

A la recherche de la matière perdue

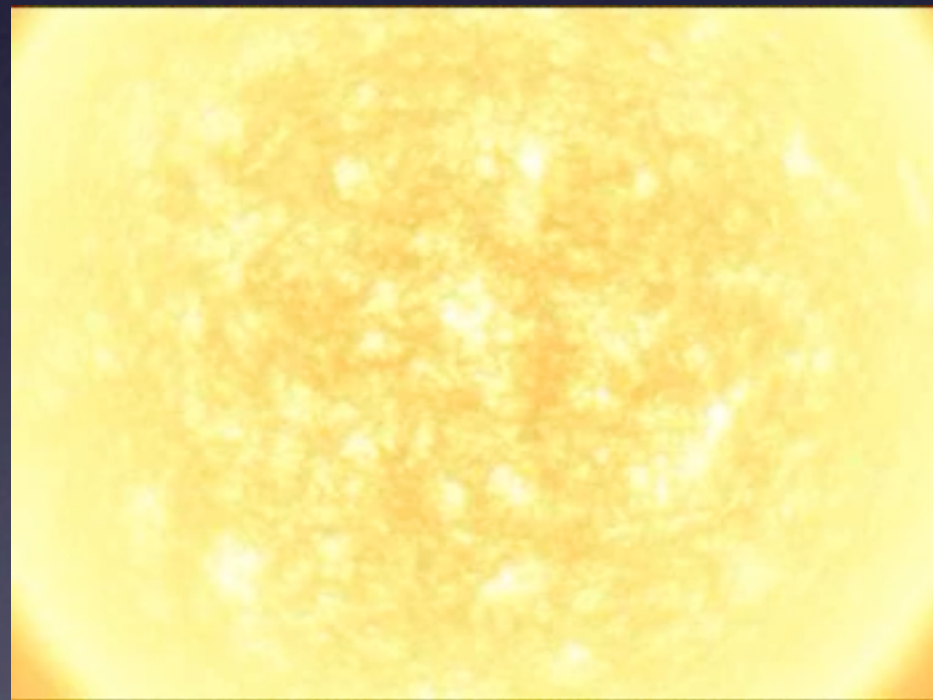
Alain Mazure/Vincent Le Brun

Laboratoire d'Astrophysique de Marseille/CNRS

Décembre 2009

EN IER LIEU: FIXONS LE CADRE

**LE SYSTEME
SOLAIRE**



NOTRE GALAXIE

DANS LA VOIE LACTEE

MAIS
CONTRAIREMENT À
CE QUE L'ON A PENSE
JUSQU'AU DÉBUT DU
20^{ÈME} SIÈCLE

LE COSMOS, CE N'EST
PAS QUE LA VOIE
LACTÉE...

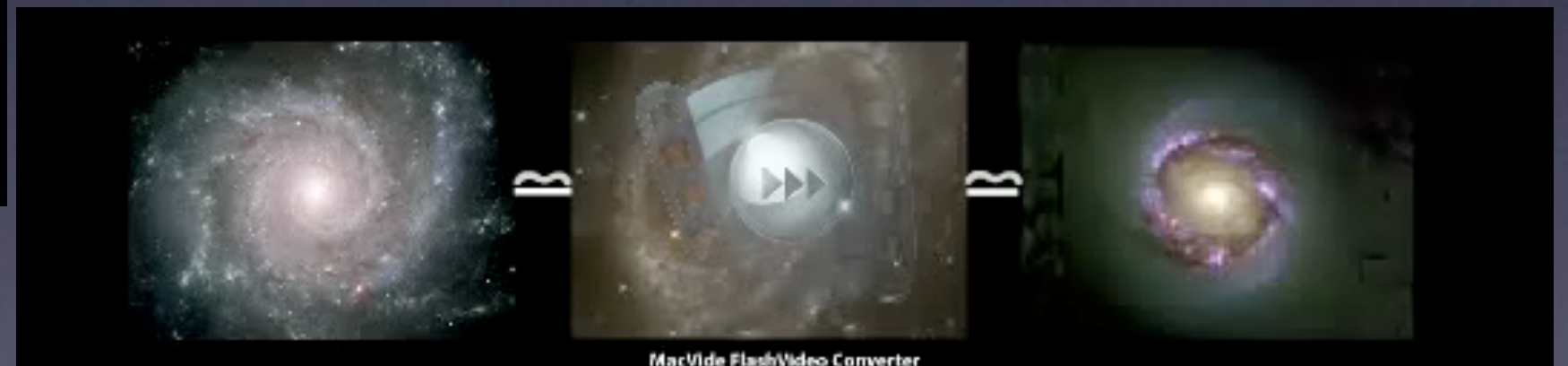
CE SONT DES
MILLIARDS
D'AUTRES GALAXIES !



UN MONDE DE GALAXIES



***UN UNIVERS EN
EXPANSION !
(La fuite des galaxies
Hubble 1930)***



UN MONDE DE MATIERE **(Et de rayonnement)**

RESUME DANS UN
TABLEAU CELEBRE

N° 1

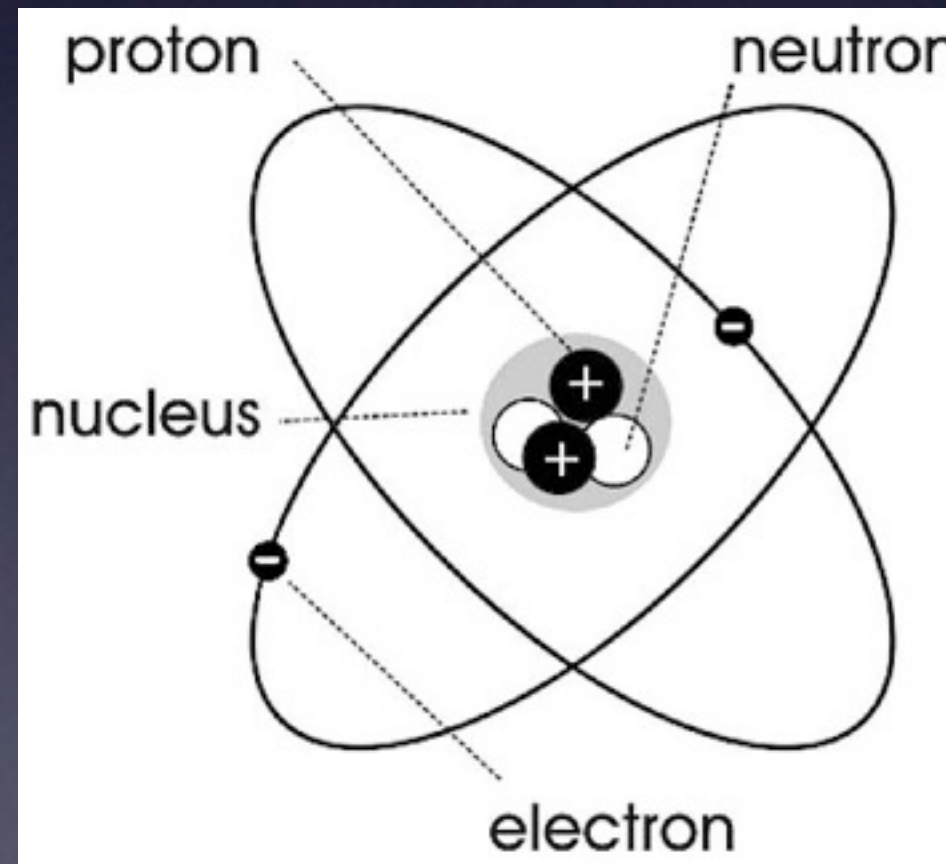
L'HYDROGENE

LES 2 ELEMENTS DE BASE

1 PROTON

+

1 ELECTRON



N° 2

L'HELIUM

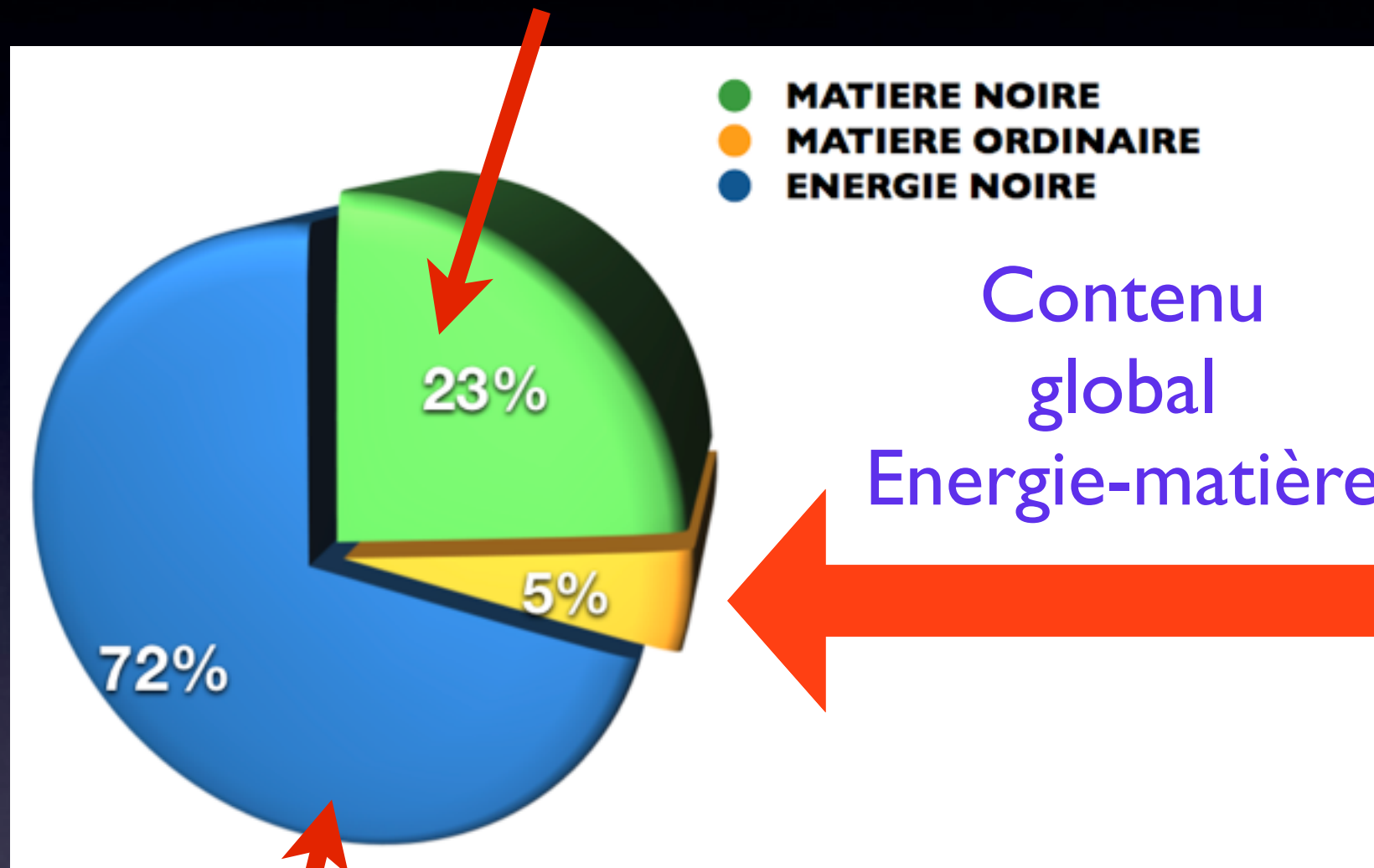
Etc....

D'OU VIENT CETTE MATIERE
«ORDINAIRE» ?
DITE AUSSI BARYONIQUE
(Le nom savant pour protons et neutrons)

D'OU VIENNENT CES ATOMES ?

QUELLE QUANTITE?

**Matière
noire**



**Energie
noire**

***MATIERE ORDINAIRE
CAR UNE AUTRE EXISTE
(RAIT):***

***LA MATIERE NOIRE
5 FOIS
PLUS NOMBREUSE***

***EN FAIT
UN UNIVERS BIEN NOIR***

**QUAND ET OU CETTE
MATIERE ORDINAIRE
S'EST ELLE FORMEE?**

L'UNIVERS PRIMORDIAL !

