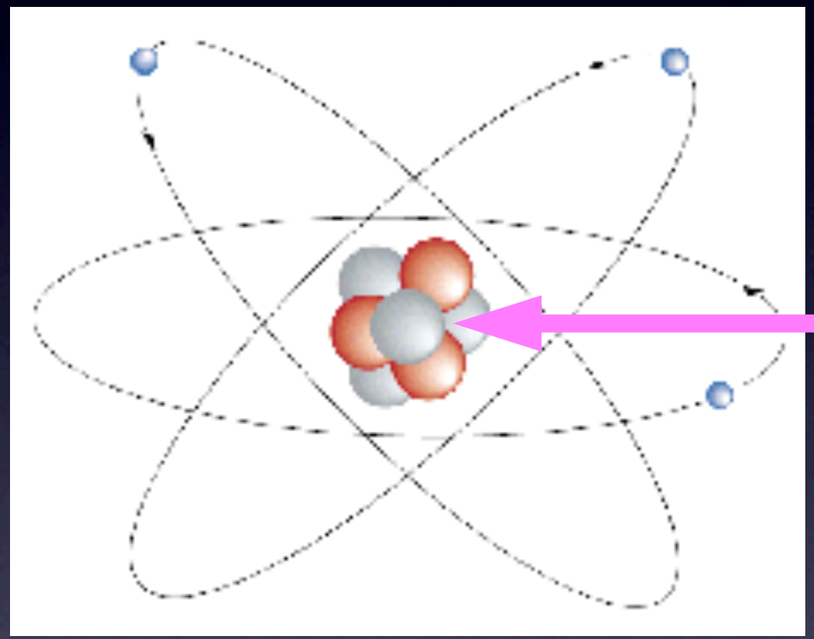
BON SANG MAIS C'EST BIEN SUR

$$E = MC^2$$



MATIERE = ENERGIE

ENERGIE = MATIERE



TOUS

LES PROTONS, NEUTRONS

QUI VONT COMPOSER LES ATOMES

ONT ETE CREES

DANS L'UNIVERS PRIMORDIAL !

Antiquark *u*

Quark *u*

Proton

Électron

Noyau d'hydrogène

Atome d'hydrogène

Atome d'hélium

Protogalaxie

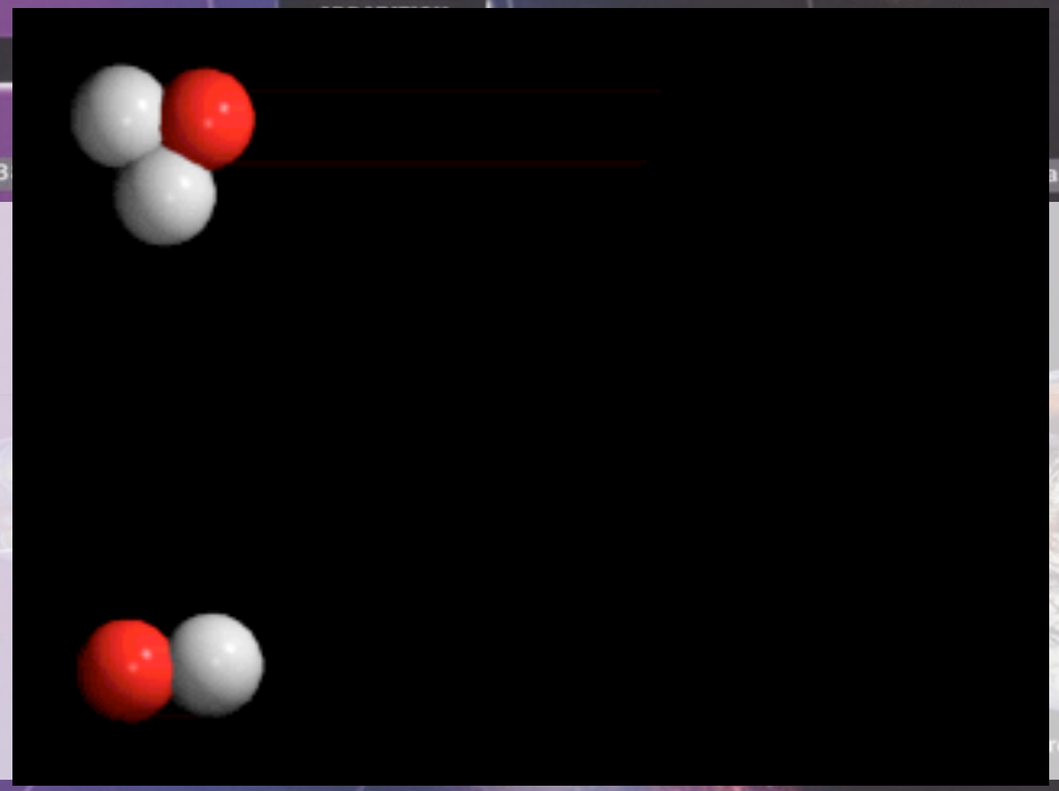
Voie lactée

Système solaire

$$T \approx 80\ keV \approx 10^9\ K; t = 200\ s$$

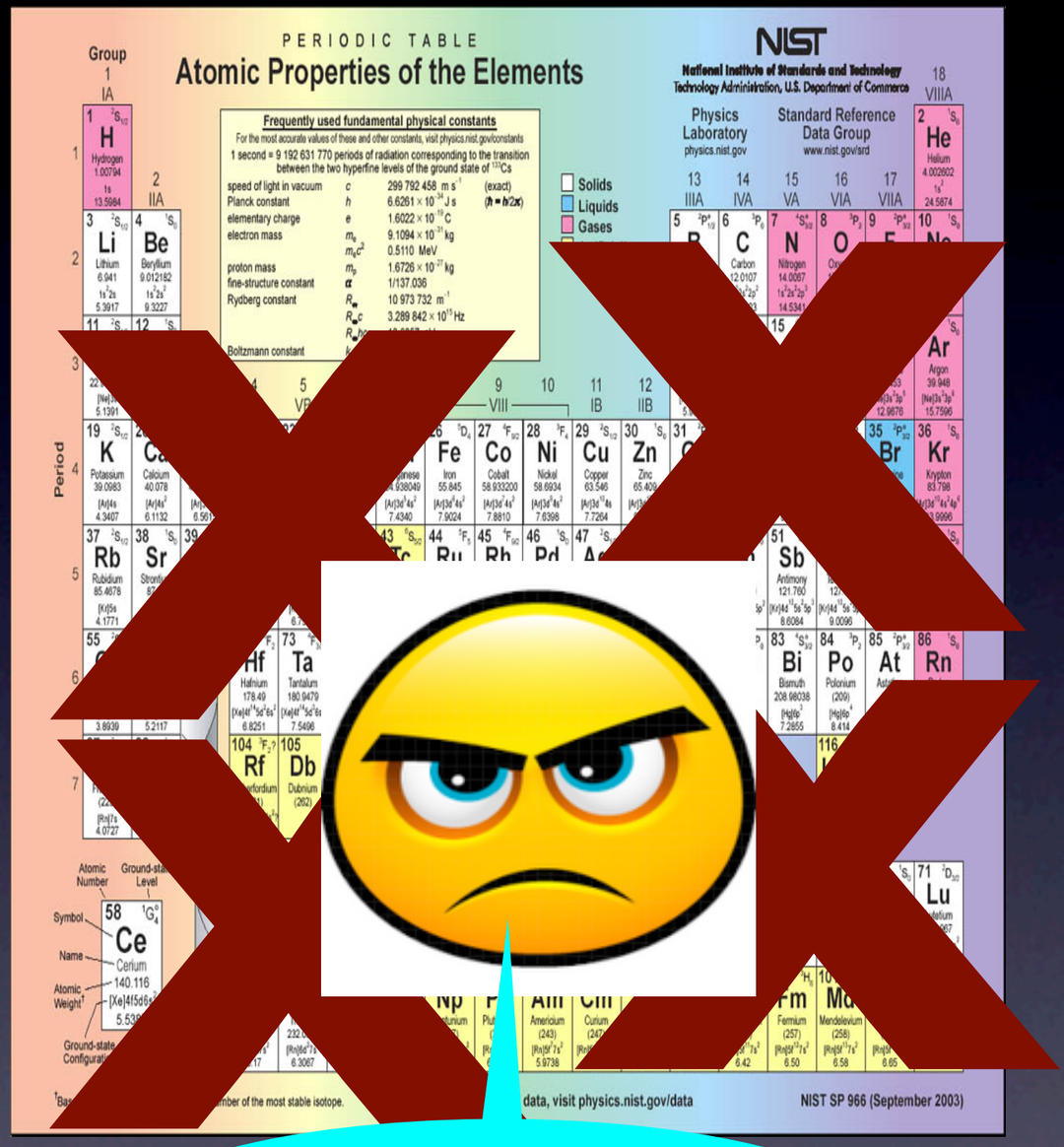
10^{-43} seconde | 10^{-32} seconde | 10^{-6} seconde | 3 minutes | 3 | années

ON A UNE «SOUPE»DE PROTONS/NEUTRONS...
ET
L'ALCHIMIE COSMIQUE
PEUT COMMENCER



EN FAIT
CA S'ARRETE A
L'ELEMENT NUMERO
4
AU BOUT DE
~ 3 MINUTES!!

