

Où a eu lieu le Big Bang ? ...

*... et quelques autres questions
au sujet de la cosmologie*



Woody Allen



“Tout ce que vous avez
toujours voulu savoir
sur le ~~sex~~ * →

* sans jamais oser le demander”



*L'expansion de
l'Univers*

(1972)

MISCONCEPTIONS ABOUT THE BIG BANG

Baffled by the expansion of the universe?
You're not alone. Even astronomers
frequently get it wrong

By Charles H. Lineweaver and
Tamara M. Davis



Où a eu lieu le Big Bang ?

Qu'est ce que le redshift cosmologique ?

*Jusqu'à quelle distance peut on espérer observer ?
(horizon cosmologique) ?*

Pourquoi voit on encore le rayonnement fossile issu du Big Bang ?

Quelles sont les conséquences de l'accélération de l'expansion ?

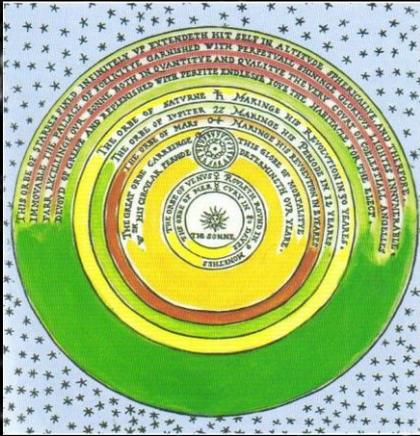
***Petit « résumé » de Cosmologie
dans le scénario du Big Bang***



Un vieux problème ...

.... Et un bon vieux principe

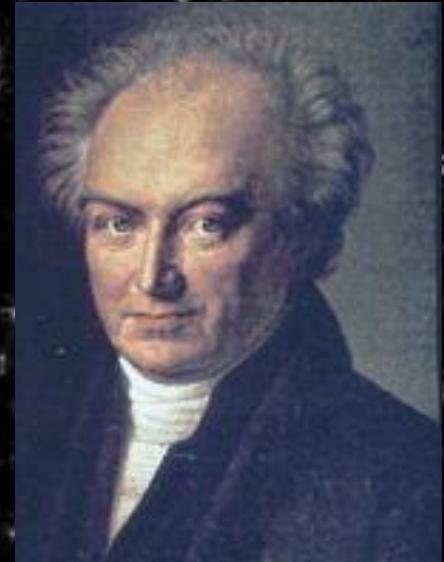
*Un Univers infini
Uniformément peuplé d'étoiles
Qui existe depuis toujours ... ??*



Thomas Digges 1576

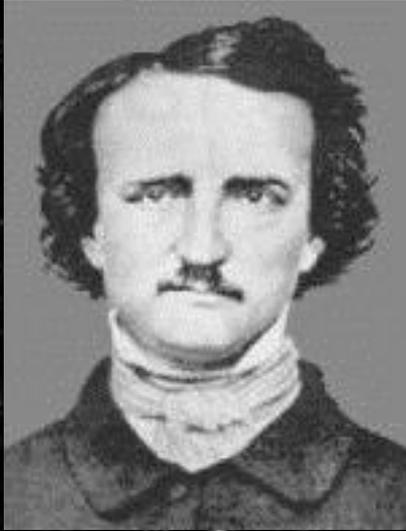


De Chéseaux 1744



Olbers 1826,

Le « Paradoxe d'Olbers »



Edgar A. Poe 1848

In « Eureka, un poème en prose » :

*« ... les distances sont si grandes
qu'aucune lumière issue de si loin
n'a pu nous parvenir ... »*

*Les sources lumineuse au-delà d'une certaine distance
(horizon) sont invisibles car leur lumière n'a pas eu
le temps de nous parvenir : L'Univers a un âge fini :*

L'Univers a un âge ... donc il a une histoire !



La vitesse de la lumière est finie et aucun « signal » lumineux, ou autre, ne peut aller plus vite que cette vitesse

***Les cosmologues sont les Archéologues de l'Univers :
Voir loin c'est voir dans le passé***

Les **Durées** se mesurent en années
Millions d'années Milliards d'années

 Une **Année-Lumière** (A.L.) est une **DISTANCE** :
la distance parcourue par la lumière en 1 an
soit environ 10 000 Milliards de km

On parlera donc de distances exprimées en Millions ou Milliards d'A.L.

NB : Autre unité plus « professionnelle » : le **Parsec**, environ 3 A.L.



« *Principe de Copernic* » :

Nous n'occupons pas une place particulière dans l'Univers

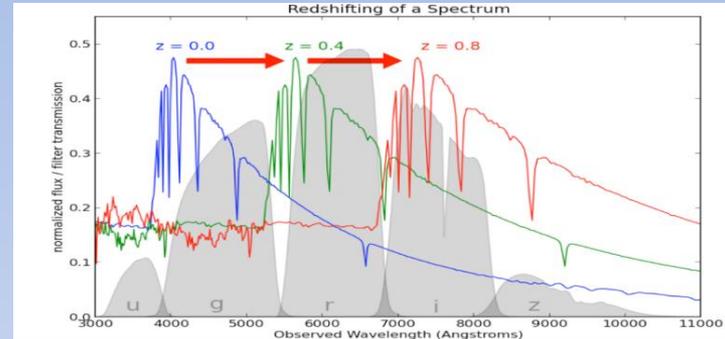
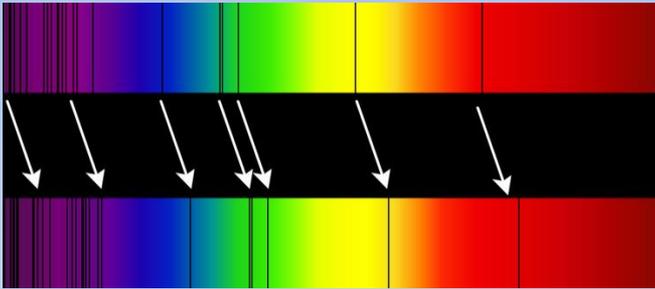
- Pas de direction d'observation privilégiée
- Pas de lieu privilégié

Univers isotrope et homogène

(à grande échelle)

Hubble (env. 1930) : L'Univers est en expansion !