VOIR L'EXPANSION DE L'UNIVERS COMME UN FILM QUI SE DEROULE



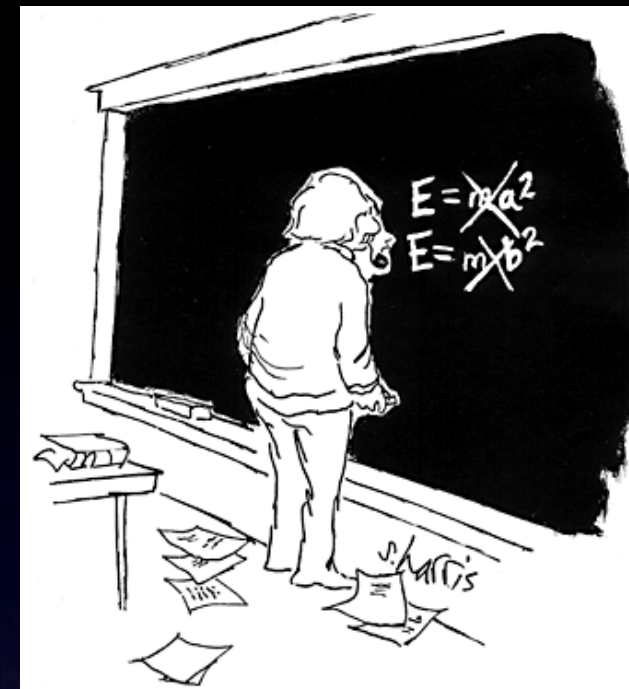
En “rembobinant” le film: on imagine toute la matière se condenser et s’échauffer

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

***L’IDEE DE BASE DU
“BIG BANG” !!***

t ~ 1/millionième seconde

T ~ 100000 MILLIARDS DE DEGRES



t ~ 1 seconde

T ~ 100 MILLIARDS DE DEGRES

$$E = MC^2$$

t ~ 100 secondes

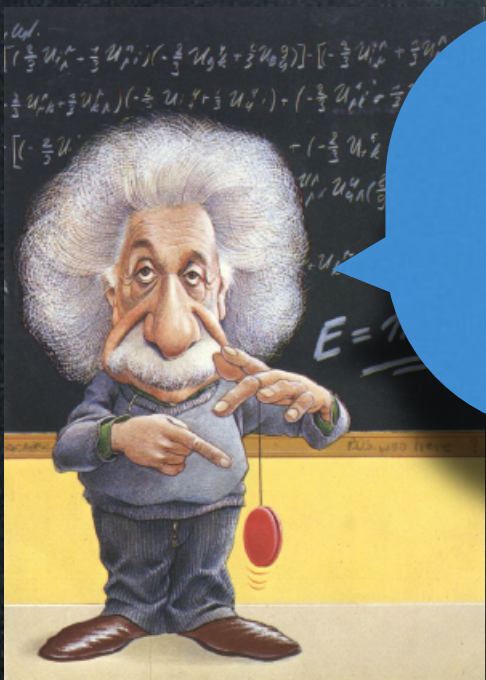
T ~ 1 MILLIARD DE DEGRES



PERMET DE FRANCHIR

LA

I ÈRE ÉTAPE



$$E = MC^2$$

**CREATION
DE PARTICULES:**

**DES PROTONS
ET DES NEUTRONS**

(LES BARYONS)

**QUI SONT LES BRIQUES
DE TOUS LES
ELEMENTS**

e^+

e^-

MATIERE = ENERGIE

© 3xplus.com

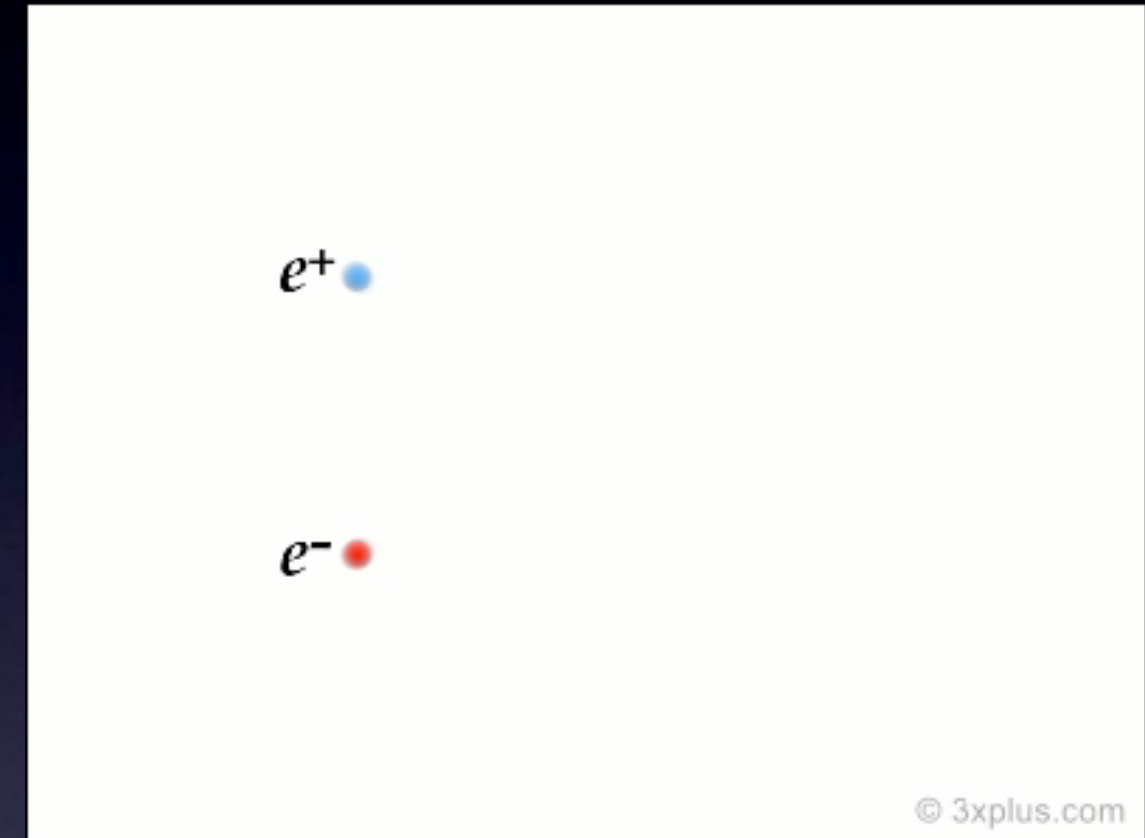
- ***TOUS LES PROTONS, NEUTRONS,
ELECTRONS***

ONT ETE CREES A CE MOMENT LA !

- ***ILS NE DISPARAITRONT PAS MAIS
JAMAIS ILS NE SERONT DE NOUVEAU
CREES!***

ILS VONT JUSTE SE TRANSFORMER

- ***COMBIEN Y EN A T-IL?***



2 EME ETAPE

Aux environs de $t \sim 100$ s

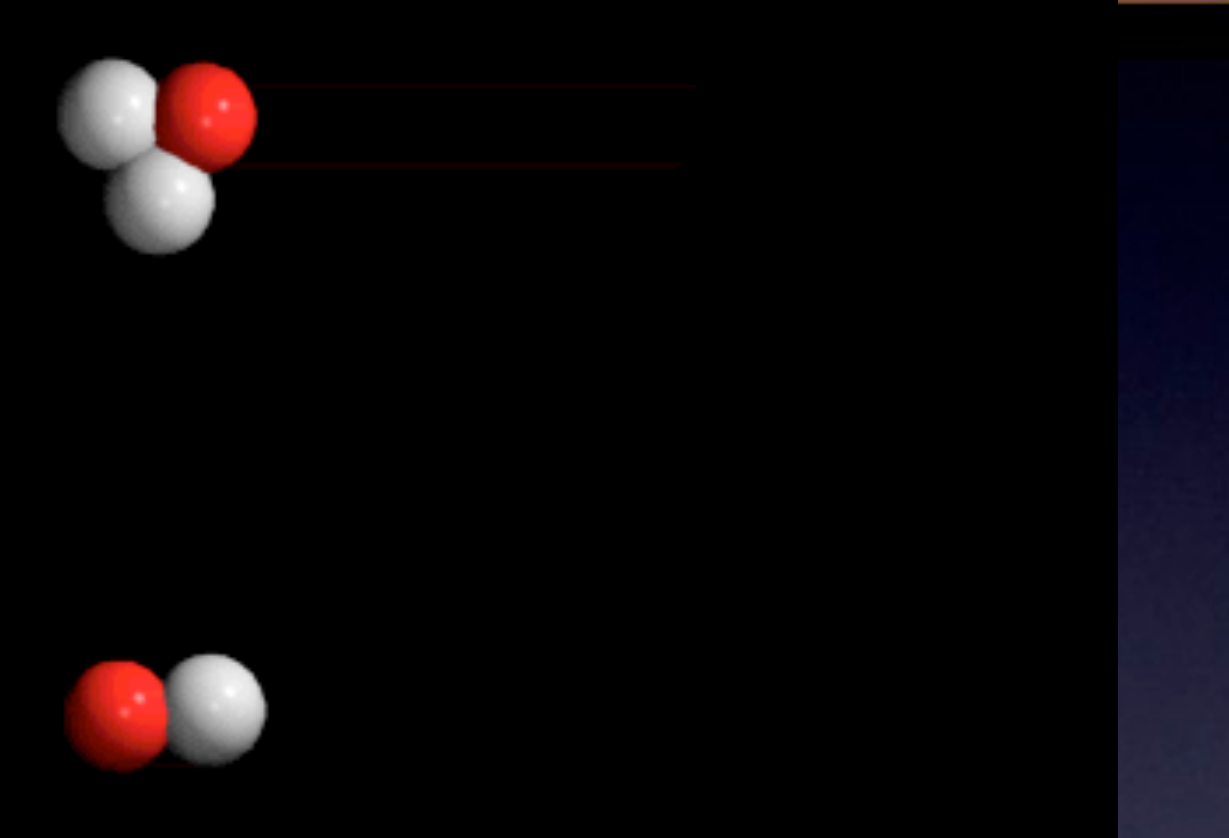
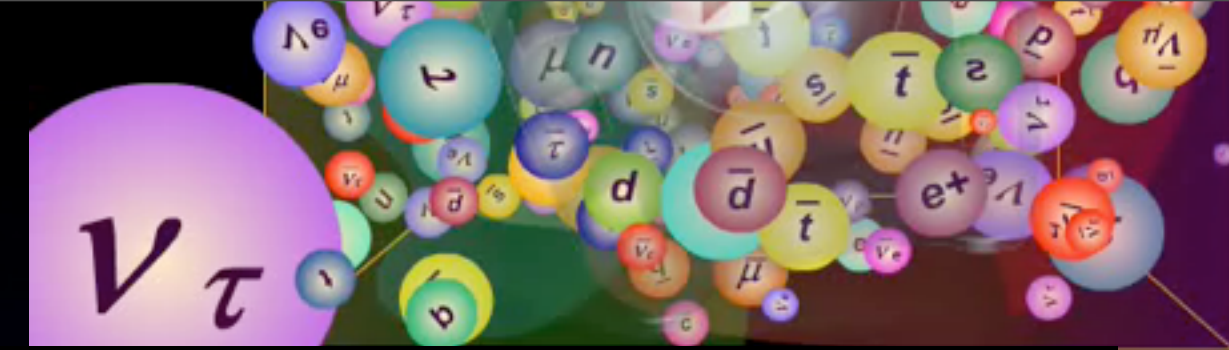
$T \sim 1$ MILLIARD DE DEGRES

ON A UNE «SOUPE» DE
PROTONS/NEUTRONS...