ESSENTIELLEMENT
DES NOYAUX
D'HYDROGENE
ET D'HELIUM
+
DES ZESTES DE
NOYAUX DE
LITHIUM ET
BERYLLIUM

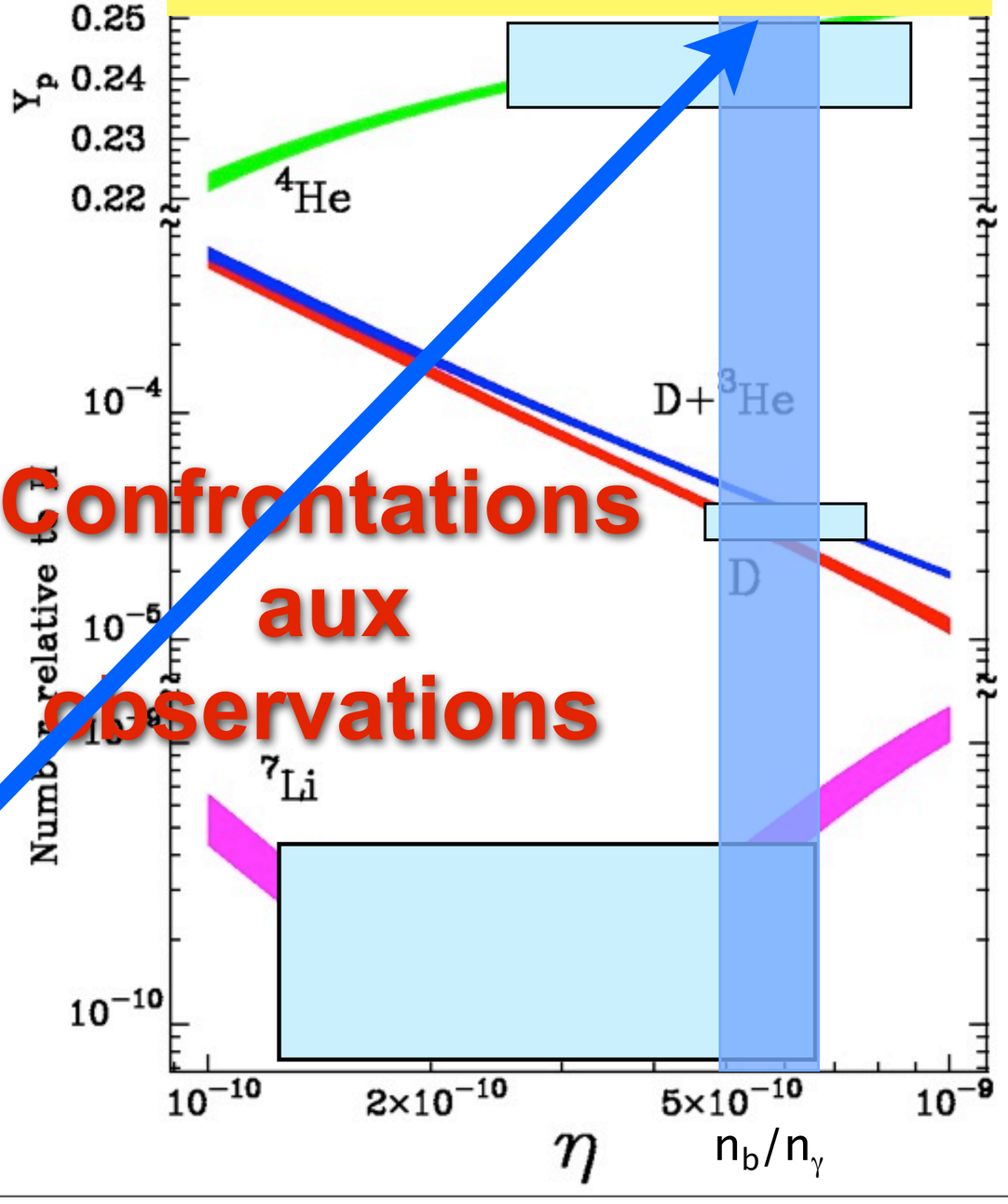


D'où vient le reste?

- **PROCESSUS REGIS PAR LA PHYSIQUE NUCLEAIRE QUI EST «BONNE MERE» AVEC LES COSMOLOGISTES**

ELLE NOUS APPREND QUE LA PROPORTION D'HYDROGENE ET D'HELIUM DEPEND DE LA QUANTITE TOTALE DE MATIERE ORDINAIRE

Matière ordinaire = 4%



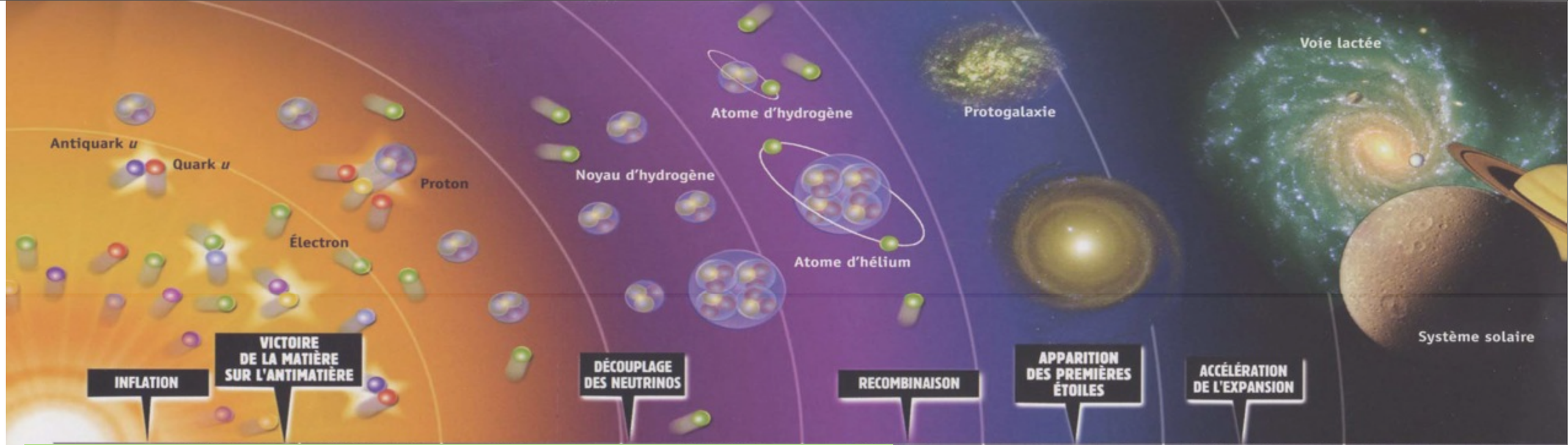
Confrontations aux observations

NOUS SAVONS DONC OU ET QUAND ILS SE SONT FORMES

ET COMBIEN!

QU' ARRIVE T-IL ENSUITE A CES «BARYONS»?

SUIVONS LES AU COURS DU TEMPS COSMIQUE



EN FAIT, APRES CES 3 «1eres MINUTES» IL NE SE PASSE PAS GRAND CHOSE ..... JUSQU'A ~ 300000 ANS !

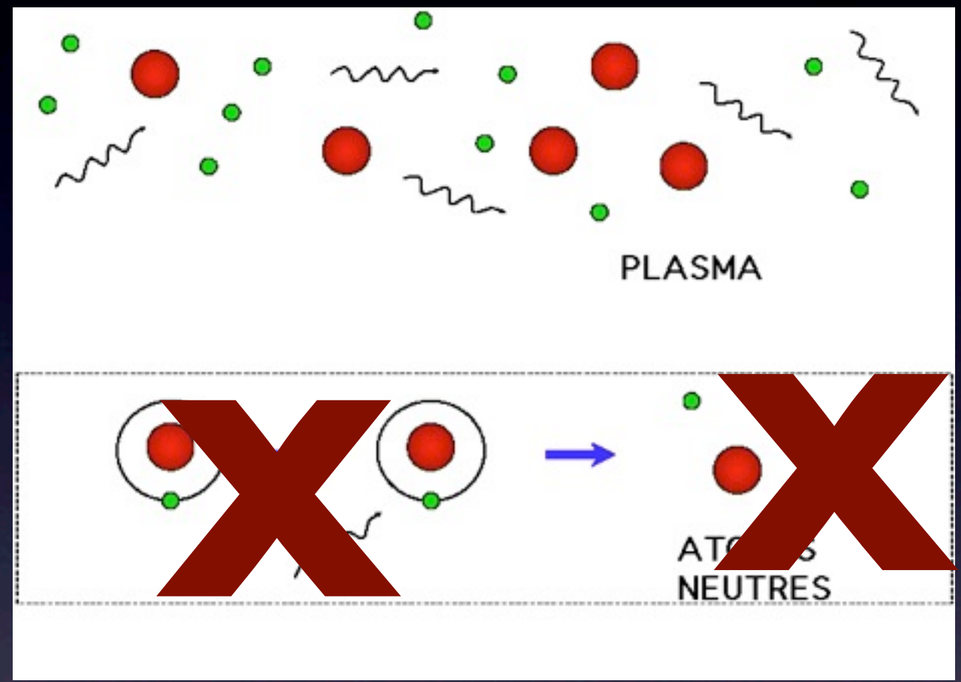
L'UNIVERS SE REFROIDIT

A CAUSE DE L'EXPANSION

$$T \approx 3000^{\circ}K, \quad t \approx 380000$$

Les premiers atomes peuvent se former !

- **JUSQU'A CE MOMENT LÀ, LA «SOUPE » EST CONSTITUEE DE NOYAUX D'HYDROGENE ET D'HELIUM**



- **MAIS C'EST TELLEMENT CHAUD QUE CETTE MATIERE EST SOUS FORME DE PLASMA**

- **DANS CET ETAT, PARTICULES DE MATIERE ET PARTICULES DE RAYONNEMENT SONT INTIMEMENT LIEES**

A ~ 300 000 ANS, LA TEMPERATURE

EST ASSEZ «BASSE» (3000 K)