Moins les galaxies sont lumineuses (donc plus **lointaines***), plus la lumière reçue est décalée vers les grandes longueurs d'onde, on dit qu'elle est « décalé vers le rouge » => « redshift cosmologique **Z** »



« Toutes les galaxies « assez distantes » s'éloignent de nous à grande vitesse »

+ Principe de Copernic :



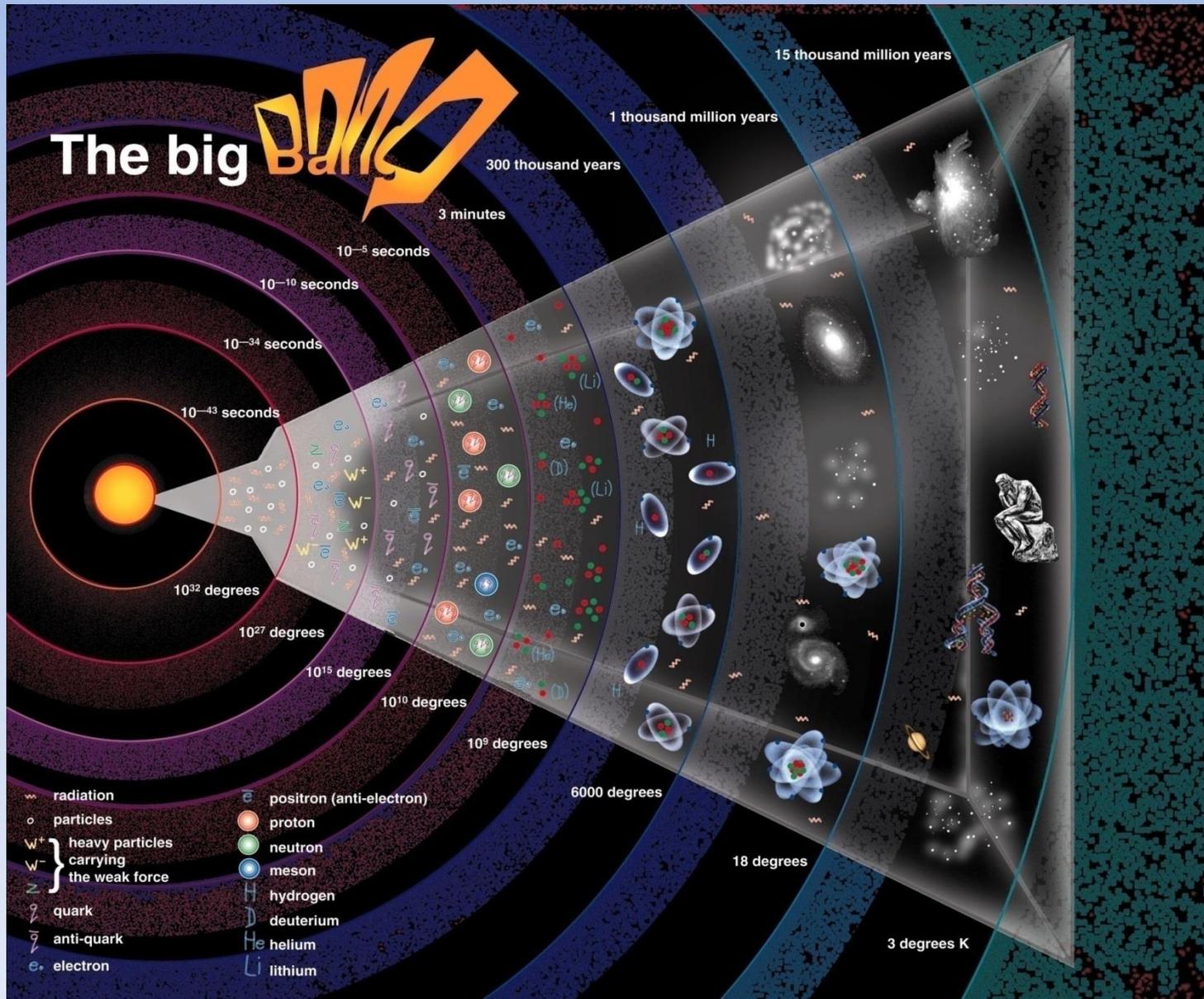
« Toutes les galaxies « assez distantes les unes des autres » s'éloignent les unes des autres »

« ***Assez lointaines** » ou « **assez distantes** »

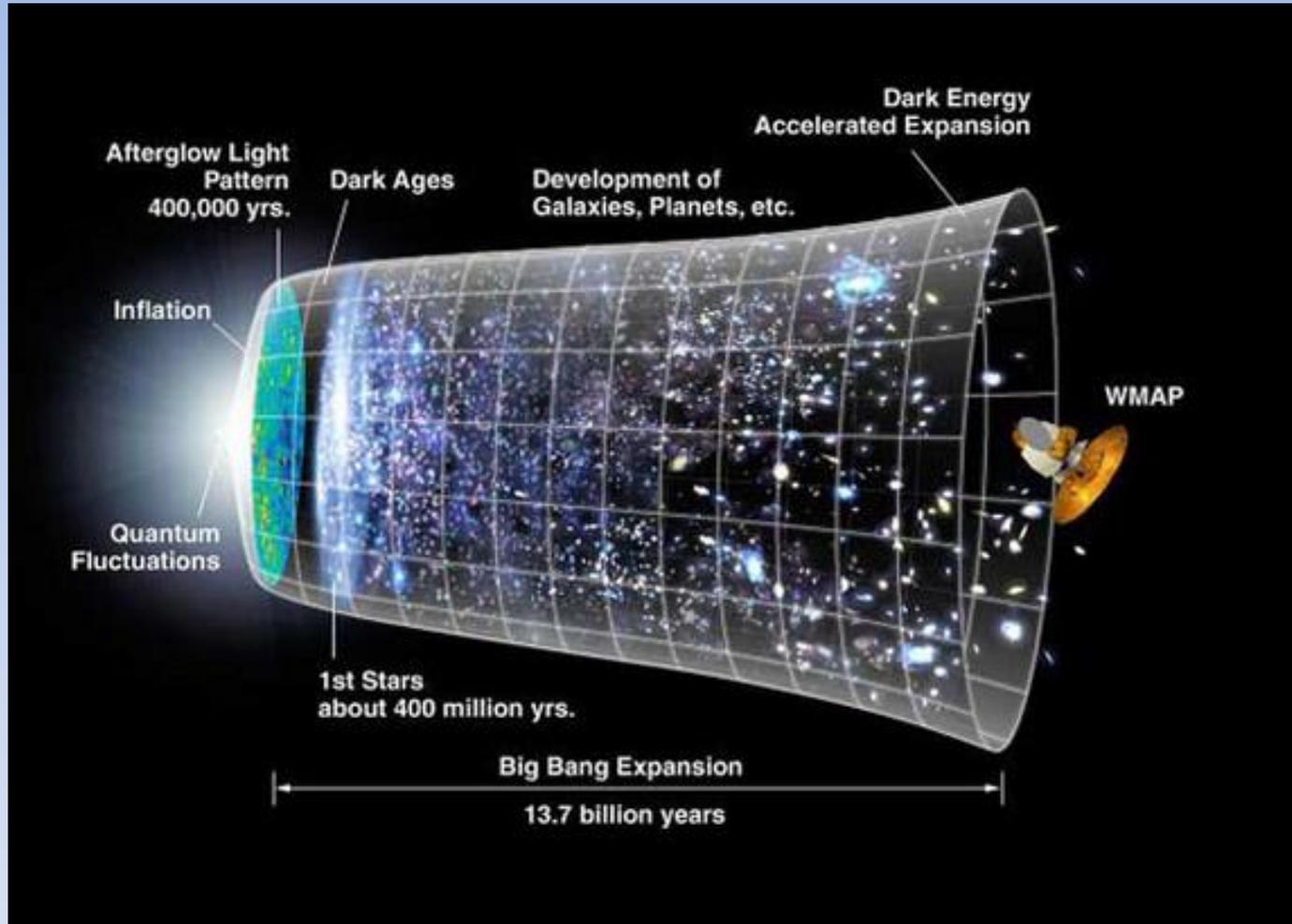
 Petits mouvements « en dehors du flot de l'expansion »