ILS PEUVENT INTERAGIR

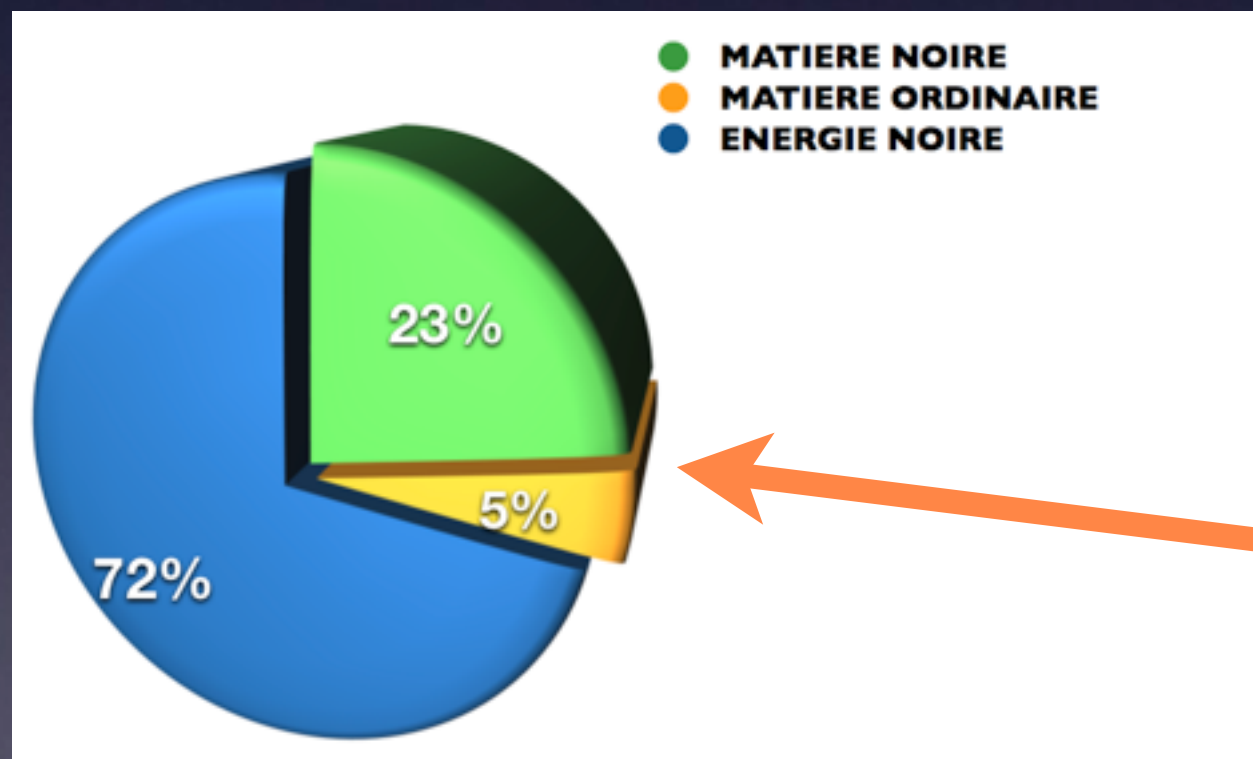
C'EST LA FUSION
NUCLEAIRE !

ET FORMER DES NOYAUX
D'HELIUM ET QQ TRACES
DE LITHIUM



**PROCESSUS REGI 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***



**LA MESURE DE CETTE PROPORTION
HYDROGENE/HELIUM
DONNE EN FAIT LA**

**QUANTITE TOTALE DE MATIERE
ORDINAIRE!!!**

**NOUS SAVONS DONC OU ET QUAND ILS SE SONT FORMES
ET COMBIEN!**

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

**ESSAYONS DE LES SUIVRE AU COURS DU TEMPS
COSMIQUE**

**CONNAÎTRE LEUR HISTOIRE ET CONFIRMER LEUR
ABONDANCE AU COURS DU TEMPS EST UN TEST
SUPPLEMENTAIRE DU MODELE COSMOLOGIQUE**

**EN FAIT, APRES CES 3 «PREMIERES MINUTES»
IL NE SE PASSE PAS GRAND CHOSE**

JUSQU'A 300000 ANS !

L'UNIVERS EST TOUJOURS TRES CHAUD

MAIS SE REFROIDIT

A CAUSE DE L'EXPANSION

QUE SE PASSE T-IL A CETTE EPOQUE ?

JUSQU'A CE MOMENT LÀ, LA «SOUPE» EST CONSTITUEE DE
PROTONS, ELECTRONS, NOYAUX D'HELIUM

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

DANS CET ETAT, PARTICULES ET RAYONNEMENT SONT
INTIMEMENT LIES

**AVEC L'EXPANSION, CE PLASMA S'EST
REFROIDI!!**

A 300 000 ANS, LA TEMPERATURE

EST ASSEZ «BASSE» (3000 K)

POUR QUE LES NOYAUX ET LES

ELECTRONS SE REUNISSENT

POUR

LA IERE FOIS

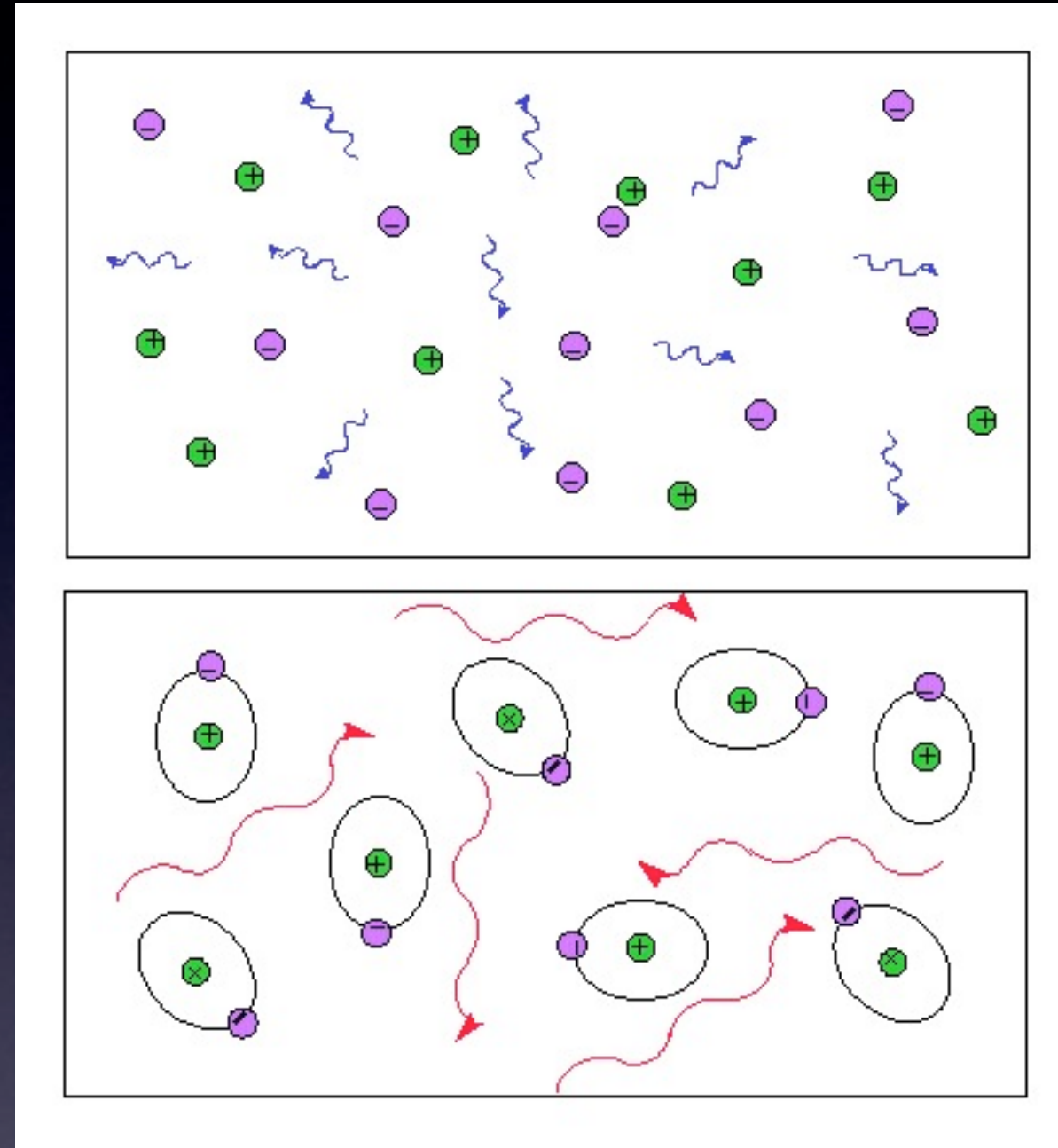
ET FORMENT DES

ATOMES (QUI SONT NEUTRES!)

ON A DONC UN UNIVERS D'ATOMES

D'HYDROGENE ET D'HELIUM

**(PLUS LA MATIERE NOIRE
QUI EST NEUTRE)**



$t \sim 300\,000$ ans

$T \sim 3000$ K

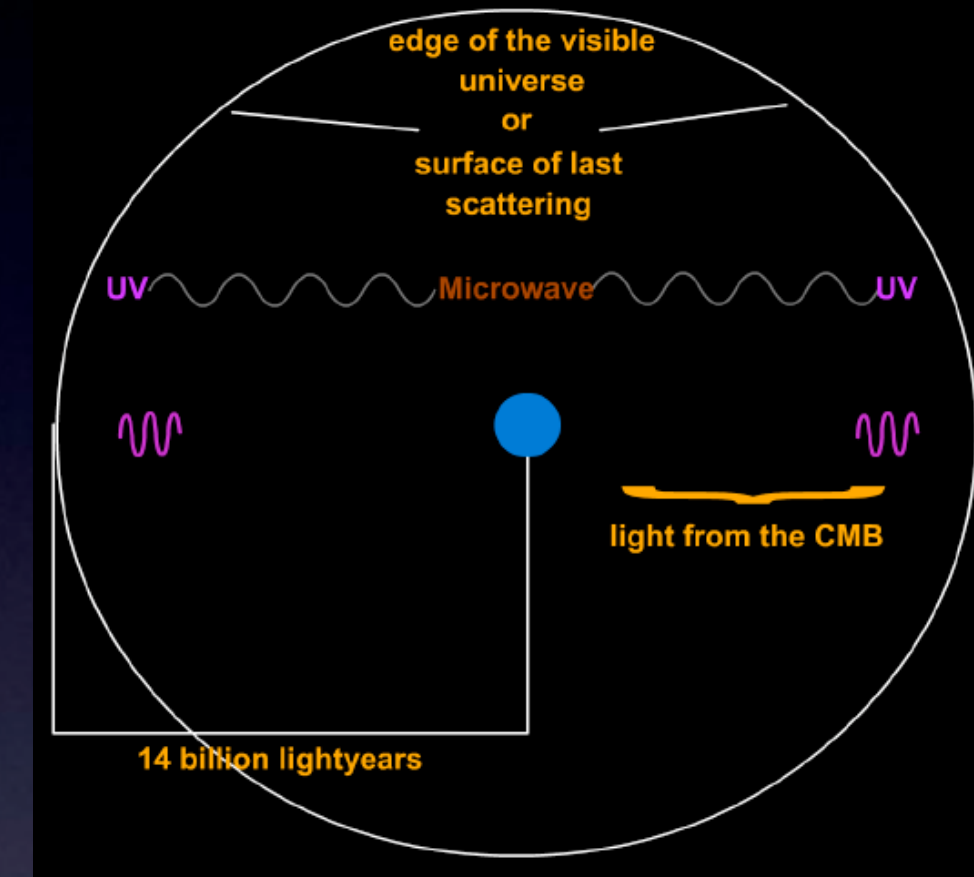
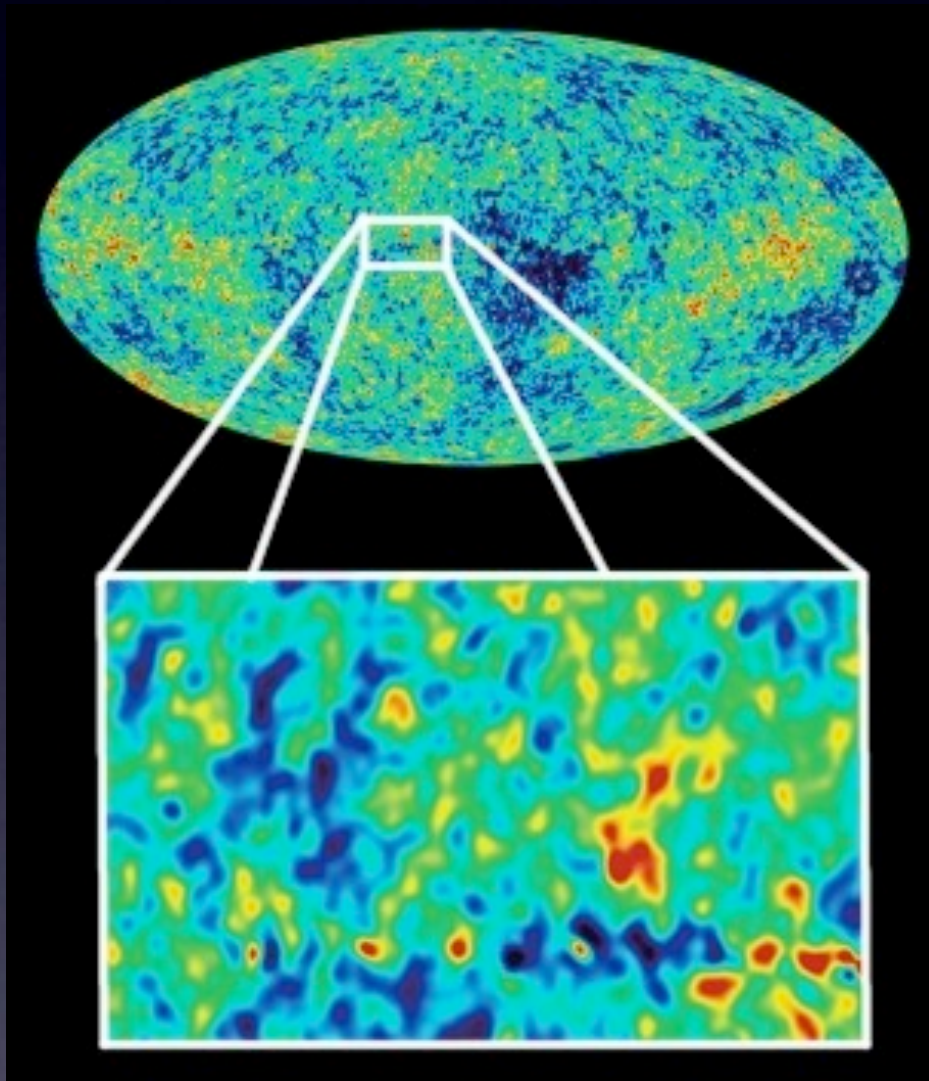
**MATIERE ET
RAYONNEMENT SE
“DECOUPLENT”**