POUR QUE LES NOYAUX ET LES

ELECTRONS SE REUNISSENT

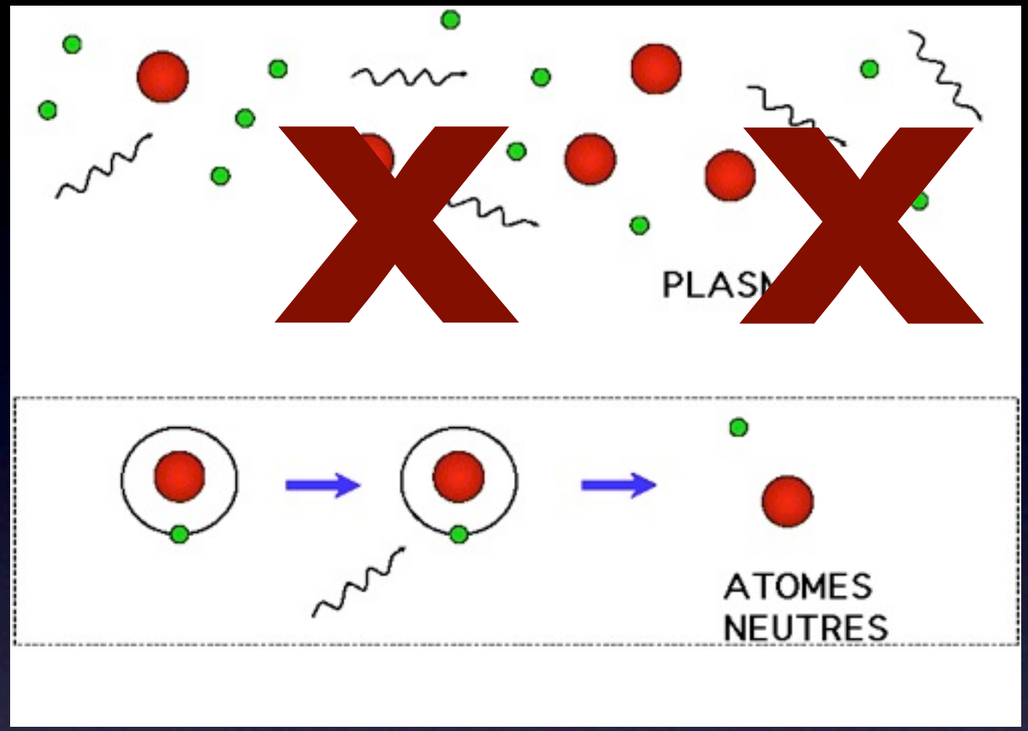
POUR

LA 1ERE FOIS

ET FORMENT DES

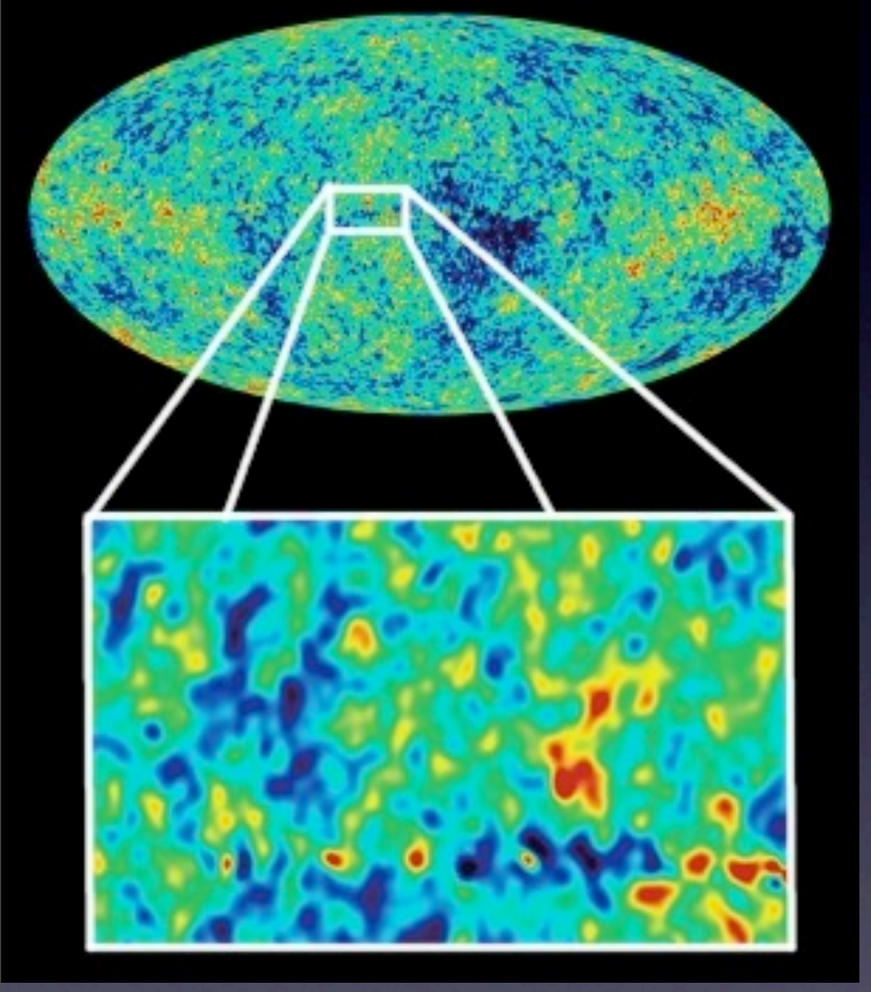
ATOMES

D'HYDROGENE ET D'HELIUM...



MATIERE ET RAYONNEMENT SE *"DECOUPLENT"*

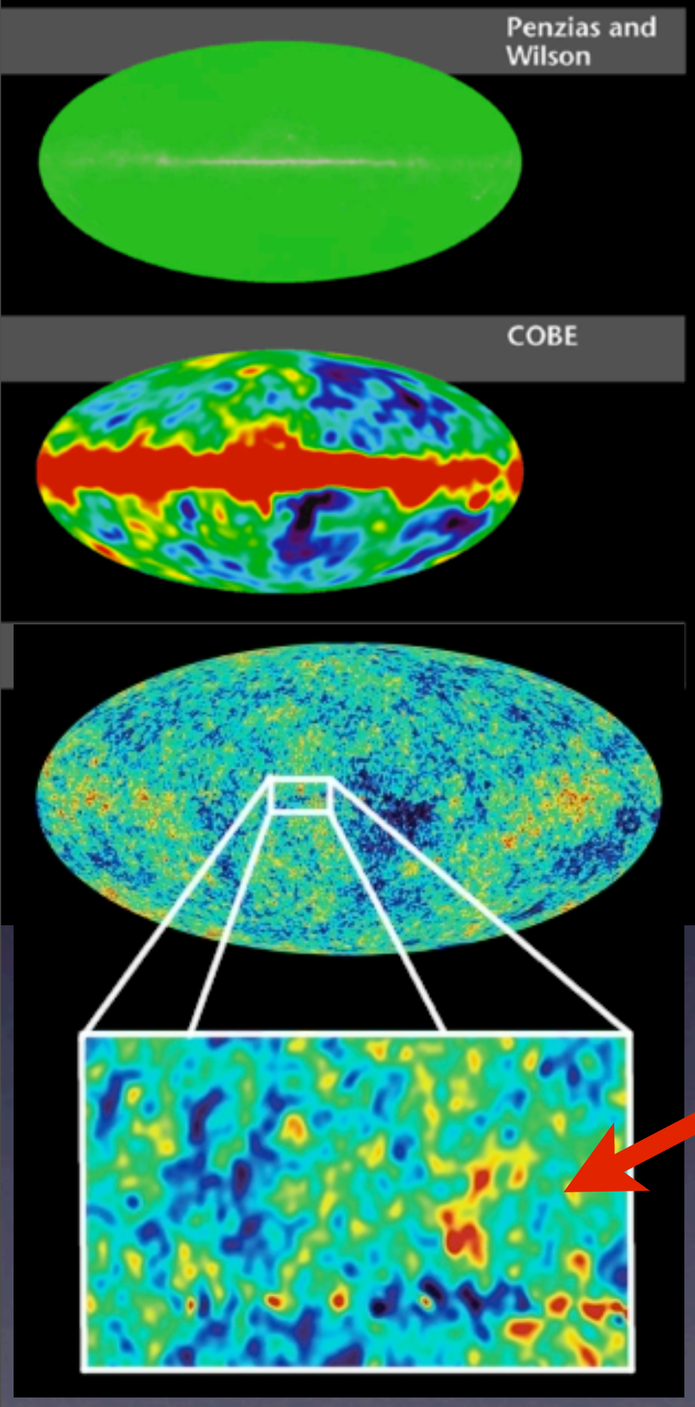
CAR LES PHOTONS NE PEUVENT PLUS "JOUER " AVEC LES ATOMES NEUTRES



CETTE TRANSITION LAISSE UNE TRACE FOSSILE!

ON OBSERVE CE RAYONNEMENT QUI A GARDE LA TRACE DE LA TEMPERATURE A CETTE EPOQUE (MODULO L'EXPANSION)

LE RAYONNEMENT COSMOLOGIQUE A T = 3K

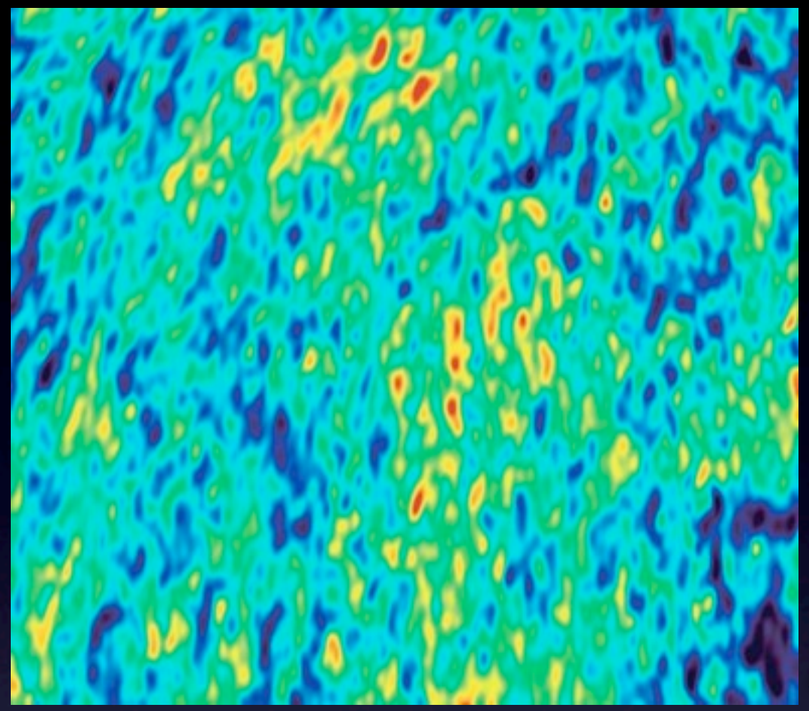


CE «DECOUPLAGE» SE PRODUIT PARTOUT DE LA MEME MANIERE SI LA «SOUPE» EST BIEN UNIFORME

LA TEMPERATURE DOIT DONC ETRE LA MEME DANS TOUTES LES DIRECTIONS (C'EST CE QU'ON MESURE!)

ENFIN PRESQUE ! ***CAR IL Y AVAIT DES TOUS PETITS GRUMEAUX DANS CETTE SOUPE (1/100000 EME)***

QUI DONNENT DES PETITES VARIATIONS DE TEMPERATURE QU'ON A REUSSI A MESURER!



UNE ETUDE FINE DE LA REPARTITION

DE CES PETITES VARIATIONS

MESURE LA QUANTITE TOTALE DE BARYONS

A ~ 300000 ANS

LE COMPTE EST BON!!!

4% !