*Si on remonte le cours du temps Très petite distance entre tous les objets ...
Très haute Température de l'Univers Primordial ... Singularité = Big Bang ??*



La « cosmologie dans le modèle du Big Bang » est un *scénario* qui établit une cohérence entre un grand nombre d'observations de natures très différentes



Le cadre théorique est celui de la Relativité Générale d'Einstein appliquée à l'Univers dans son ensemble : le contenu en matière+énergie de l'Univers fixe sa Géométrie et l'évolution de sa vitesse d'expansion

Le scénario : En commençant en gros **1 sec.** après le Big Bang

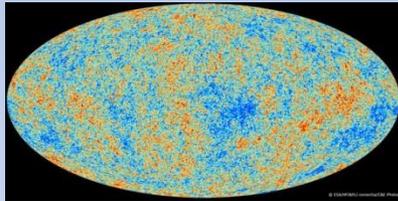


★ En **3 minutes** les *noyaux* des éléments légers se sont formés

Toutes les distances augmentent d'un facteur 1 Million



★ ★ **400 000 ans après** les *atomes* légers se forment
L'Univers devient transparent
env. 1 milliards de photons par atome



Les « âges sombres »

Premières étoiles

Grandes Structures apparaissent

Et évoluent sous l'effet de la gravitation ...

T° ↘

T° ↘



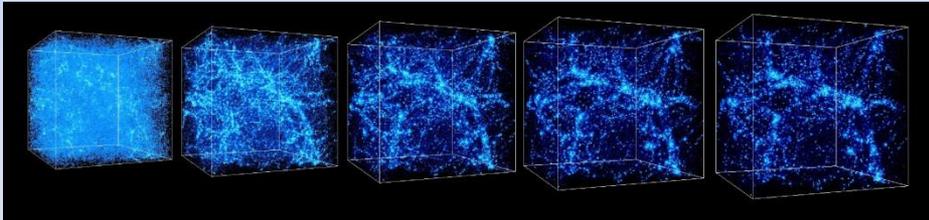
**Wanted !!
Dark
Matter**

T° ↘

X100



X10



Toutes les distances augmentent d'un facteur 1000

Maintenant : 13,8 Milliards d'années après BB

Env. 400 photons par cm³

La seule force à longue distance entre les galaxies étant la gravité (attractive) : l'expansion devrait se ralentir en permanence



Découverte à la fin du XXIème siècle :

*L'expansion est entrée dans une phase (lente) d'accélération
Il y a environ 6 à 7 Milliards d'années*

Cause ? : « Energie Noire »



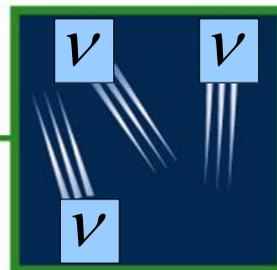
Constante cosmologique ?

Modification de la gravité ???

Bilan cosmique



Éléments lourds:
0.03%



Neutrinos:
0.47%



Etoiles:
0.5%



H et He
4%

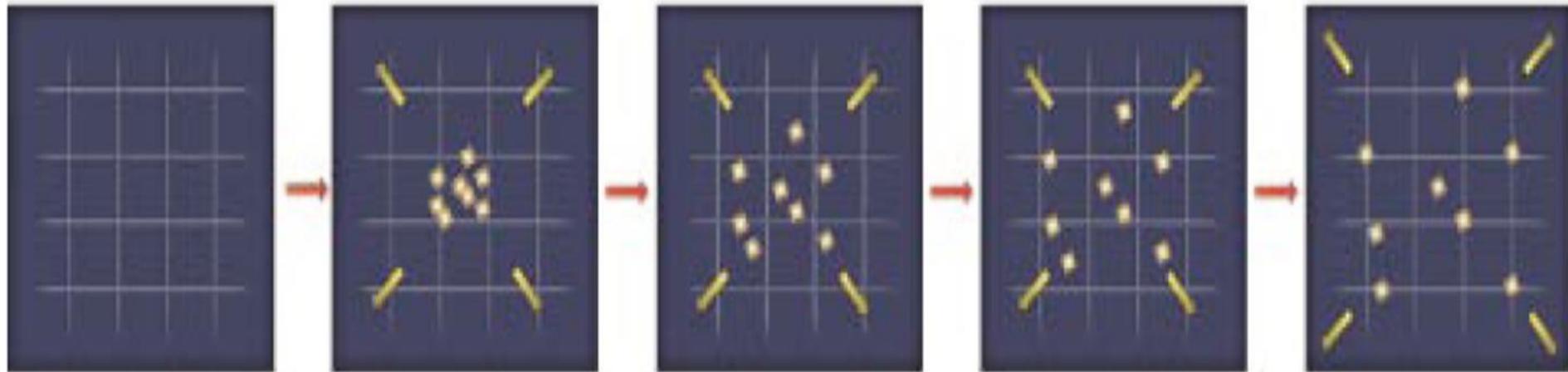
ogen
n:

Matière Noire: 25%

Energie Noire:
70%

95%
INCONNU

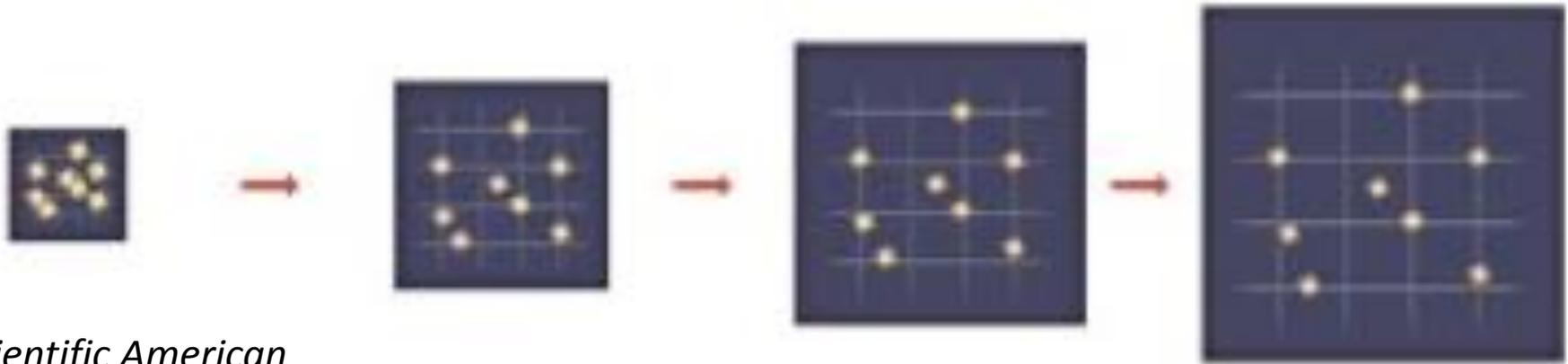
Le Big Bang n'est pas une « explosion » DANS l'espace