**CAR LES PHOTONS
NE PEUVENT PLUS
“JOUER “ AVEC LES
ELECTRONS LIBRES**

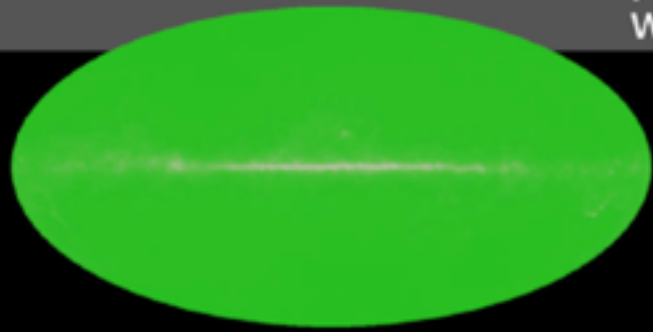
CETTE TRANSITION LAISSE UNE TRACE FOSSILE!

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

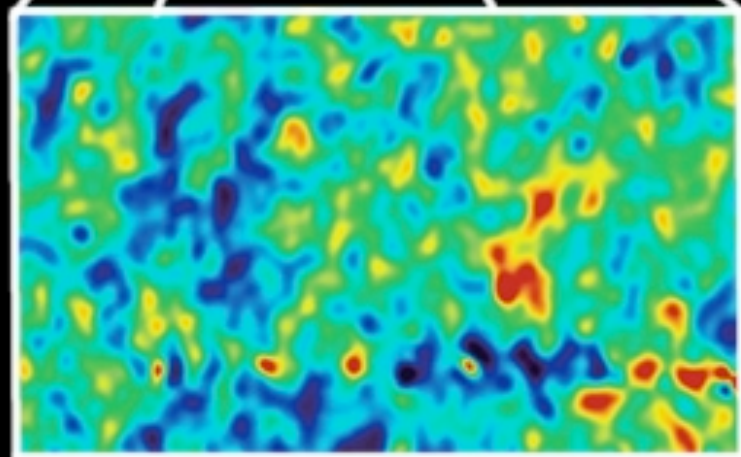
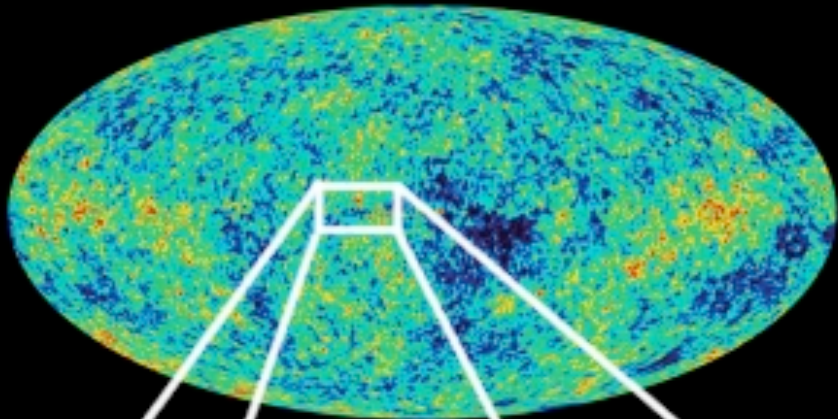
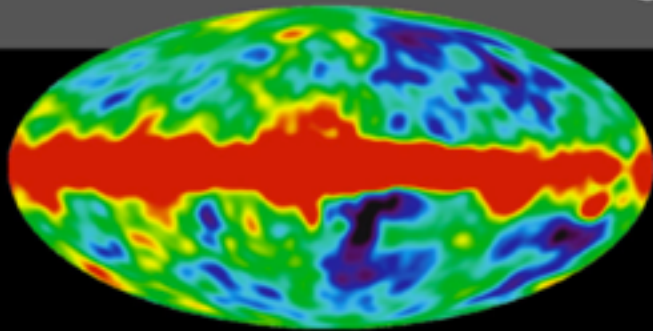
LE CMB A $T = 3K$