Antiquark *u*

Quark *u*

Proton

Électron

Noyau d'hydrogène

Atome d'hydrogène

Atome d'hélium

Protogalaxie

Voie lactée

Système solaire

INFLATION

VICTOIRE DE LA MATIÈRE SUR L'ANTIMATIÈRE

DÉCOUPLAGE DES NEUTRINOS

RECOMBINAISON

APPARITION DES PREMIÈRES ÉTOILES

ACCÉLÉRATION DE L'EXPANSION

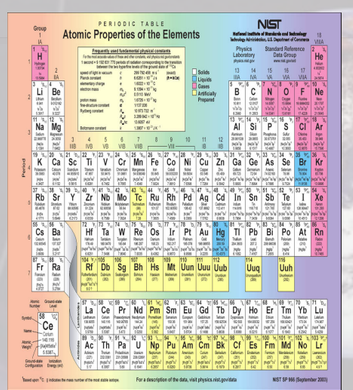
80 000 ans | 1 milliard d'années | 10 milliards d'années | 13,7 milliards d'années

APRES 300 000 ANS, L'UNIVERS CONTINUE DE SE REFROIDIR

AU BOUT DE QUELQUES MILLIONS D'ANNEES, LES «GRUMEAUX» DE MATIERE VONT EN FAIT FORMER LES 1ERES ETOILES, LES 1ERES GALAXIES, LES 1ERS QUASARS

+

=



FER

LE RESTE

- **On a enfin formé tous les éléments du tableau!**

- **«Si vous voulez faire une tarte aux pommes à partir de rien, il vous faudra d'abord créer l'univers.» [Carl Sagan].**

- **Mais attention à la digestion! transformation.... de l'hydrogène en tarte en pommes**

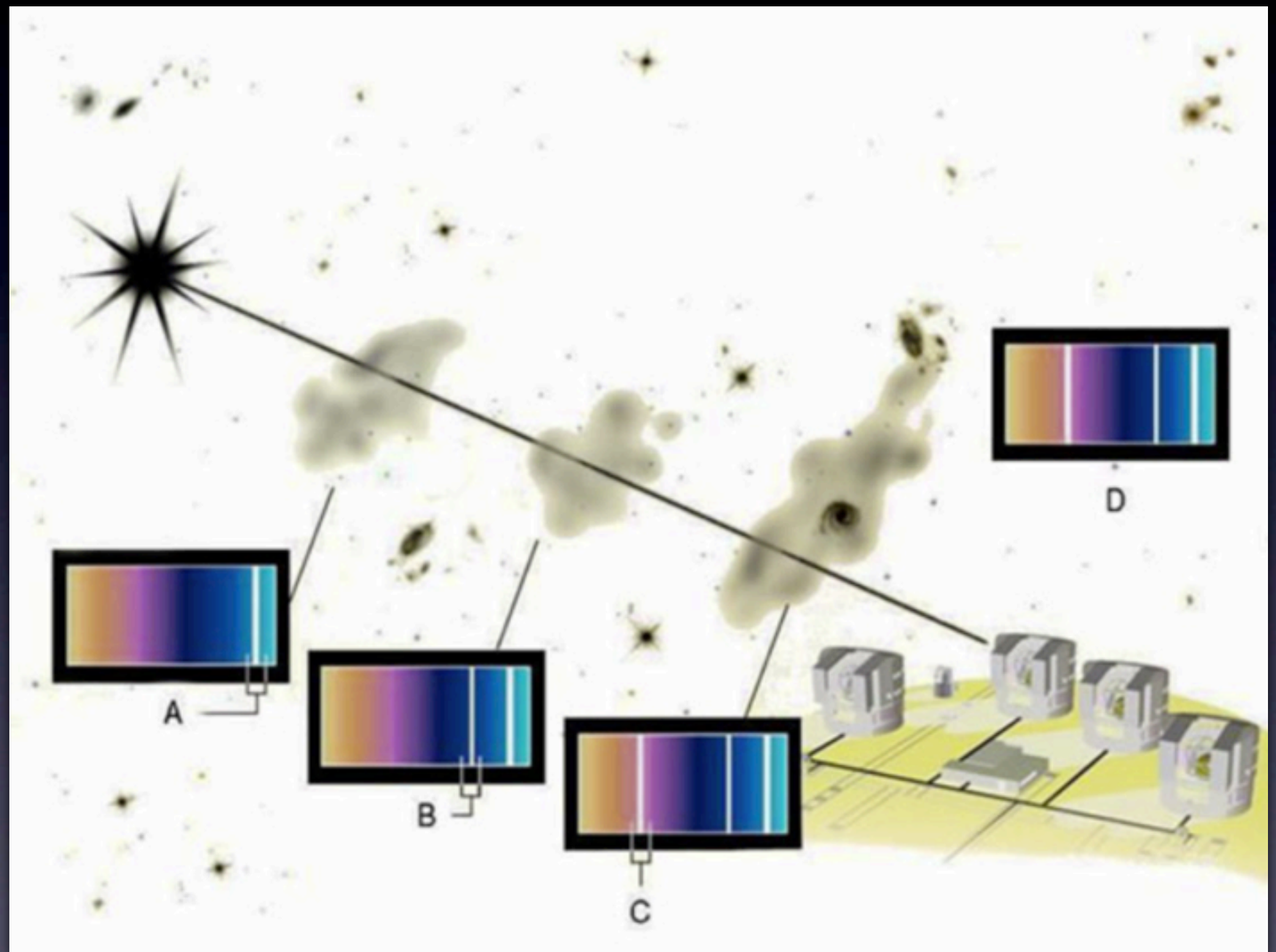
REVENONS AUX 1ERES ETOILES, QUASARS...

RETROUVE T-ON TOUTE LA MATIERE

DANS CES PREMIERS

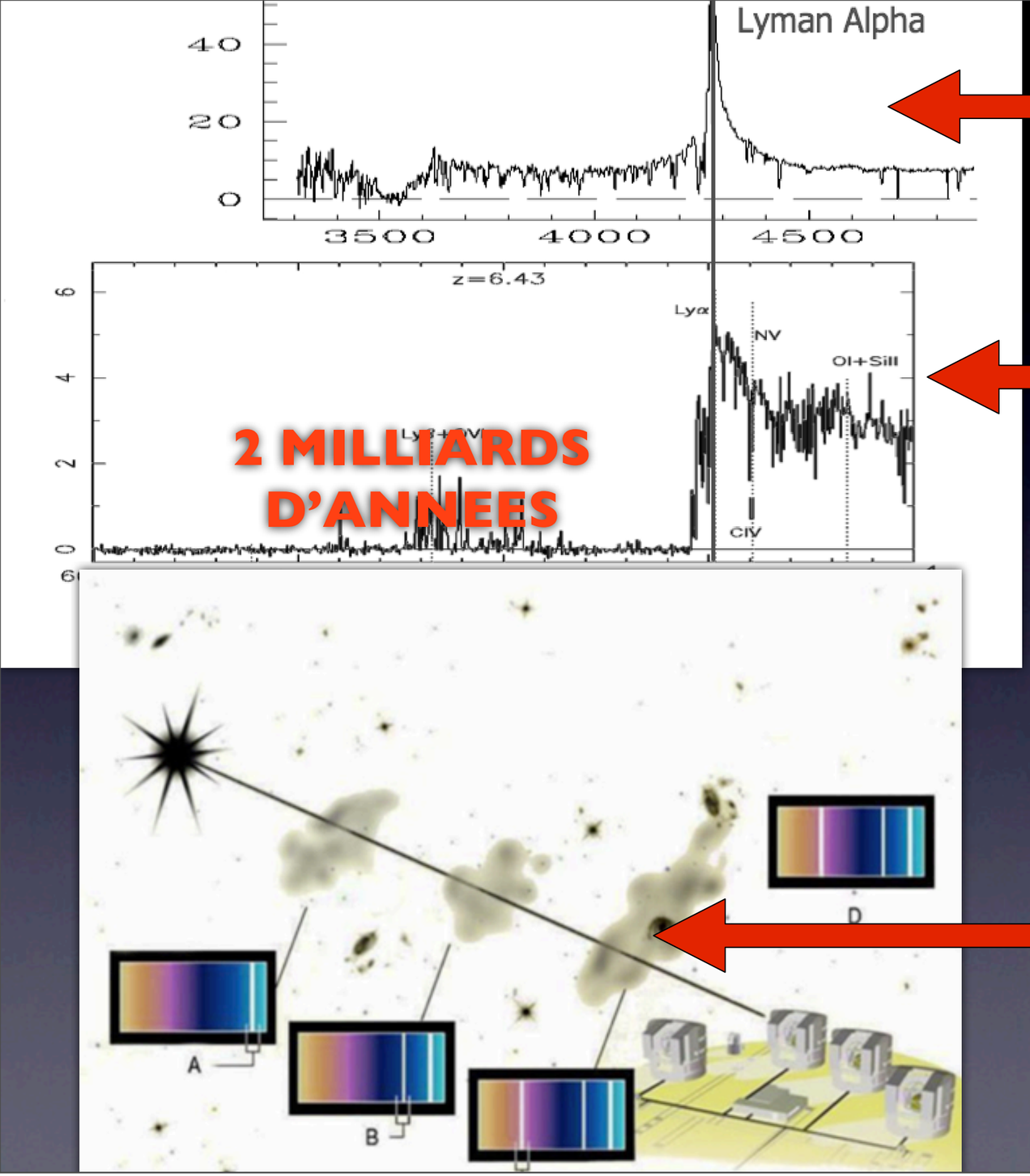
ASTRES LUMINEUX?

DEMANDONS JUSTEMENT AUX QUASARS ...



Astres très brillants : visibles de très loin

DES PHARES COSMIQUES QUI PERMETTENT DE SONDER LE COSMOS !!



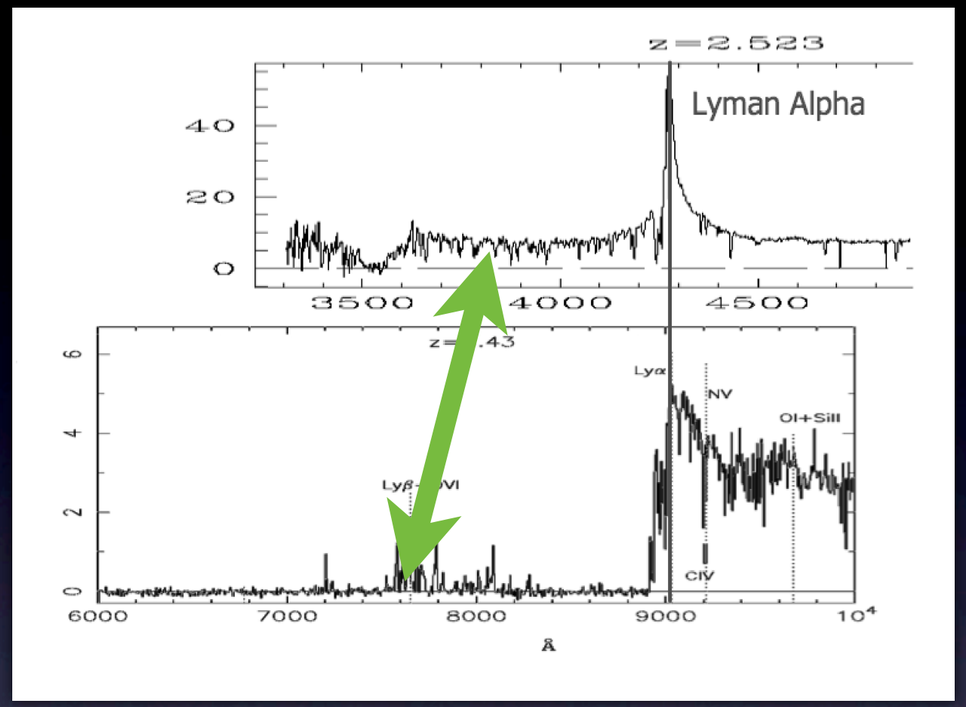
2 MILLIARDS D'ANNEES

SI ON COMPARE LE RAYONNEMENT D'UN QUASAR PROCHE

A CELUI D'UN QUASAR AYANT UN ÂGE DE 2 MILLIARDS D'ANNEES

ON CONSTATE QU'UNE PARTIE DU RAYONNEMENT «MANQUE»

IL A ETE ABSORBE PAR LA PRESENCE DE NUAGES



SI L'ON MESURE LA QUANTITE DE MATIERE DANS CES NUAGES + CELLE DES QUASARS EUX MEMES

LE *COMPTE EST DE NOUVEAU BON* A 2 MILLIARDS D'ANNEES!