© Scientific American

Qui se produirait forcément à partir d'un point particulier
et
qui conduit à une expansion dans l'espace

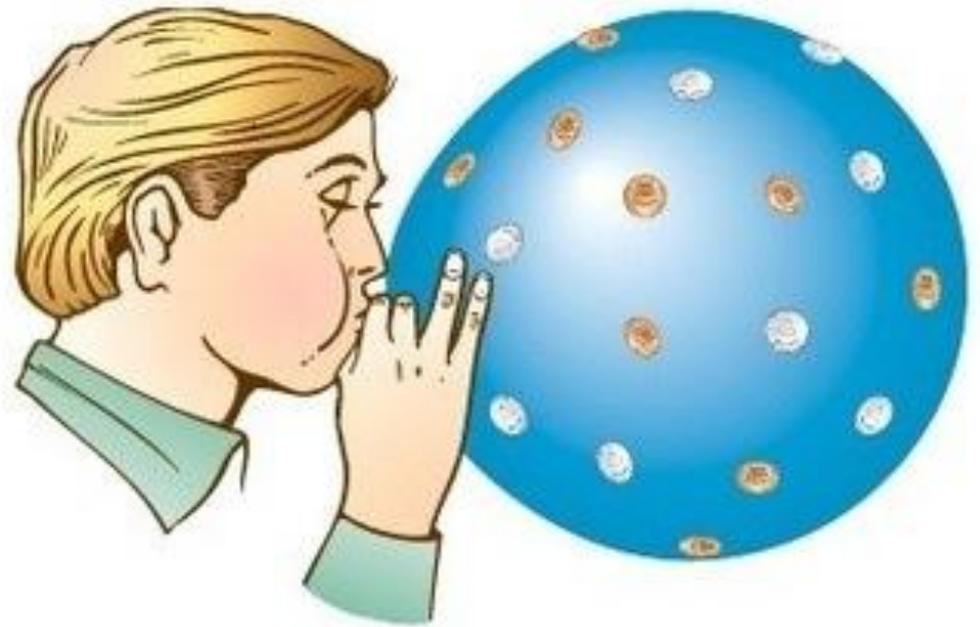
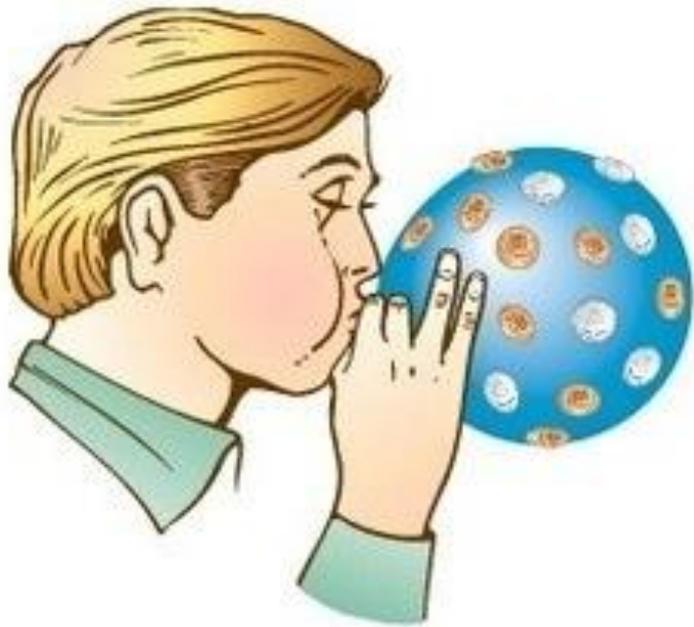
Il s'agit d'une expansion DE l'espace lui-même



© Scientific American

Le Big Bang a eu lieu partout ou, plus précisément, l'Univers a connu une phase de très hautes température et de très haute densité où que l'on se trouvait, il y a environ 13,8 Milliards d'années

A cette époque l'Univers n'était pas « plus petit » mais tous les objets physiques étaient très proches les uns des autres



Une sphère n'a pas de bords ni de centre (sur la sphère elle-même)

! C'est une image où on passe de 3 dimensions pour l'espace à 2 dimensions (sur la sphère) pour mieux visualiser.