Penzias and
Wilson



COBE



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

**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
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!!!



APRES CE 1ER SUCCES

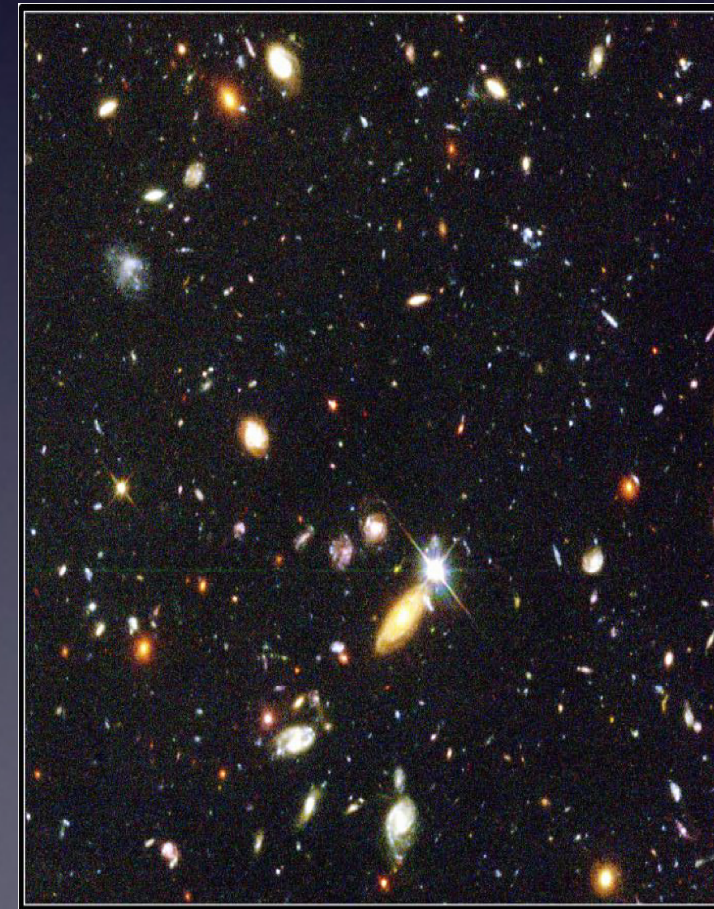
CONTINUONS

NOTRE

QUÊTE

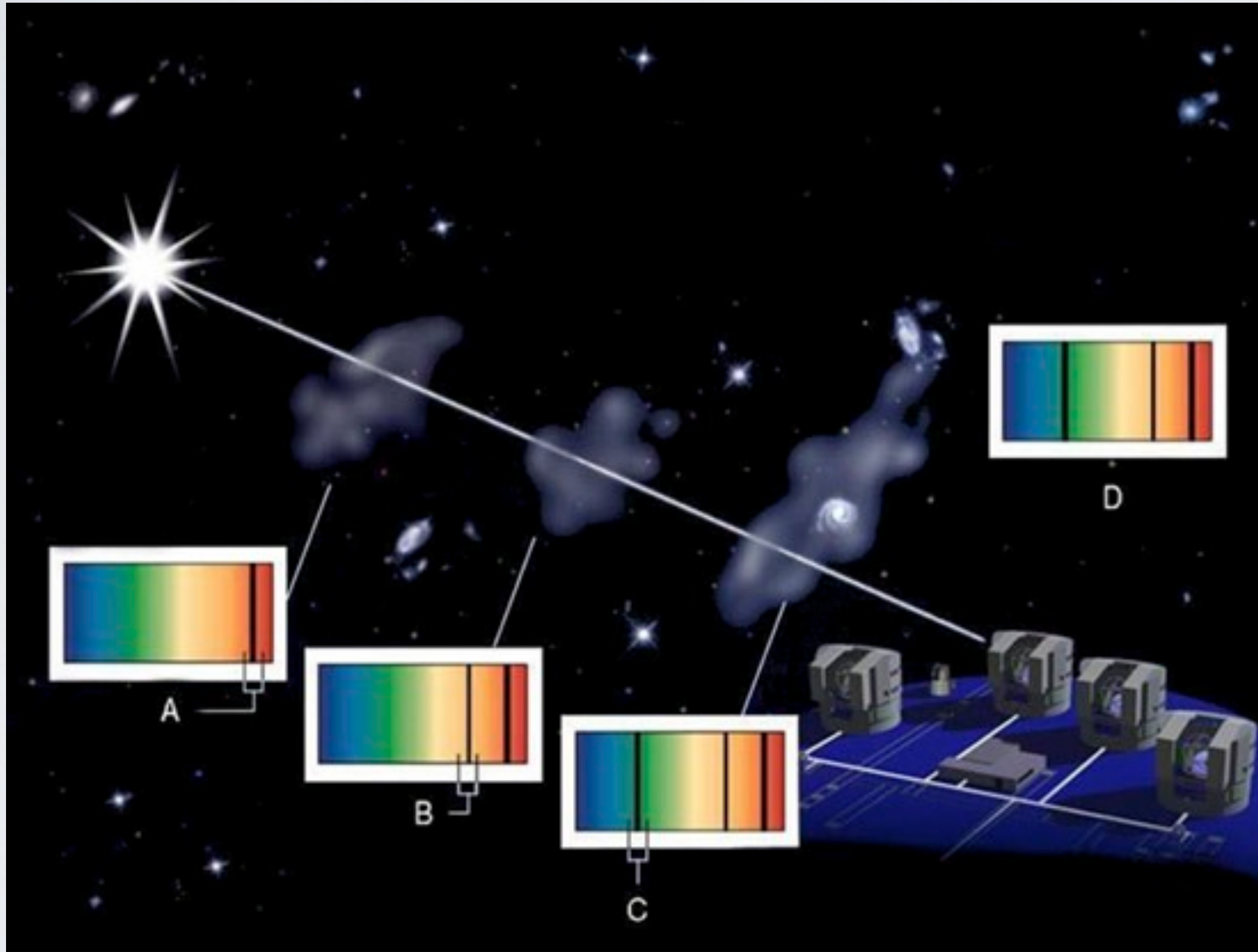
**APRES 300 000 ANS,
L'UNIVERS CONTINUE DE SE
REFROIDIR**

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



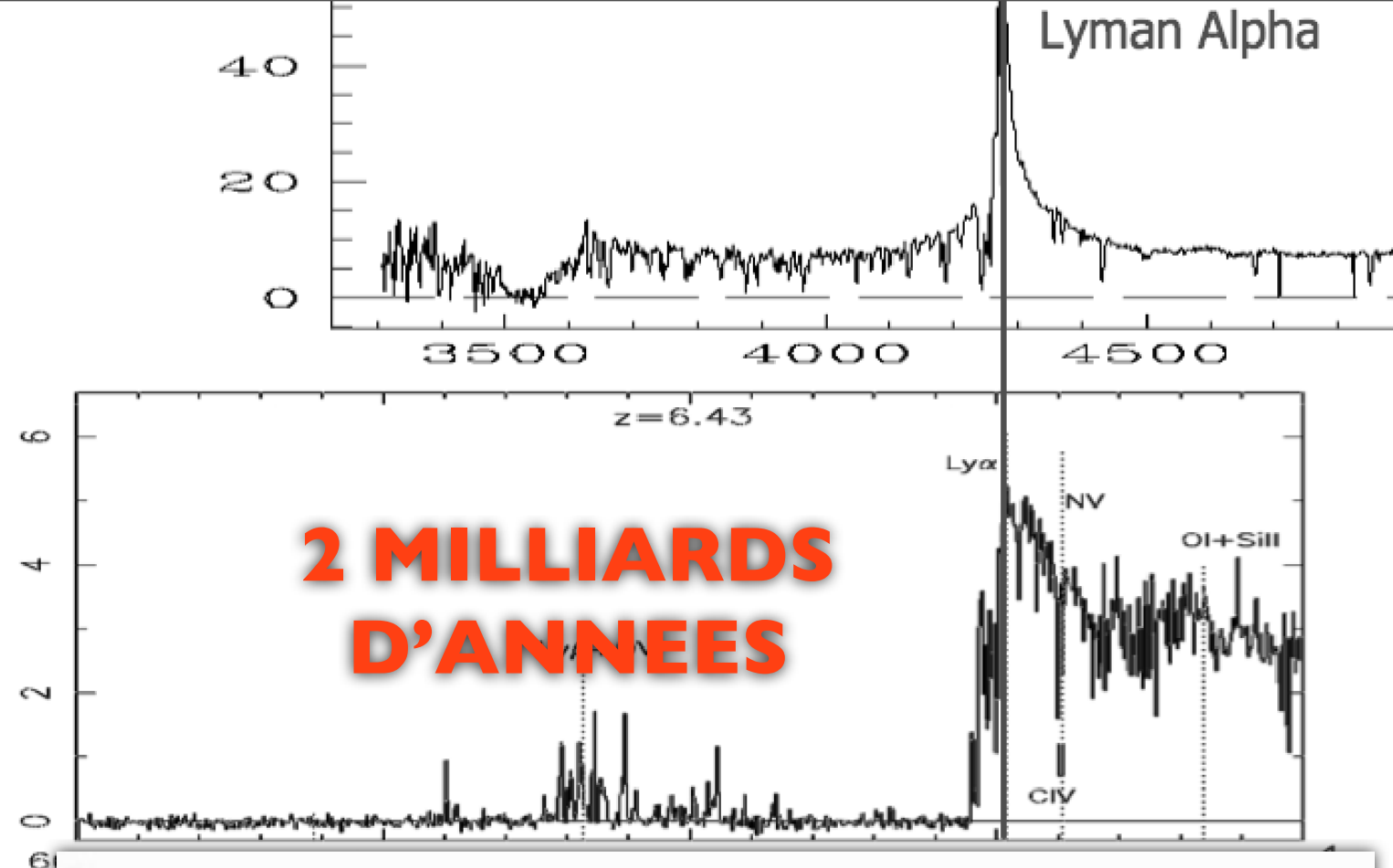
**EST CE QUE TOUTE LA MATIERE
ORDINAIRE A ETE UTILISEE
POUR FORMER CES PREMIERS
ASTRES LUMINEUX?**

DEMANDONS JUSTEMENT AUX QUASARS ...

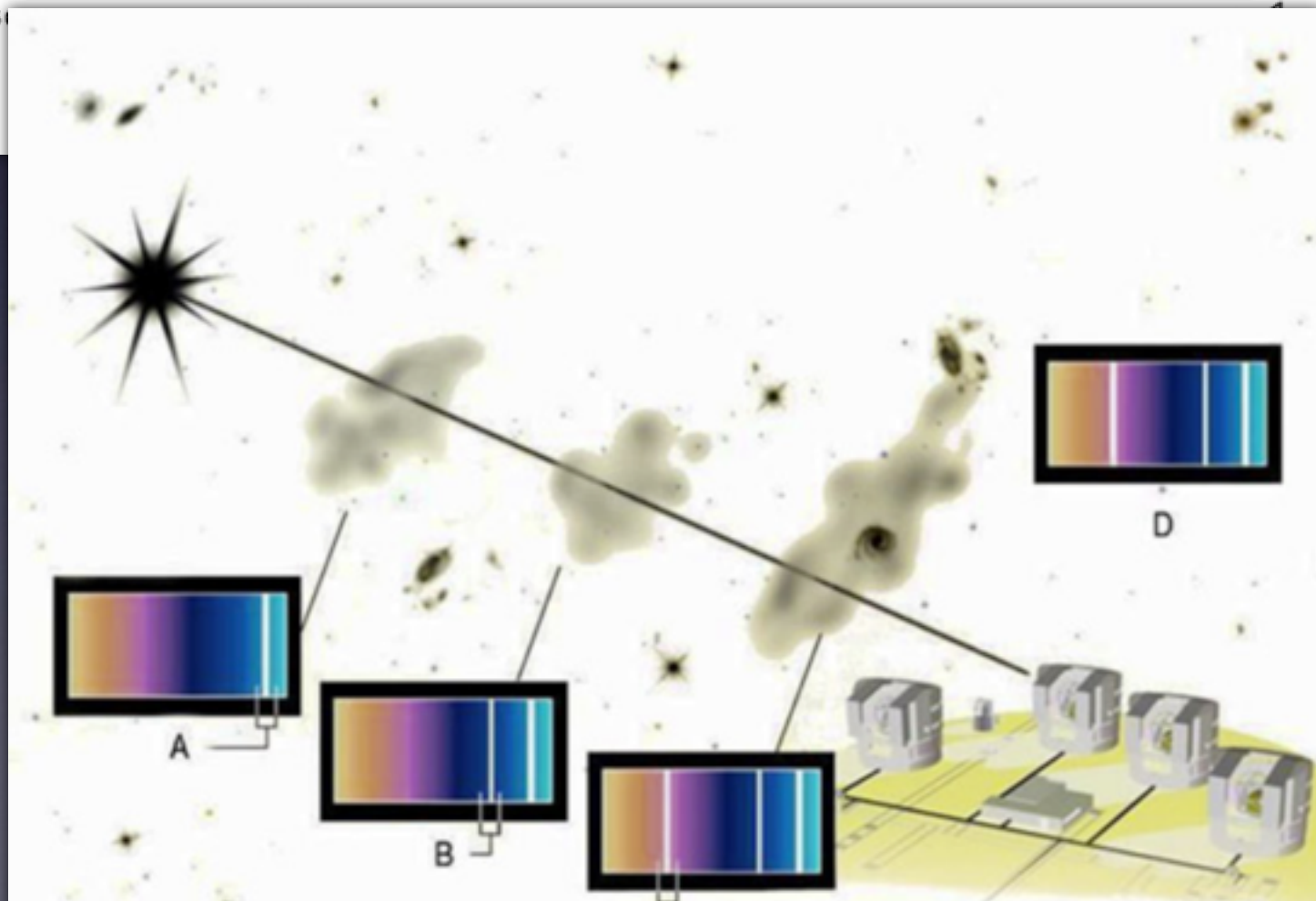


**Astres très
brillants : visibles
de très loin**

**DES PHARES
COSMIQUES QUI
PERMETTENT DE
SONDER LE
COSMOS !!**



**2 MILLIARDS
D'ANNEES**



**SI ON COMPARE LE RAYONNEMENT D'UN
QUASAR
CORRESPONDANT A UN ÂGE DE 2
MILLIARDS D'ANNEES**

A CELUI D'UN QUASAR «NORMAL»

**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!**



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
TOUTE LA MATIERE
INITIALE ?**