300000 ANS: OK

2 MILLIARDS D'ANNEES: OK

AU VU DE CES SUCCES

QUID

D'AUJOURD'HUI?

APRES 14 MILLIARDS D'ANNEES
DE NOUVELLES GALAXIES SE SONT FORMEES

RETROUVE T-ON

DE NOUVEAU

TOUS

LES BARYONS ?

- AUJOURD'HUI SIGNIFIE L'UNIVERS PROCHE!

  COMPTER LES ETOILES DE LA VOIE LACTEE?

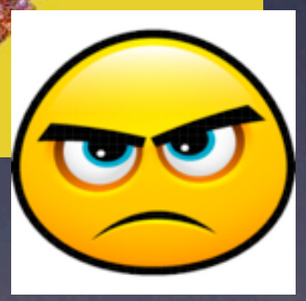
  HIPPARQUE EN A COMPTE QQ CENTAINES!

- TROP PROCHE, TROP GRANDE SUR LE CIEL (COMME UNE FORET)

- IL FAUT, COMME POUR UN SONDAGE ELECTORAL,

  UN ECHANTILLON «REPRESENTATIF»

«UN PANEL DE GALAXIES!»



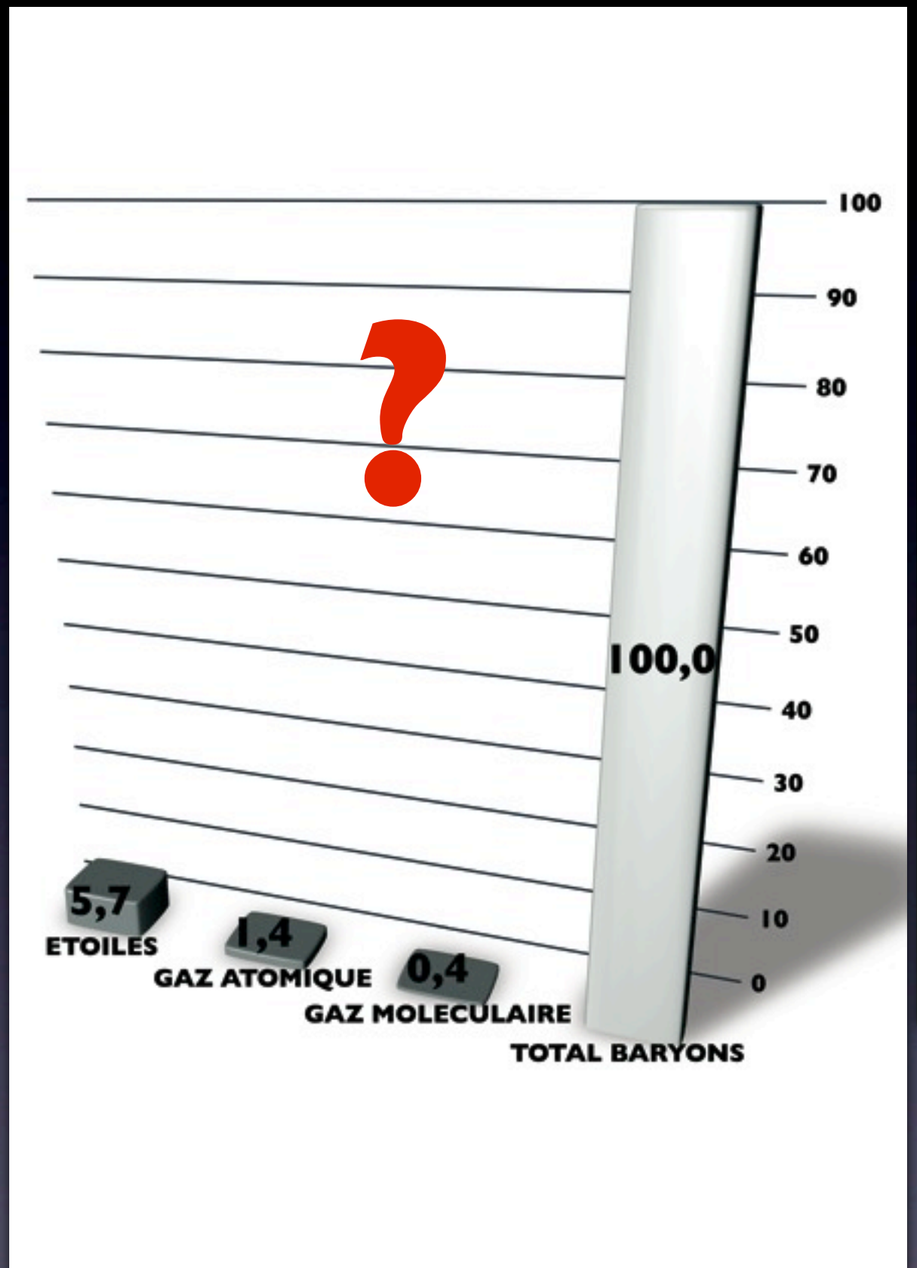
ON MESURE L'ECLAT DES GALAXIES (AVEC DES MACHINES)

ON SAIT RELIER L'ECLAT D'UNE GALAXIE A SA MASSE

DONC A LA QUANTITE DE MATIERE LUMINEUSE

DECEPTION

LE COMPTE N'EST PAS BON!!!



MEME EN RAJOUTANT LES POUSSIERES QU'ON VOIT PAR EXEMPLE DANS LA VOIE LACTEE

OU EST CETTE MATIERE ??

UNE PARTIE DANS LES AMAS DE GALAXIES!.....

1949

2000

MAIS IL A FALLU ATTENDRE

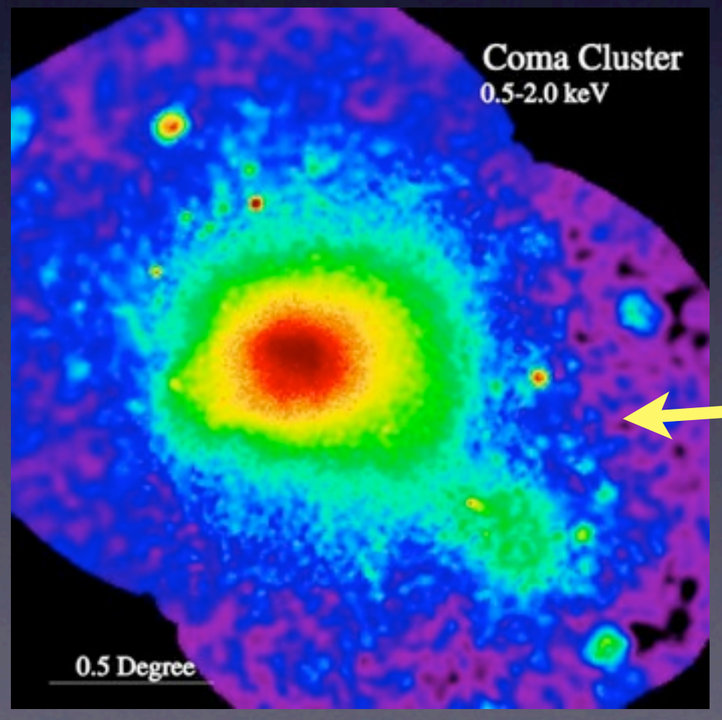
L'ERE SPATIALE

POUR DETECTER

CETTE CONTRIBUTION !

DECOUVERTE DES ANNEES 70

EN FAIT, AU COURS DE CES MILLIARDS D'ANNEES UNE PARTIE DES GALAXIES S'ASSEMBLENT EN AMAS



CES GIGANTESQUES CONCENTRATIONS PIEGENT LE GAZ NON UTILISE ET QUI DEVIENT TRES CHAUD

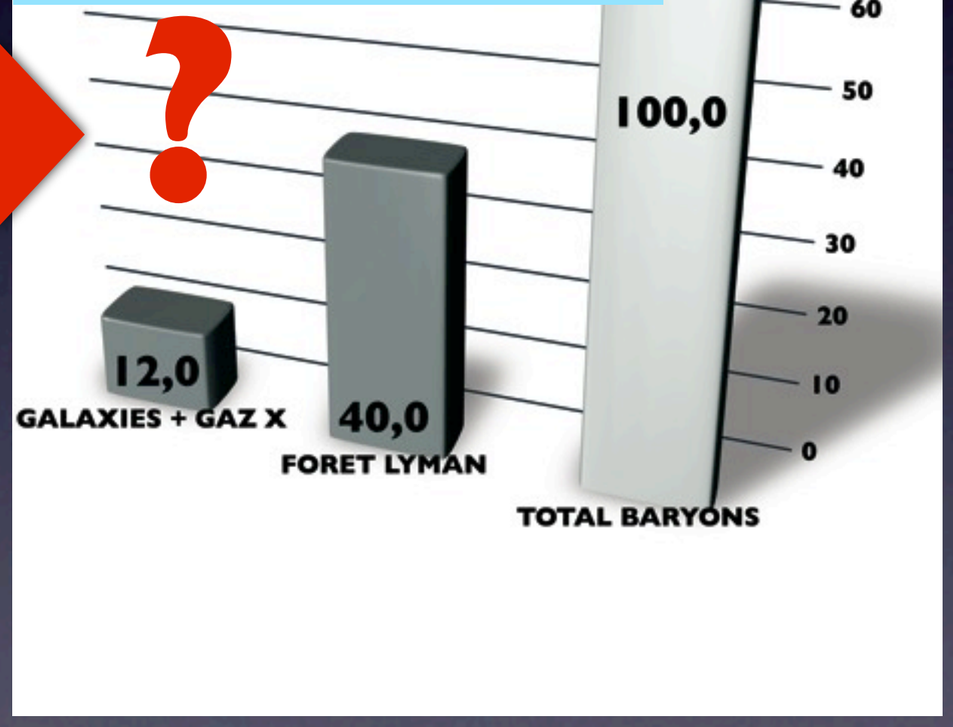
TELLEMENT CHAUD QU IL EMET NON DE LA LUMIERE MAIS DES RAYONS X!!