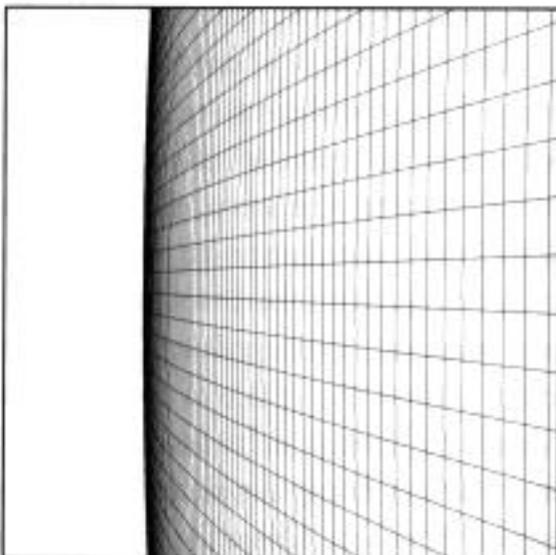
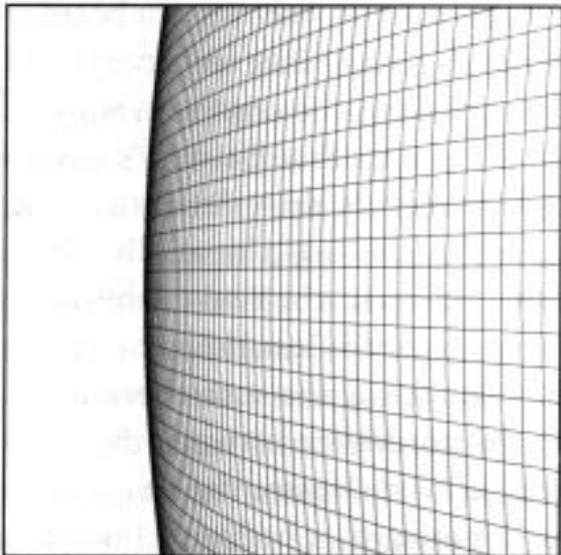
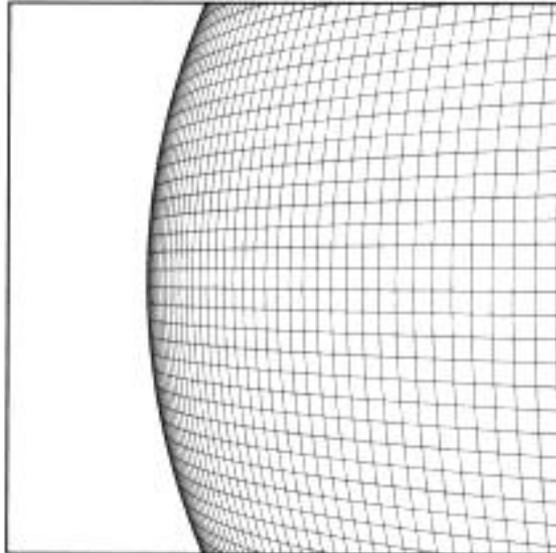
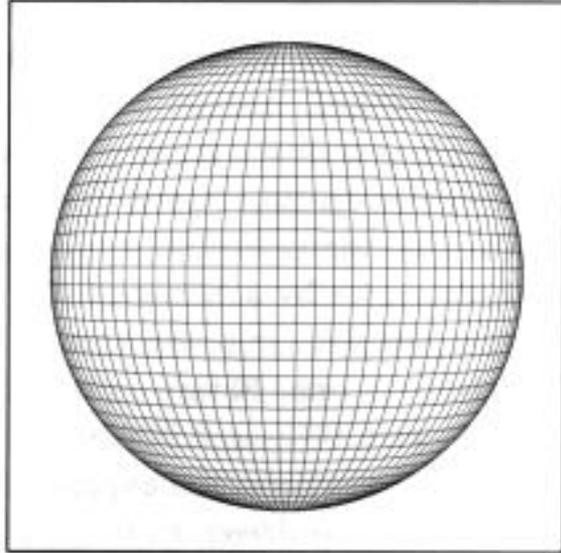
! On n'a pas besoin d'imaginer une expansion dans un espace plus grand (à 4 dimensions)



Observations :



« notre Univers n'a pas de courbure »



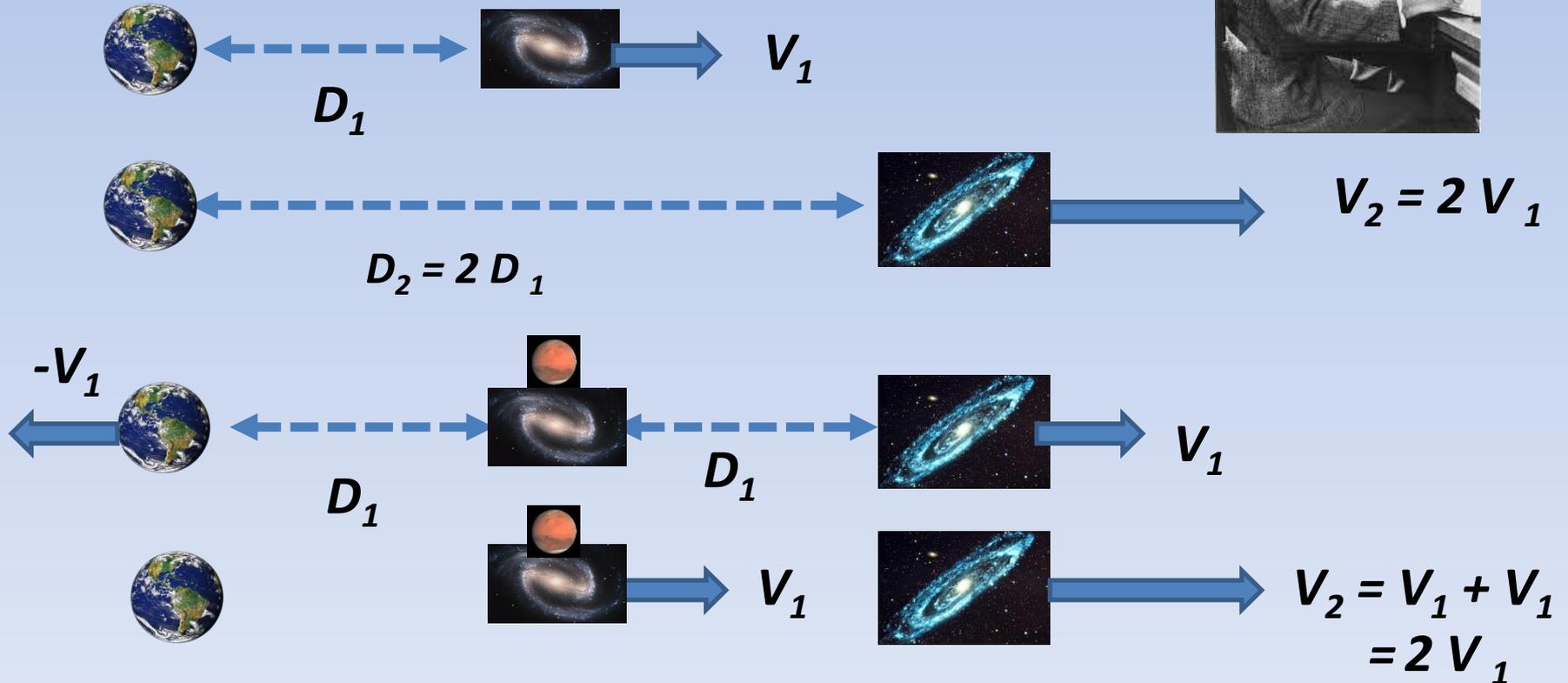
La « platitude » vue comme la limite d'une sphère de rayon infini ...