- **AUJOURD'HUI C'EST 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



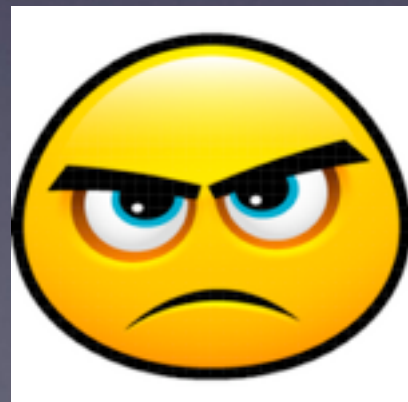
**ON MESURE L'ECLAT DES
GALAXIES
(AVEC DES MACHINES)**

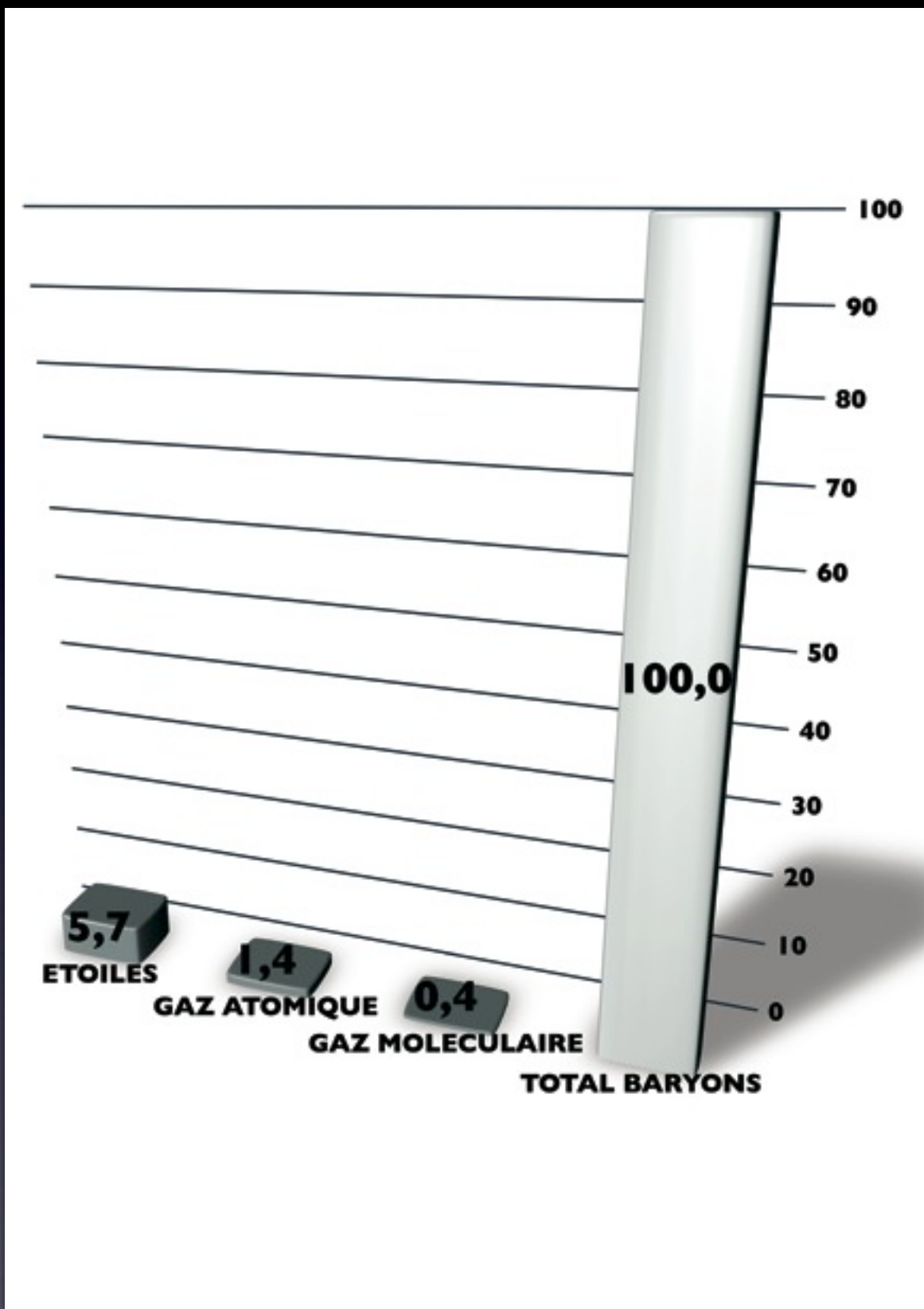
**ON SAIT RELIER L'ECLAT
D'UNE GALAXIE A SA
MASSE**

**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 ??**



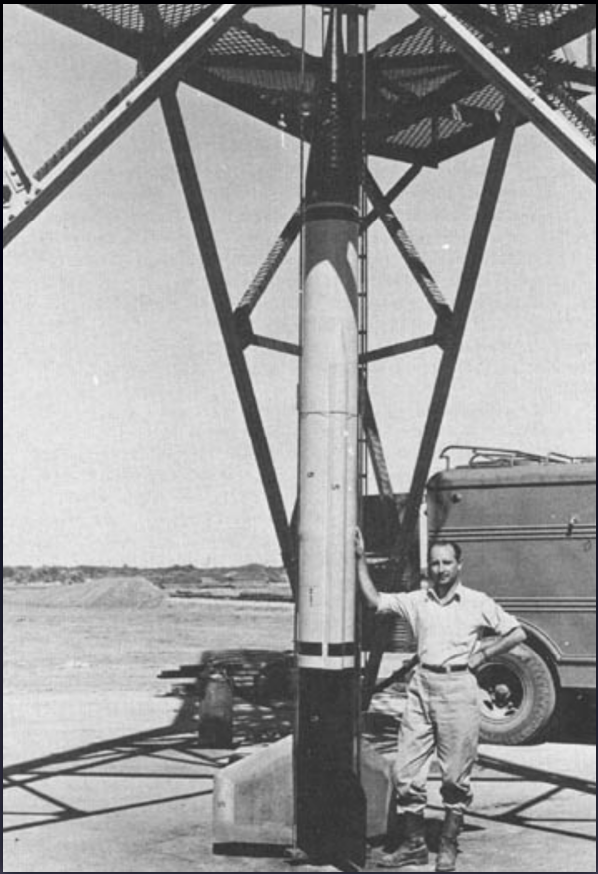
LES AMAS DE GALAXIES?.....

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

ELLES FORMENT DE GIGANTESQUES CONCENTRATIONS QUI PIEGENT DU GAZ TRES CHAUD

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

IL A FALLU ATTENDRE L'ERE SPATIALE POUR L'OBSERVER !