ON RAJOUTE DES NUAGES DE GAZ FROID COMME CEUX DETECTES A 2 MILLIARDS D'ANNEES AVEC LES QUASARS

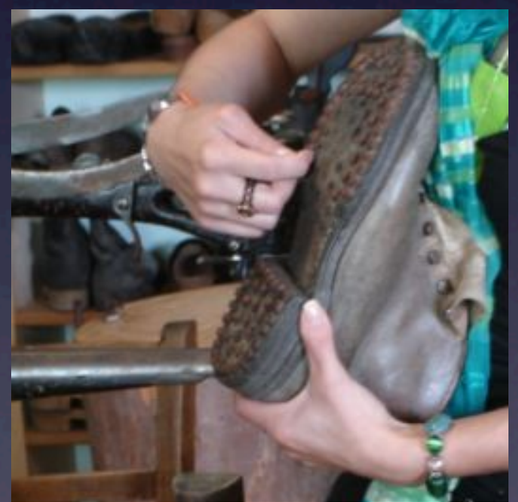
MAIS IL EN MANQUE ENCORE PRES DE LA MOITIE !!!

OU EST LA MATIERE PERDUE?

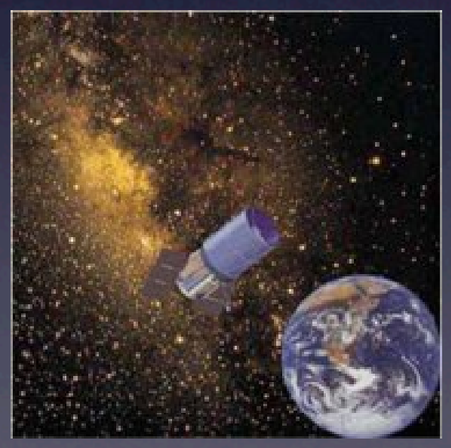
GALAXIES + GAZ X DES AMAS + NUAGES DE GAZ FROID



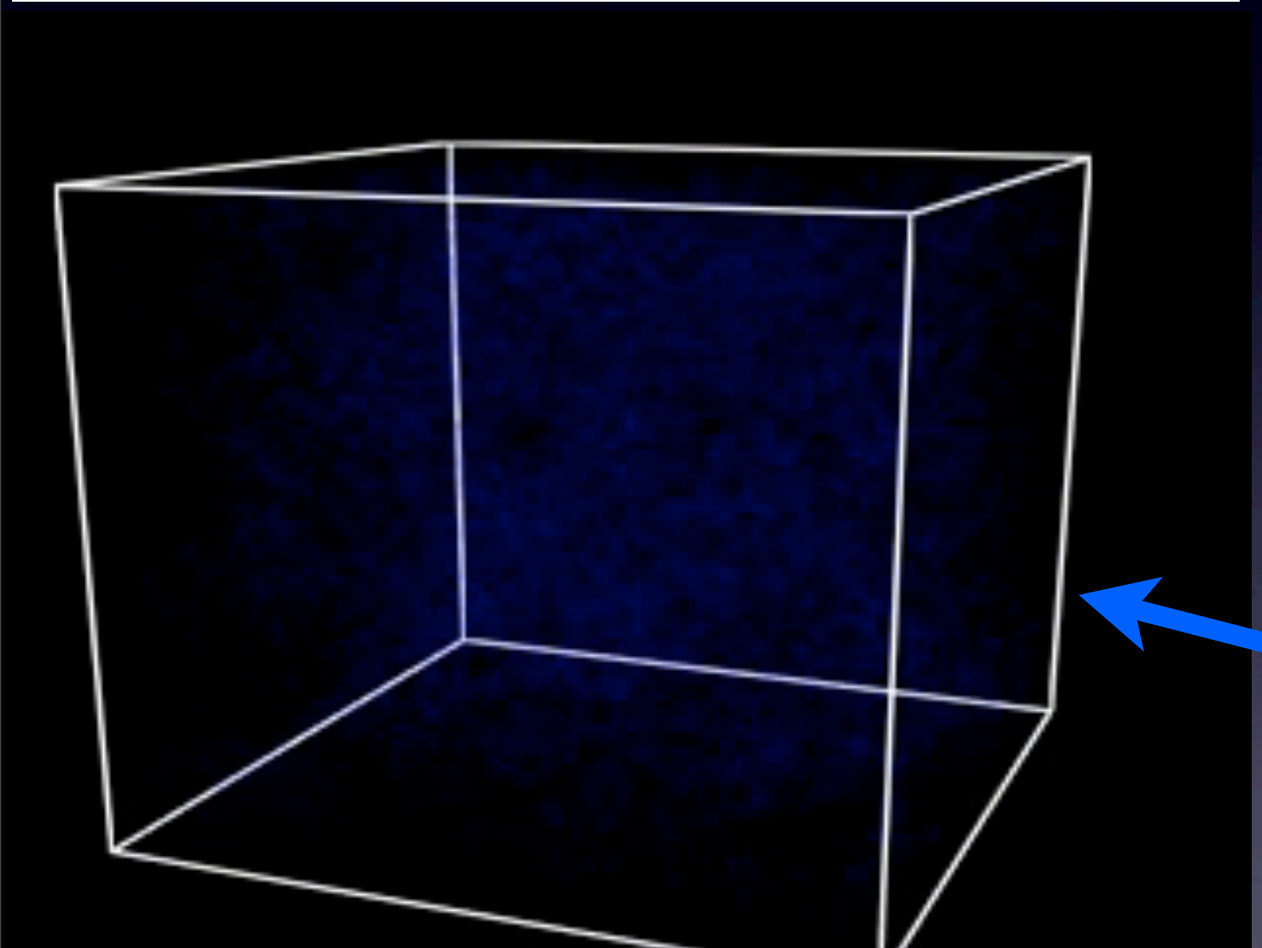
UN CLOU DANS LA CHAUSSURE DES ASTRONOMES



LA REPONSE EST VENUE EN PARTIE GRACE A LA MONTEE EN PUISSANCE DES ORDINATEURS



L'UNIVERS DANS UN ORDINATEUR!



UNE «SOUPE» DONT LES INGREDIENTS SONT:

-LA FAMEUSE MATIERE NOIRE

+

-LES BARYONS

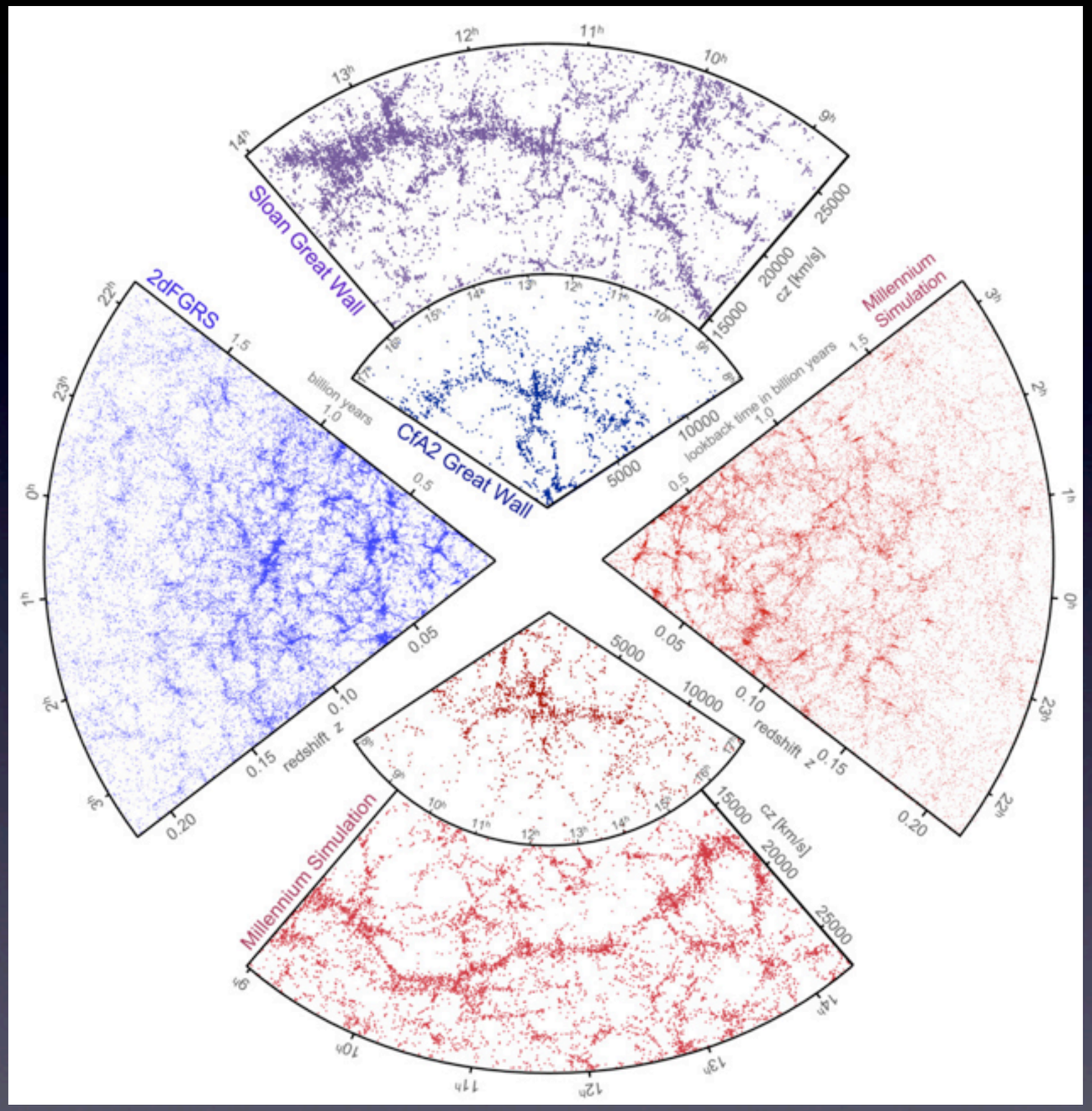
MAIS LA «SOUPE DE MATIERE» A DES «GRUMEAUX»