A l'appui de « expansion **de** l'espace et pas **dans** l'espace » :

1) *Le principe Copernicien ! Une expansion dans l'espace, la même dans toutes les directions signifierait qu'il existe un endroit particulier (le centre de l'expansion) dont nous serions très proches...*

2) *La loi de Hubble (1929) :*

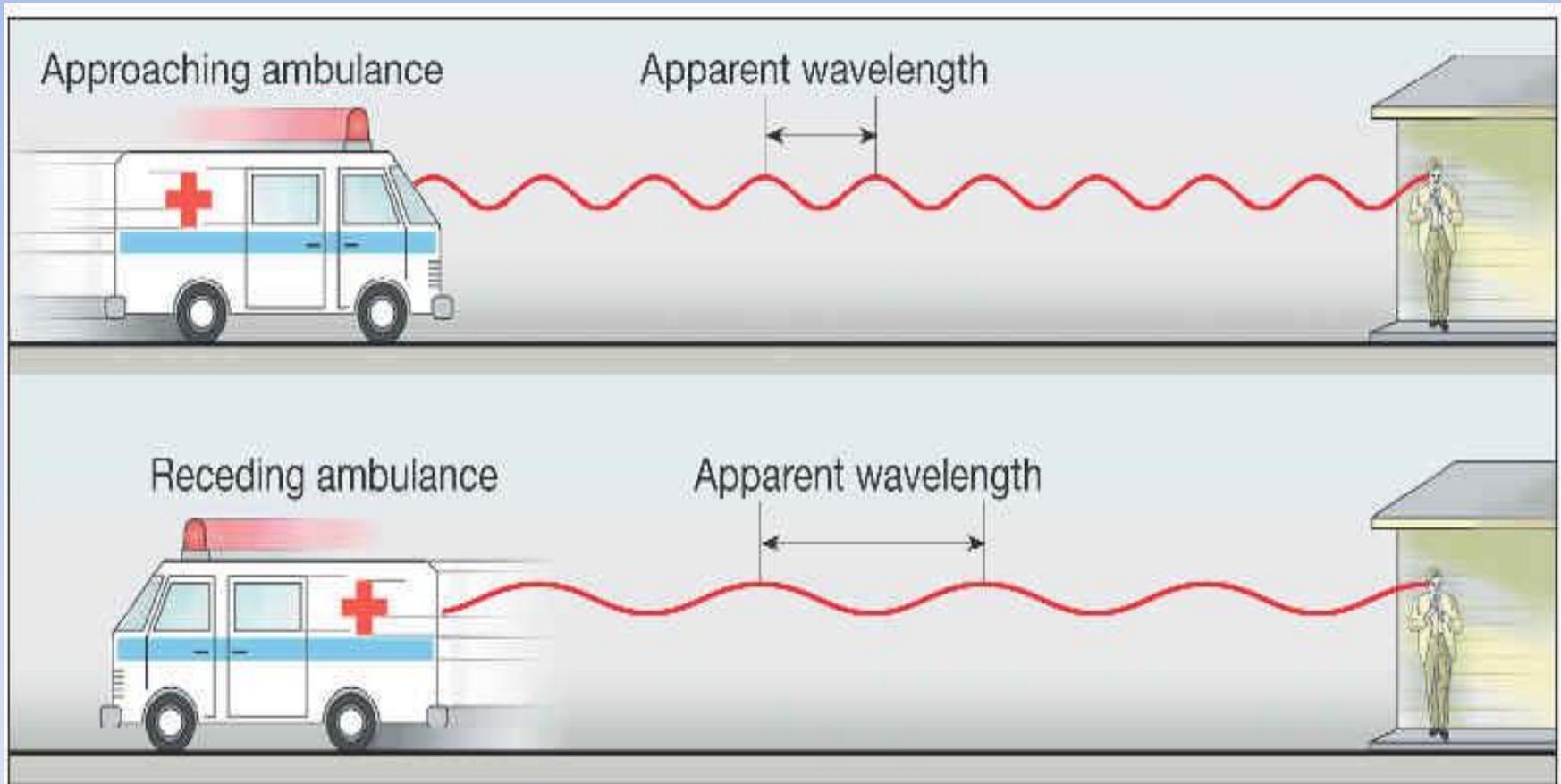
$$V_{rec} = H_0 D$$





3) *Le redshift cosmologique z n'est PAS un effet Doppler !*

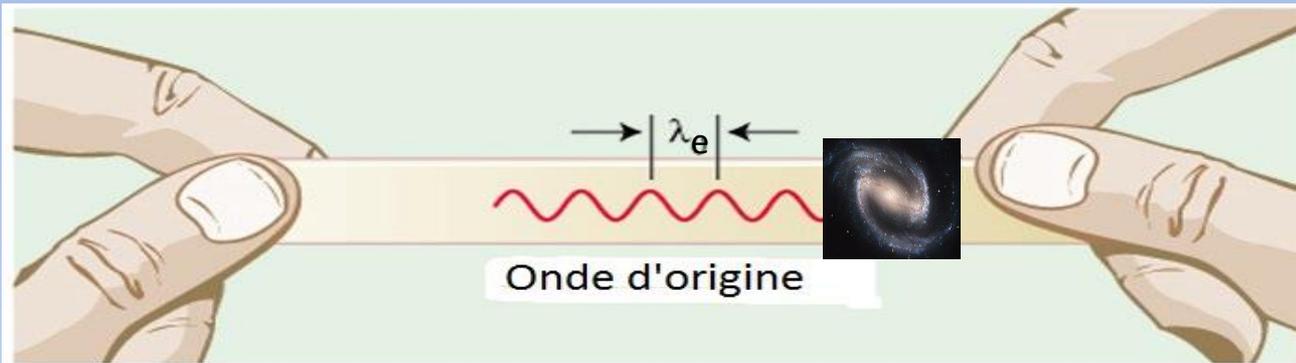
Effet Doppler sonore « analogue » à effet Doppler de la lumière lorsqu'une étoile ou une Galaxie proche s'éloigne ou se rapproche de nous



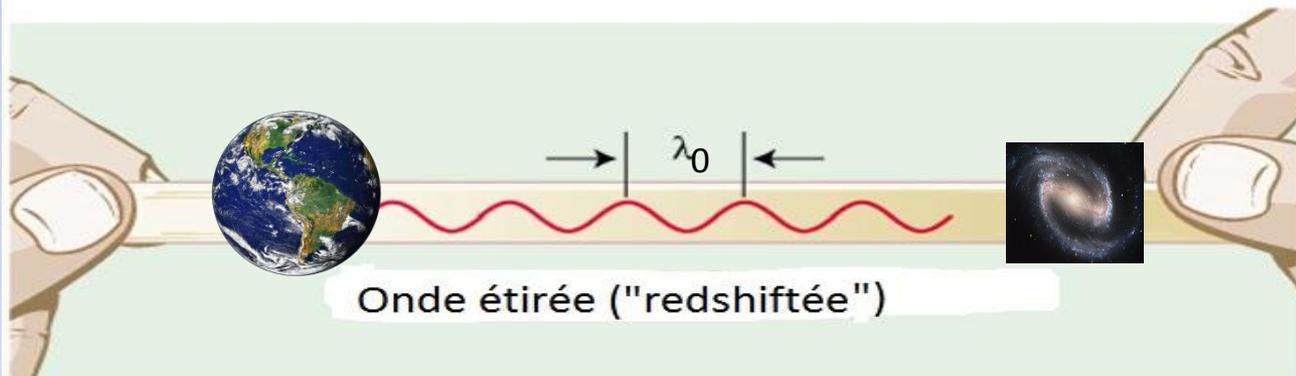
Mesure du décalage de longueur d'onde donne la vitesse de l'émetteur

C'est un déplacement DANS l'espace

Le décalage de longueur d'onde mesure de combien l'espace s'est dilaté entre le moment de l'émission de la lumière et le moment de la réception, ce que l'on peut traduire en terme de « vitesse de récession » .