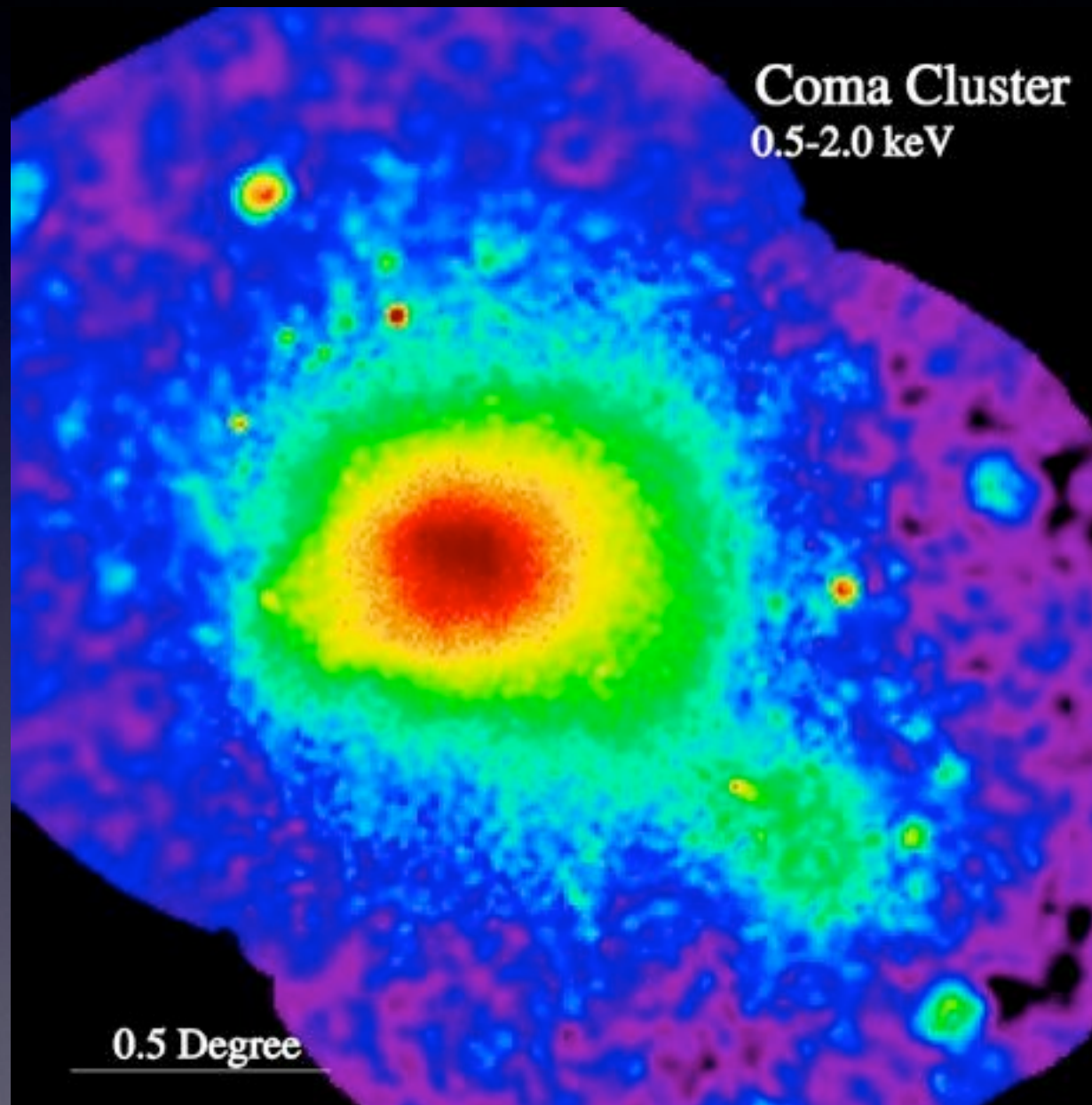
1949



2000



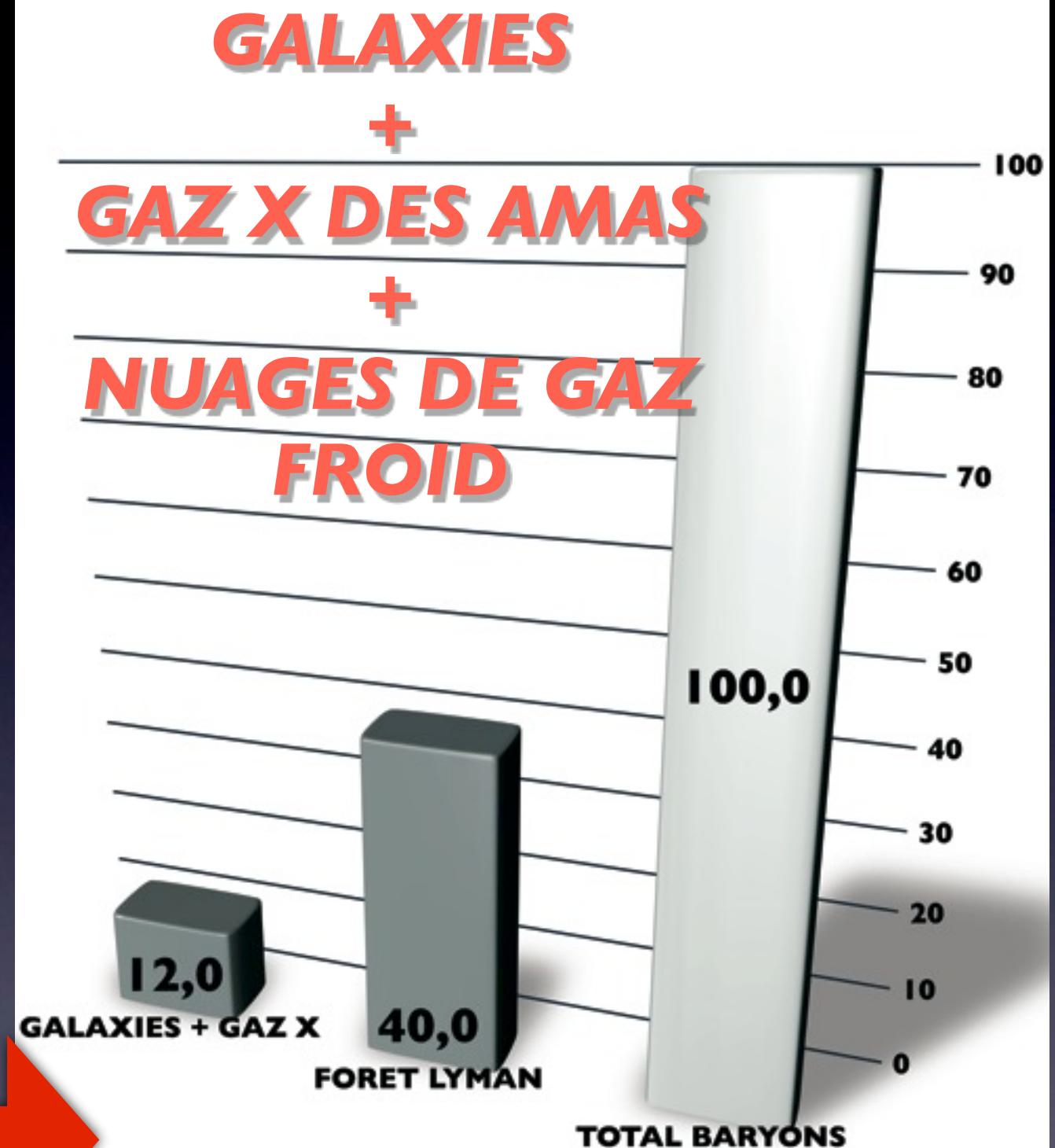
DECOUVERTE DES ANNEES 70



**Les amas
de galaxies
sont plein...
de gaz très
chaud
émetteur X**

**ON PEUT Y RAJOUTER
DES NUAGES
DE GAZ FROID COMME
CEUX
DETECTES
A 2 MILLIARDS
D'ANNEES**

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



RECAPITULONS AVANT D'ALLER PLUS LOIN

1) TOUTE LA MATIERE EST FORMEE AU BOUT DE QUELQUES SECONDES

2) ON PEUT LA MESURER A 300000 ANS EN ACCORD AVEC LA VALEUR INITIALE SOUS FORME D'UNE SOUPE D'HYDROGENE, D'HELIUM

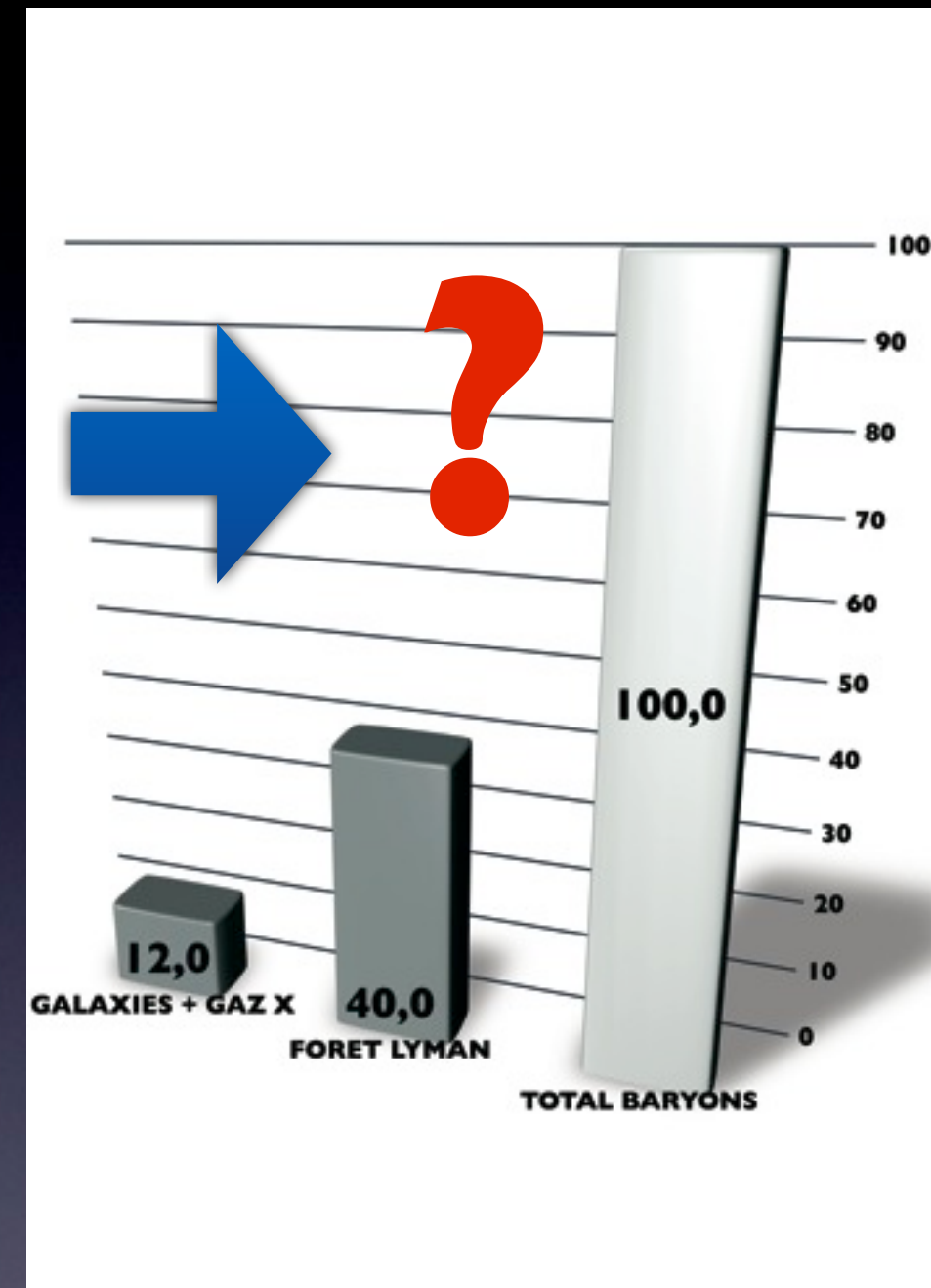
**3) ON PEUT LA MESURER A 2 MILLIARD D'ANNEES
ELLE EST SOUS FORME DE QUASARS/GALAXIES ET DE NUAGES FROIDS
D'HYDROGENE C'EST OK**

**4) DANS L'UNIVERS PROCHE, ON A DES ETOILES, DES GALAXIES, DES
QUASARS, DES NUAGES DE GAZ FROID, DU GAZ TRES CHAUD DANS LES AMAS
DE GALAXIES**

MAIS LE COMPTE N'Y EST PAS!!

OU EST LA

MATIERE ?



**C' EST RESTE
LONGTEMPS COMME
UN CLOU DANS LA
CHAUSSURE
DES ASTRONOMES**



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

**CE SONT LES
SIMULATIONS SUR
ORDINATEURS DE
FORMATION
DES GRANDES
STRUCTURES DE
L'UNIVERS QUI ONT MIS
LES ASTRONOMES SUR
LA PISTE**

L'UNIVERS DANS UN ORDINATEUR!

UNE «SOUPE» DONT LES INGREDIENTS SONT:

-LA FAMEUSE MATIERE NOIRE

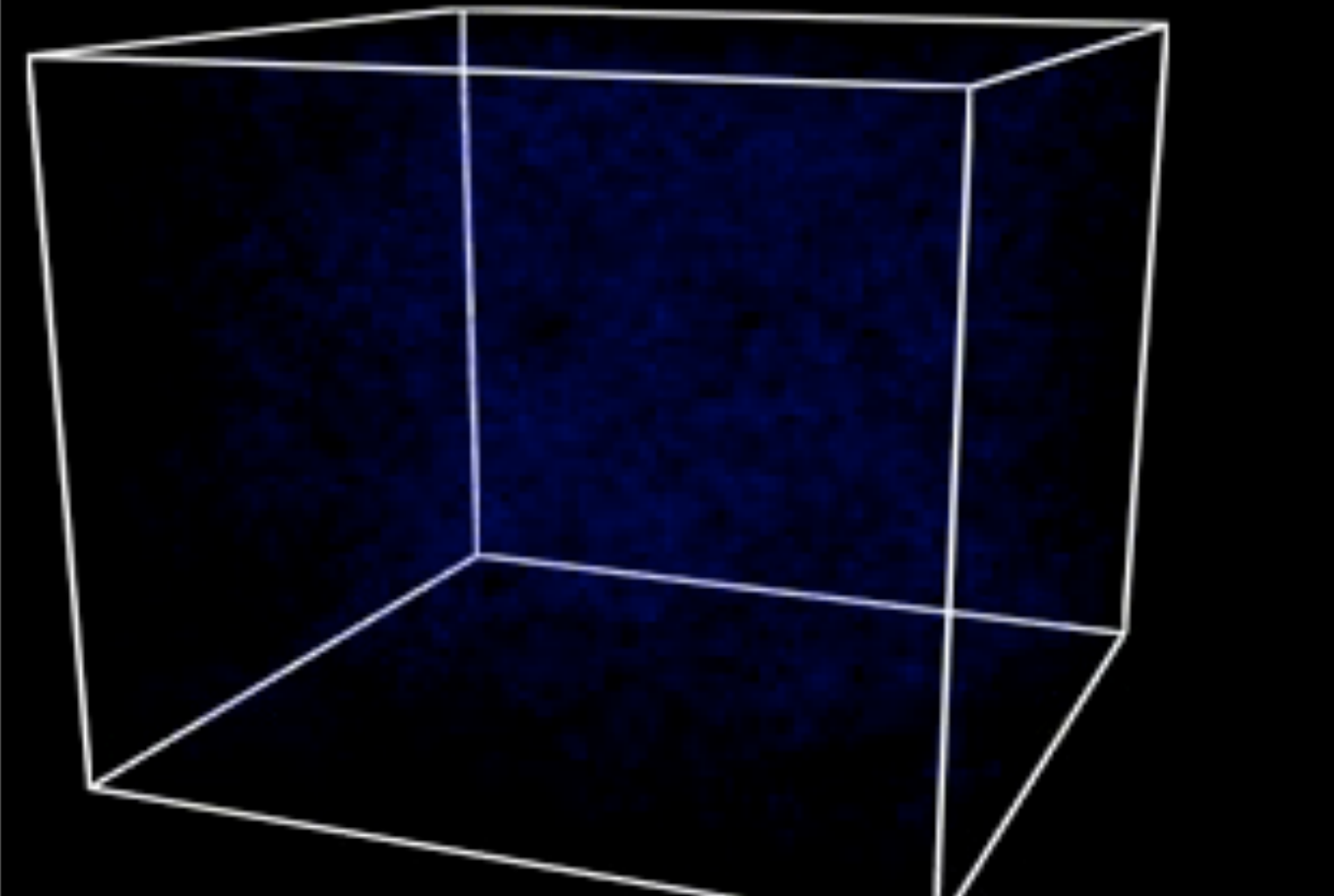
-LES BARYONS

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

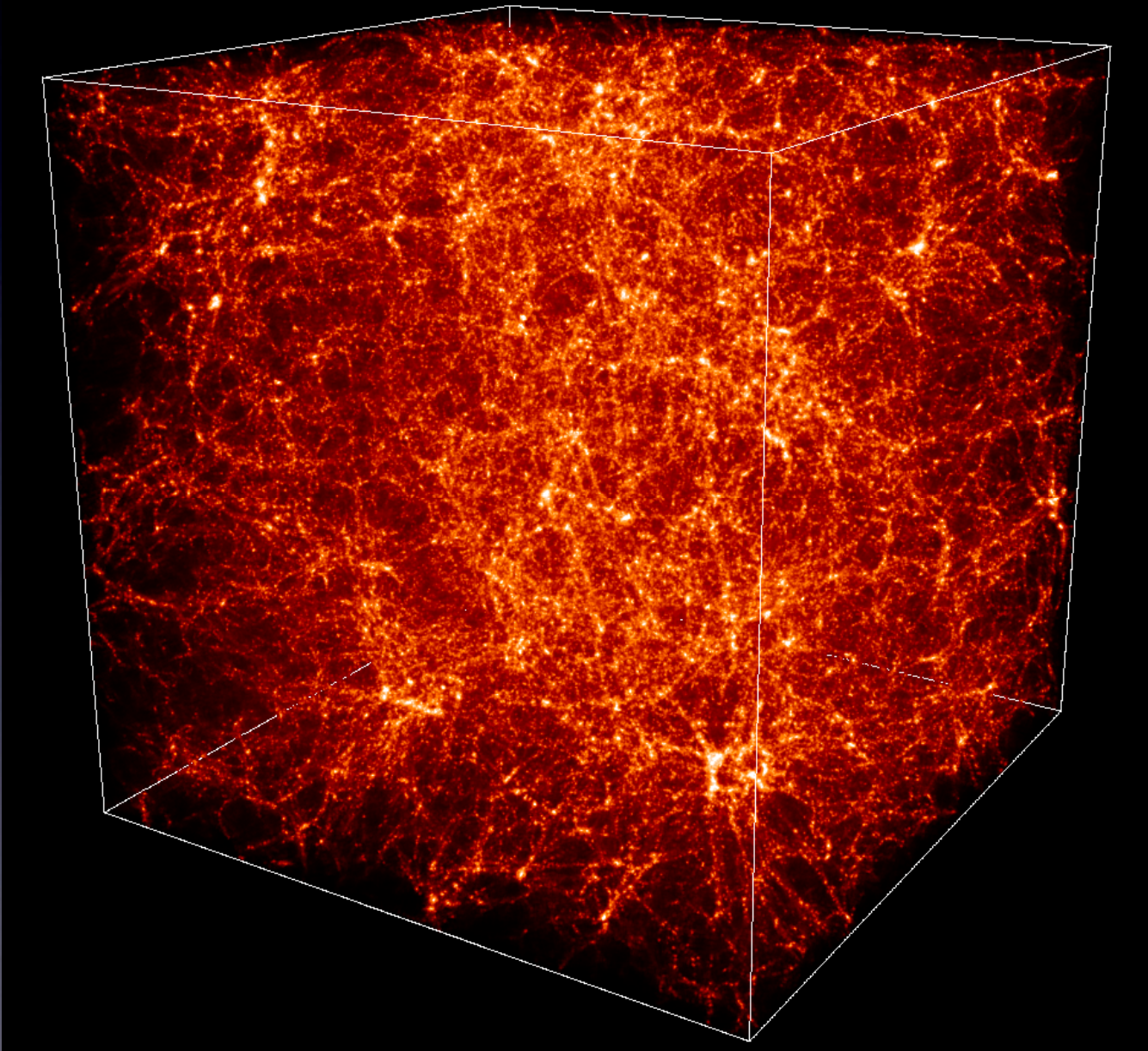
CES «GRUMEaux» AUGMENTENT SOUS L'EFFET
DE LEUR PROPRE GRAVITATION EN DEPIT DE
L'EXPANSION

ILS FORMENT DES ETOILES, DES
GALAXIES

ET TOUT UN RESAU FILAMENTAIRE



UN SCHEMA COMPLEXE



**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 QUI N'A
PAS ETE TRANSFORME SERAIT SOUS FORME D'UN GAZ
«TIEDE»**

UN TEL GAZ «TIEDE» EST DIFFICILE A DETECTER

EN FAIT IL EMET DANS LA GAMME DES UV!