CES «GRUMEAUX» VONT CROITRE SOUS L'EFFET DE LEUR PROPRE GRAVITATION EN DEPIT DE L'EXPANSION

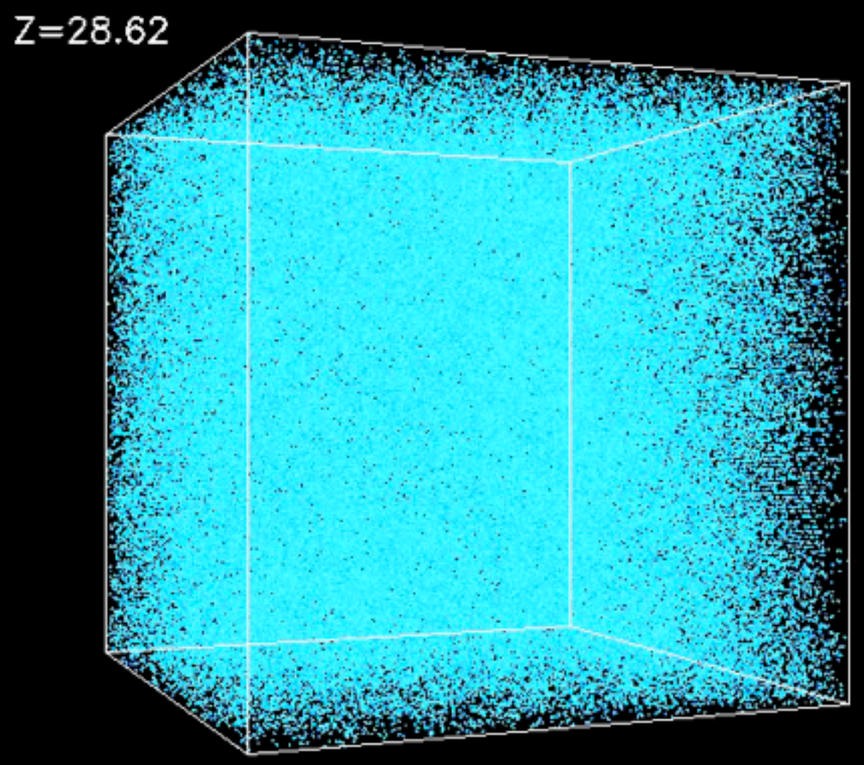
TOUT UN RESEAU FILAMENTAIRE

OBSERVATIONS

SIMULATIONS



UN GAZTRONOMIE ELABOREE



LA MATIERE SE REPARTIT
EN ZONES PLUS OU MOINS DENSES ET CHAUDES
PLUS OU MOINS FACILES A
DETECTER/OBSERVER

-LES ETOILES/LES GALAXIES VISIBLES PAR LEUR RAYONNEMENT OPTIQUE

-
LES AMAS ET LEUR GAZ EMETTEUR EN RAYONS X

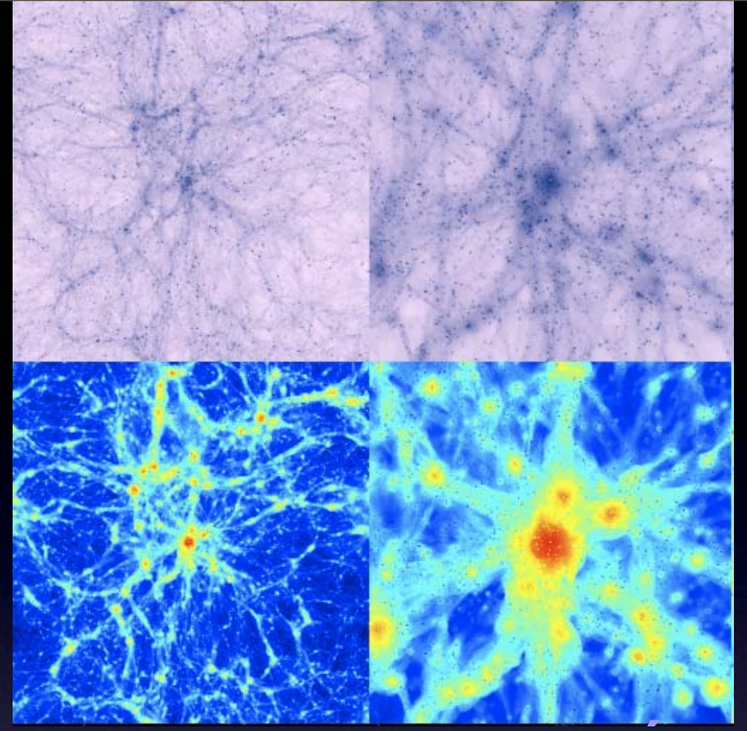
-
LES NUAGES DE GAZ FROID QUI INTERCEPTENT LA LUMIERE DES QUASARS

-

ET FINALEMENT LA MAJEURE FRACTION DU GAZ

SERAIT SOUS FORME D'UN GAZ «TIEDE»

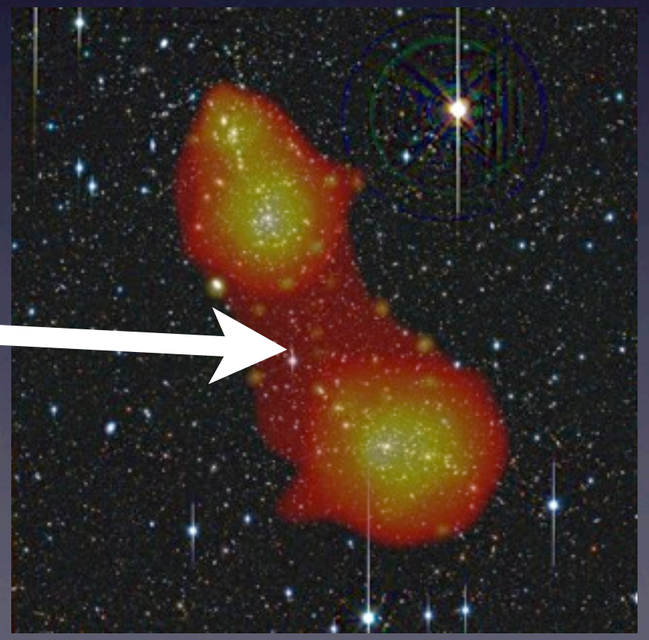
EN FILAMENTS

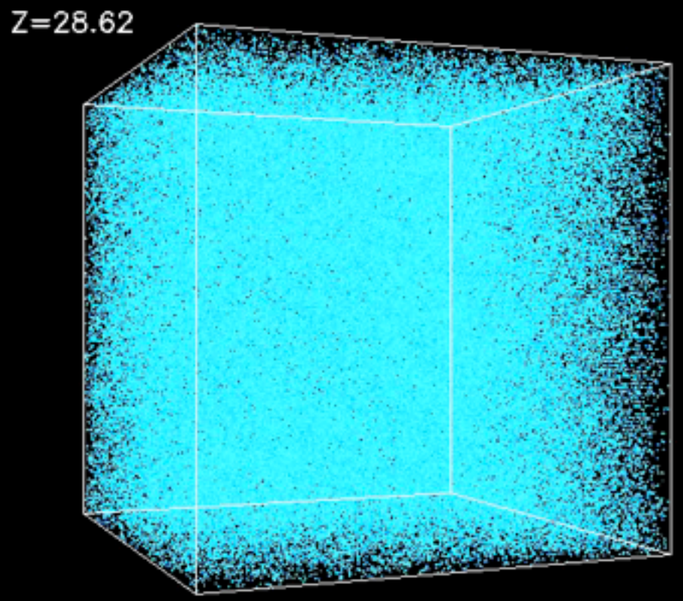


UN GAZ «TIEDE» (100000 K) DIFFICILE A DETECTER

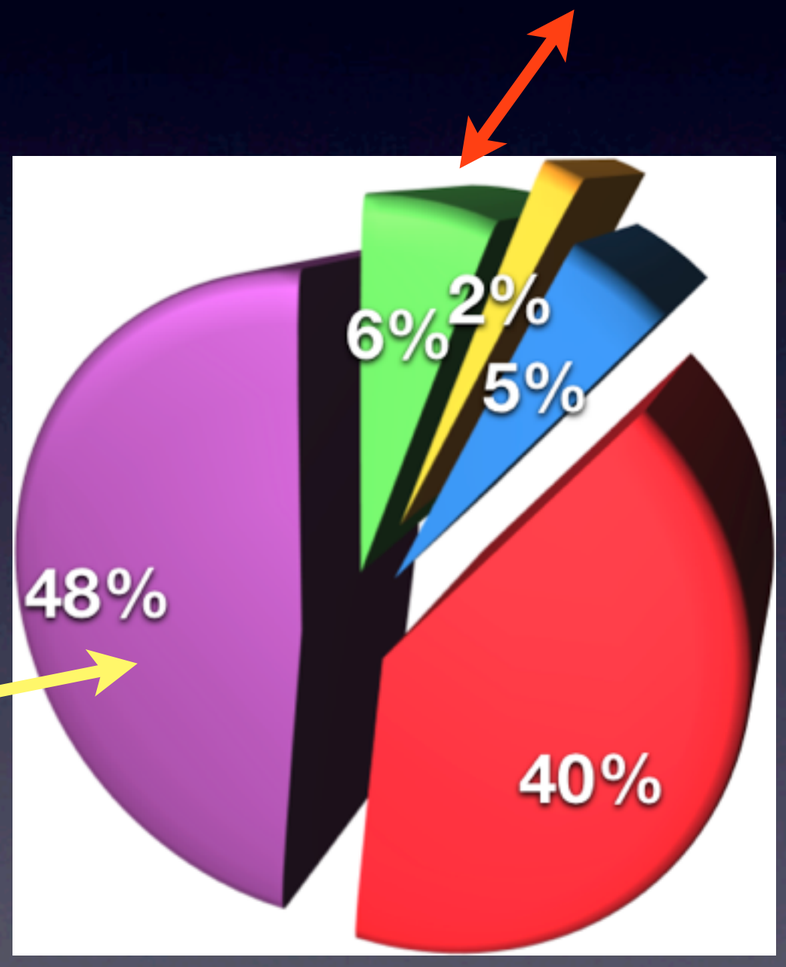
EN FAIT IL EMET DANS LA GAMME DES UV OU DES X «MOUS»!

ON CONSTRUIT DES INSTRUMENTS SPECIFIQUES POUR LE DETECTER





Etoiles



QUOI

OU

COMBIEN

La matière perdue:

Gaz «tiède» en filaments

EN CONCLUSION

ON S'EST INTERESSE A L'ORIGINE DE LA MATIERE «ORDINAIRE»,

MAIS AUSSI A SON HISTOIRE

UN TEST DU MODELE COSMOLOGIQUE !