(a) Une onde dessinée sur un ruban



(b) la longueur d'onde augmente lorsqu'on étire le ruban

$$Z = \frac{\lambda_0 - \lambda_e}{\lambda_e}$$

Les relations « redshift – vitesse de récession » et aussi « redshift – distance » ne sont pas simples car elle dépendent de toute l'histoire de l'évolution de l' Univers

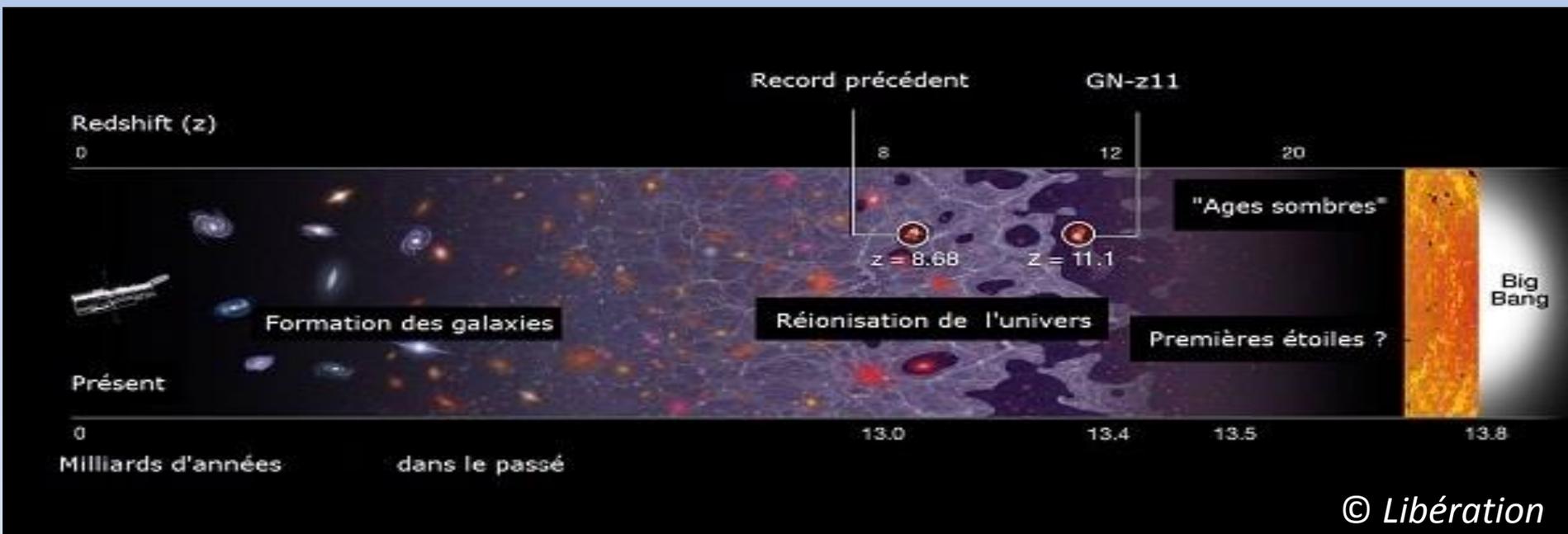
Vous avez dit « distance » ?? ... oui, mais laquelle ?????

**Un exemple fréquent de confusion :
quelle est la distance à la galaxie
la plus lointaine observée de nos jours ?**

*Mars 2016
Hubble Telescope*



*Lumière émise 400 Millions d'années après BB
Soit il y a env. 13,4 Milliards d'années*

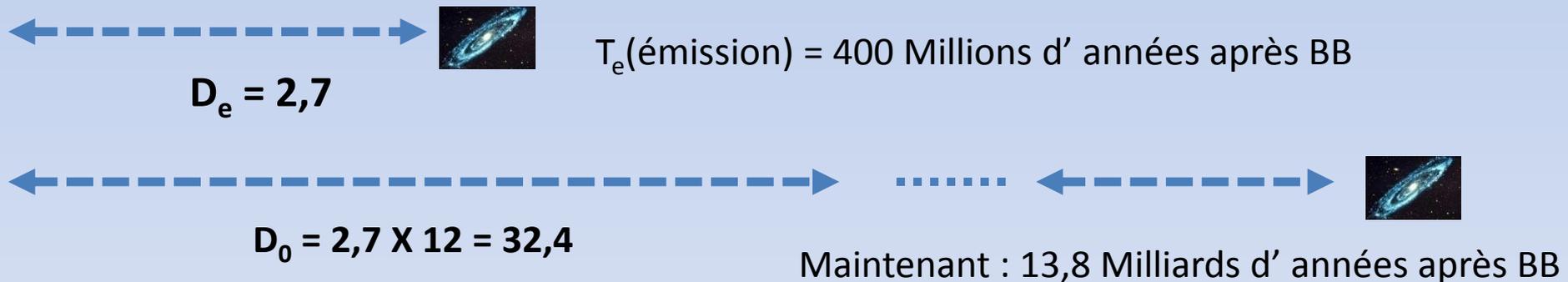


$z \sim 11$  Les distances entre galaxies étaient 12 fois plus petites que maintenant

« Elle est située à 13,4 Milliards d'A.L. » Ou bien : « Elle se situe à 32,4 Milliards d'A.L. »

En fait la confusion vient du fait qu'on peut parler de 3 distances différentes :

- La distance à laquelle **était** cette galaxie quand la lumière a été émise : 2,7 Milliards d'A.L.
- La distance à laquelle est cette galaxie **maintenant** : 32,4 Milliards d'A.L.
- La **distance parcourue par la lumière** entre l'émission et la réception : 13,4 Milliards d'A.L.