ON CONSTRUIT DES INSTRUMENTS POUR LE DETECTER

EN CONCLUSION

**ON S'EST INTERESSE A L'ORIGINE DE LA MATIERE «ORDINAIRE»,
MAIS AUSSI A SON HISTOIRE!**

UN TEST SUPPLEMENTAIRE DU MODELE COSMOLOGIQUE

ET AUSSI PARCE QUE C'EST AUSSI NOTRE HISTOIRE

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**

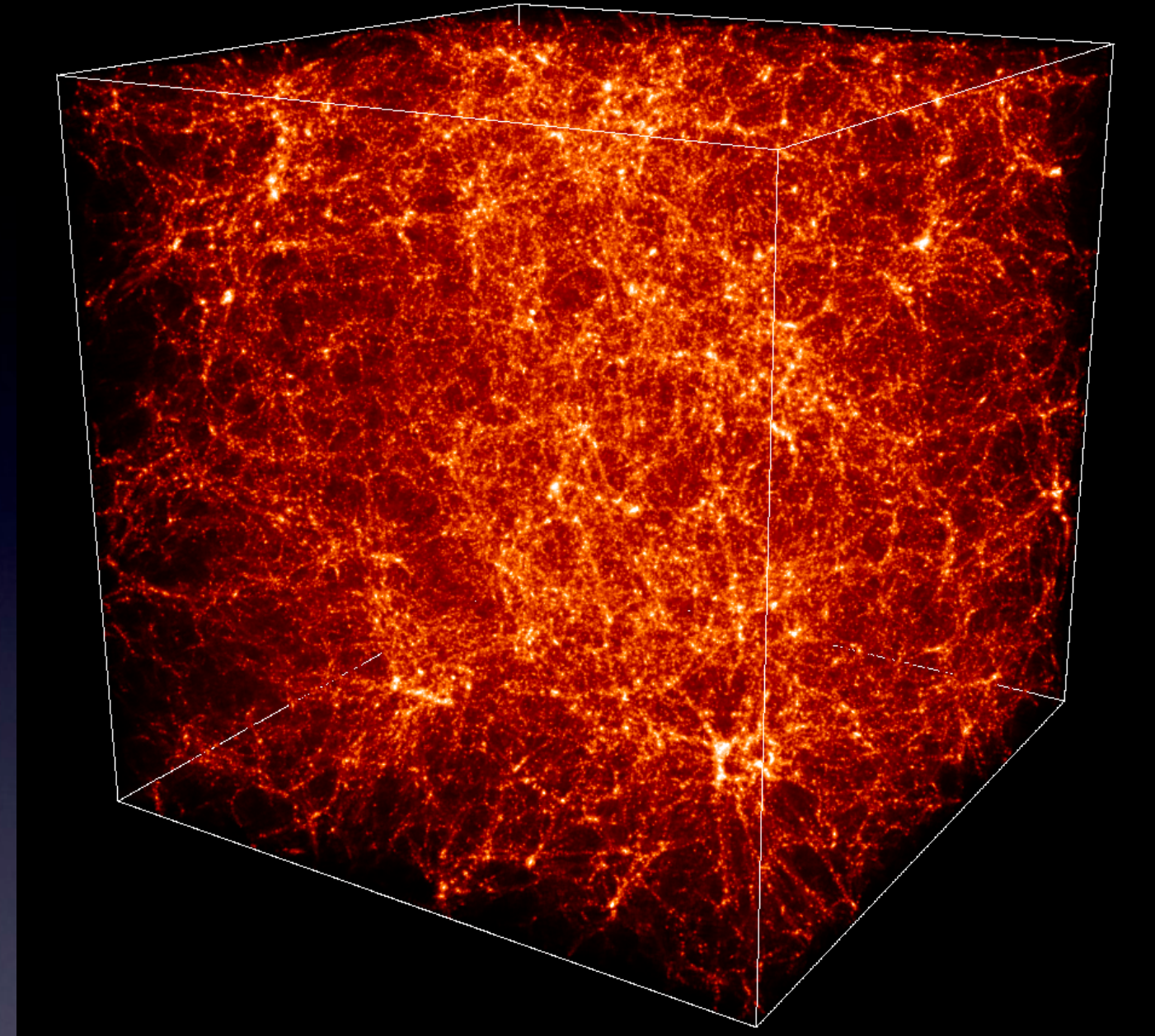
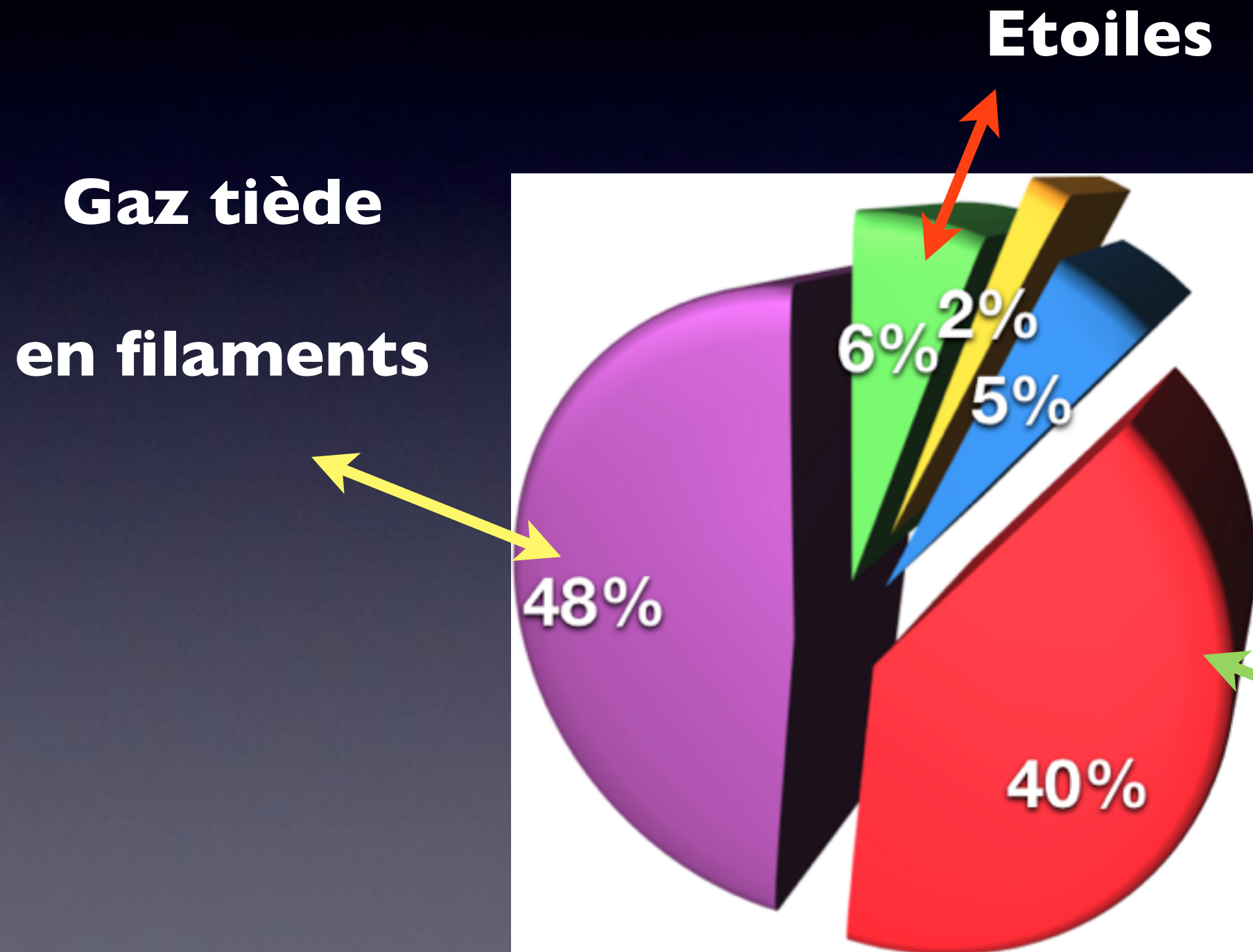
**Au bout de 3 minutes il y a eu fusion nucléaire pour
former les noyaux d'hydrogène et d'hélium dont la
proportion nous donne la quantité TOTALE de matière
ordinaire**

On retrouve cette matière à 1-2 milliards d'années

**Par contre le bilan semble déficitaire dans l'Univers
actuel**

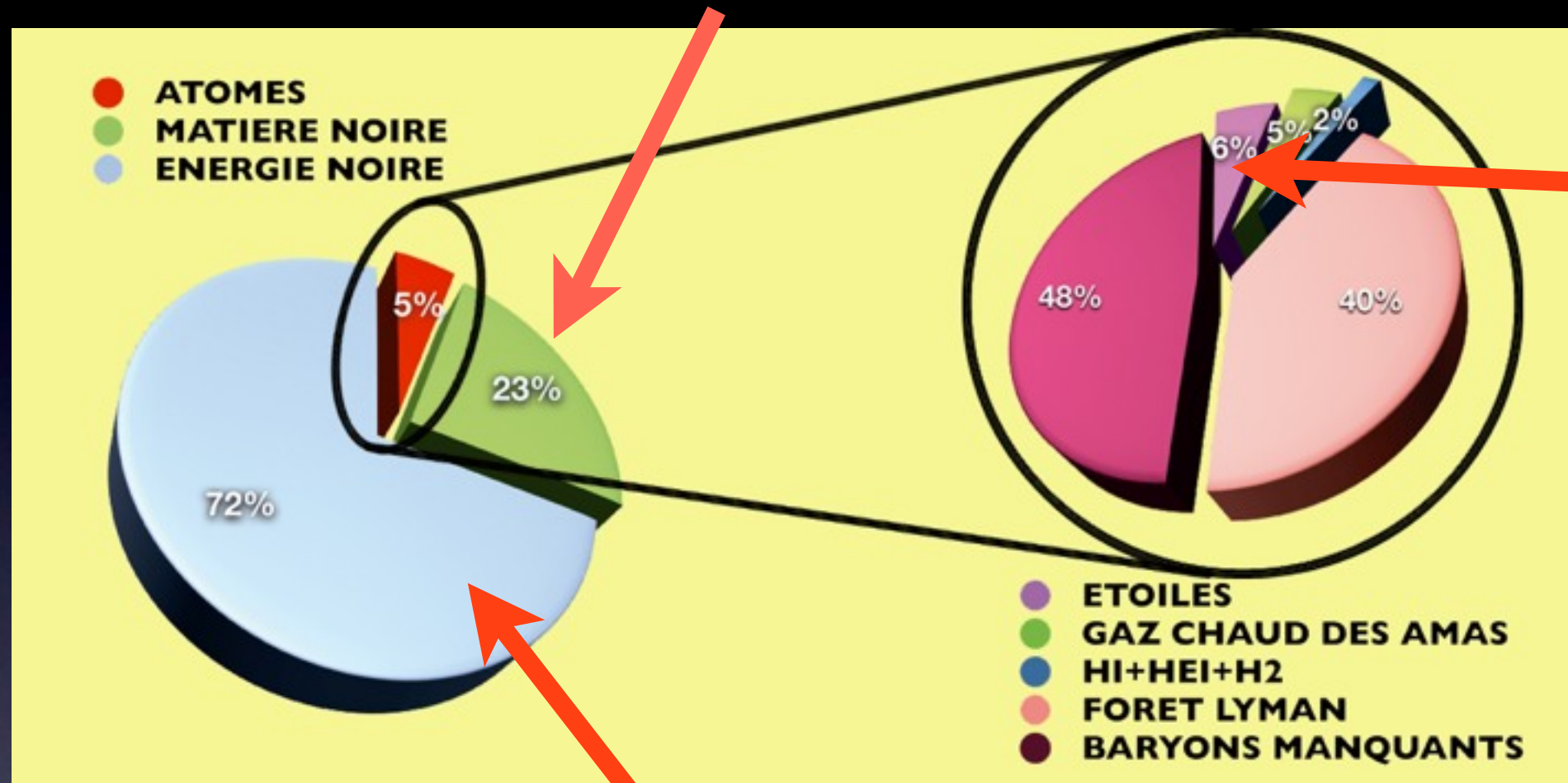
**C'est la compréhension globale du scénario de formation
des grandes structures via des simulations numériques qui
apporte la lumière**

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



**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 ...

THE END