IL FAUT ECRIRE L'HISTOIRE DE L'UNIVERS SUR 14 MILLIARDS D'ANNEES

Les protons, les neutrons et les électrons se sont formés au début de l'univers

Au bout de 3 minutes il y a eu fusion nucléaire pour former les noyaux d'hydrogène et d'hélium dont la proportion nous donne la quantité TOTALE de matière ordinaire

On retrouve cette matière à 2 milliards d'années et 300000 ans
Mais pas dans l'Univers actuel

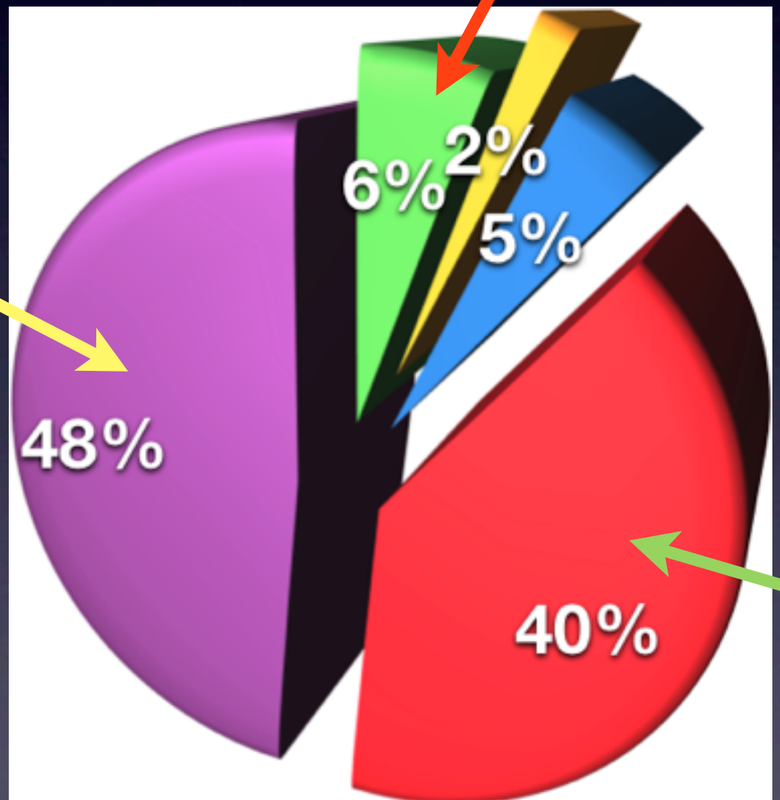
C'est la compréhension globale du scénario de formation des grandes structures via des simulations numériques qui apporte la clef du mystère

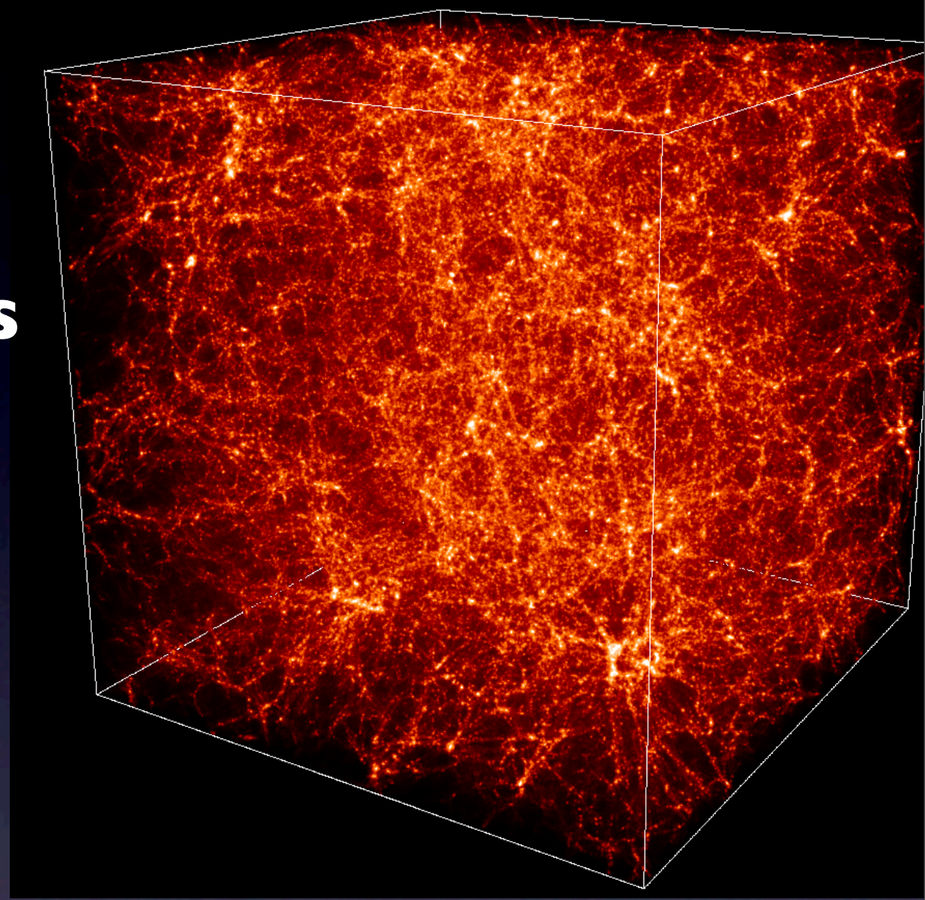
La matière actuellement n'est pas essentiellement dans les étoiles et les planètes mais dans des filaments et nuages

Etoiles

Gaz tiède

en filaments

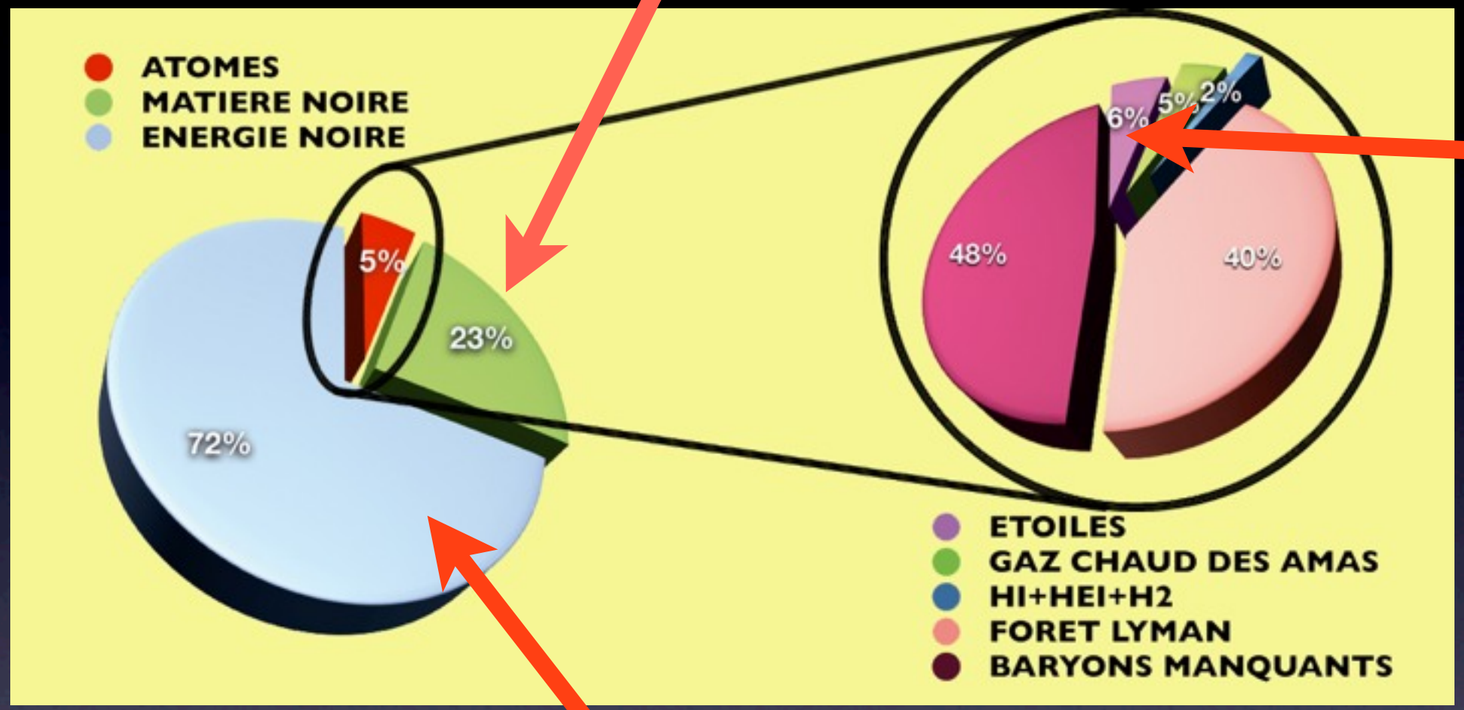




Gaz froid

en nuages

MAIS IL FAUT SE RAPPELER QUE CA N'EST QUE 20 % DE TOUTE LA MATIERE, DOMINEE PAR LA MATIERE NOIRE



ET DANS LES 6% D'ETOILES

LES PLANETES N'EN SONT QUE LE 1/1000 EME

ELLE MEME DOMINEE PAR L'ENERGIE NOIRE

SUR 1 TONNE D'UNIVERS: 3 GRAMMES DE PLANETES ...

Antiquark *u*

Quark *u*

Proton

Électron

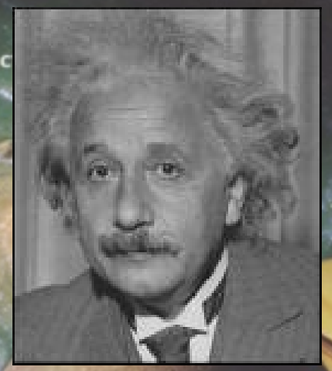
Noyau d'hydrogène

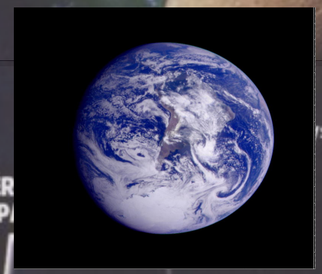
Atome d'hydrogène

Atome d'hélium

Protogalaxie

Voie lac





ystème solaire

INFLATION

VICTOIRE DE LA MATIÈRE SUR L'ANTIMATIÈRE

DÉCOUPLAGE DES NEUTRINOS

RECOMBINAISON

APPARITION DES PREMIÈRES ÉTOILES

ACCÉLÉR DE L'EXP

10^{-43} seconde | 10^{-32} seconde | 10^{-6} seconde | 3 minutes | 380 000 ans | 1 milliard d'années | 10 milliards d'années | 13,7 milliards d'années

TEMPS DE PLANCK

13.7 MILLIARDS D'ANNEES

THE END

- **Mazure, A., Clairs-Obscurs du Cosmos, Ed. ELLIPSES**

- **Mazure, A., Basa, S., L'Univers dans tous ses éclats, Ed. DUNOD**

- **Mazure, A., Le Brun V., Matières et anti-matière, Ed. DUNOD**

- **Bouquet, A., E. Monnier, Matière sombre et Energie noire, Ed. DUNOD**

- **Combes, F., Mystères de la formation des galaxies, Ed. DUNOD**

http://alain.mazure.free.fr/