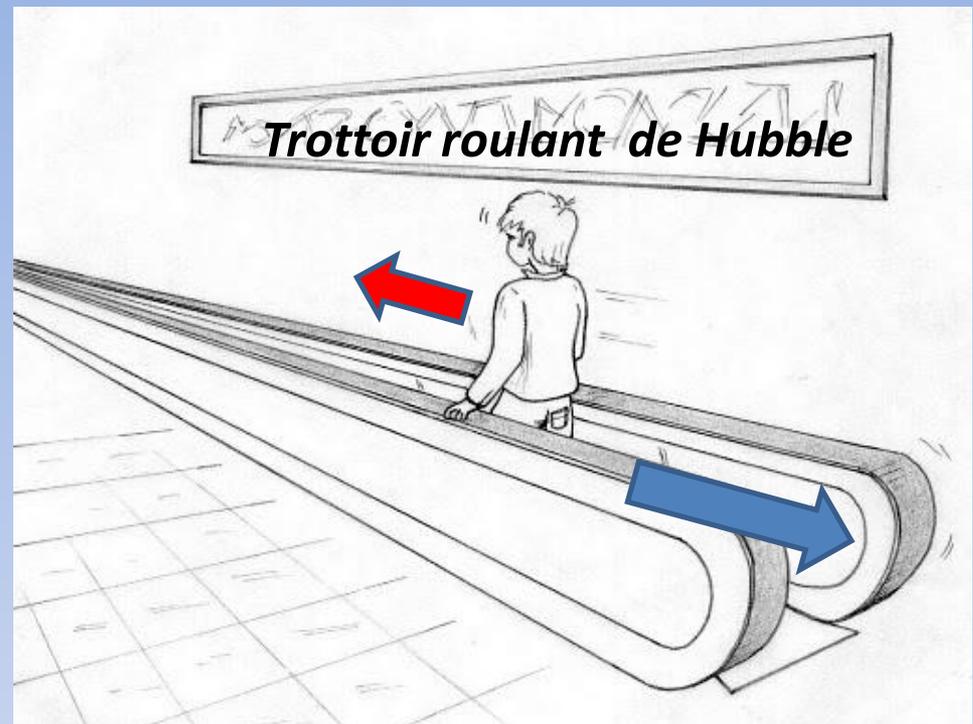


Pourquoi la lumière a-t-elle mis autant de temps ($13\,800 - 400 = 13\,400$ M ans) pour nous parvenir ?? Soit env. 5 fois le temps qu'elle mettrait pour venir de D_e ??
..... *Si l'Univers n'était PAS en expansion !!!*

**La lumière se propage
dans un espace qui se dilate :**



« Vitesse » d'entraînement
Du « trottoir roulant cosmique »
peut être plus grande que la
vitesse de la lumière !



Cette Galaxie lointaine s'éloigne de nous avec une vitesse de récession plus grande que la vitesse de la lumière et cela n'est pas en contradiction avec la Relativité car rien ne limite la « vitesse » d'expansion DE l'espace lui même

Dès que $D(\text{maintenant})$ est plus grand que **14 Milliards d'A.L.**

(Distance de Hubble = c/H_0) $z > 1,46$ $V_{rec} > C$

... et comme l'expansion s'est ralentie, sa vitesse de récession a toujours été plus grande que celle de la lumière !!!

La Distance de Hubble augmente avec le temps : le photon émis par cette galaxie lointaine est entré dans une zone où l'expansion était plus lente et il a fini par nous parvenir

Distance maximum à laquelle on a (en principe) accès ??

Horizon : distance telle que la lumière émise par un objet au-delà de l'horizon n'a pas eu le **temps** de nous parvenir aujourd'hui.

L'Horizon à un instant t est fonction de l'âge de l'Univers à cet instant

A l'instant présent : $T_0 \sim 13,8$ Milliards d'années

$$D_{\text{horizon}} \sim 46 \text{ Milliards A.L.} \quad z = \infty$$

« Rayon de l'Univers Observable »

En fait ... on ne peut pas observer de lumière émise avant la date de env. 400 000 ans après le BB car l'Univers n'était pas transparent

$$D_{\text{SDD}} \sim 42 \text{ Milliards A.L.} \quad z = 1000$$

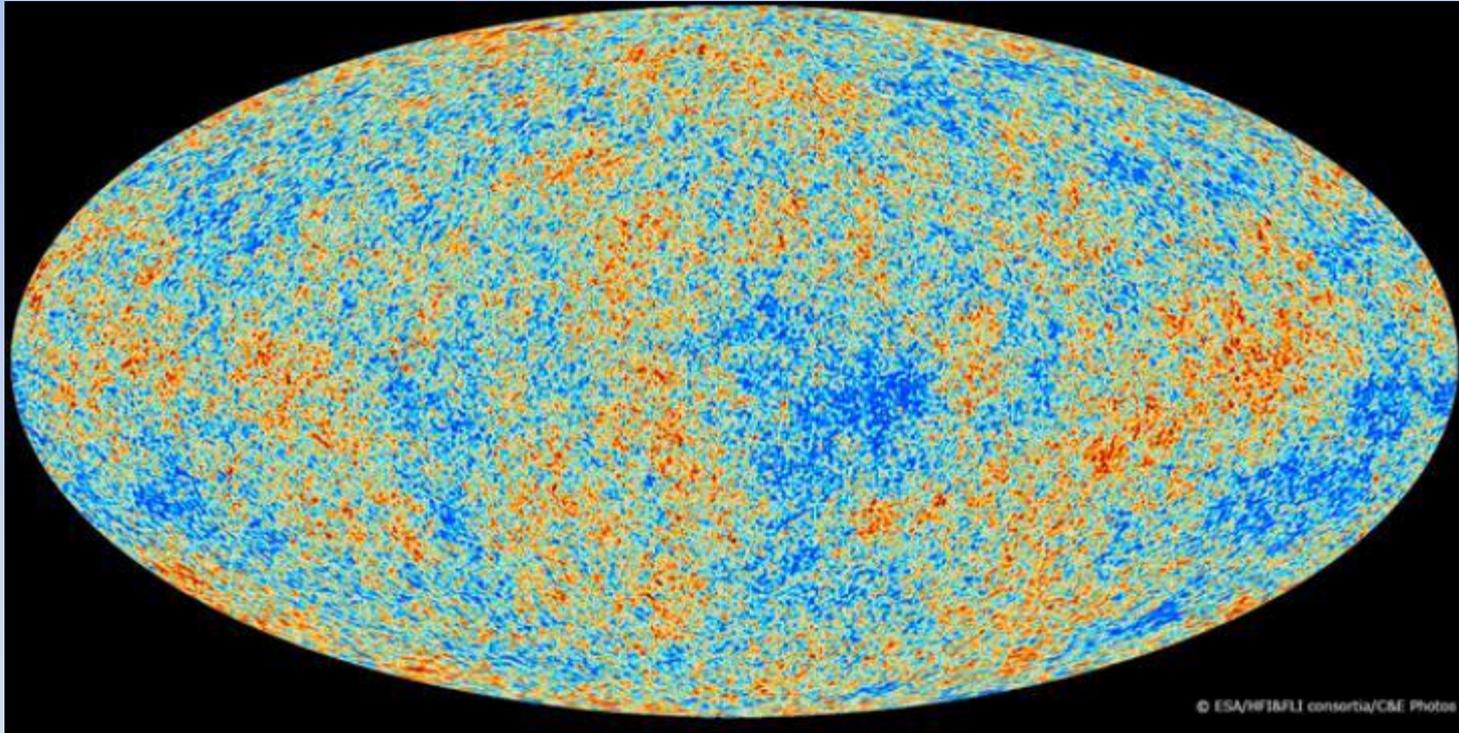
A cette date s'est produite une émission de lumière qui est le fameux « rayonnement fossile micro-ondes » ou Cosmic Microwave Background = CMB

*Le CMB sur votre (ancienne) TV
(10% de la « neige » = bruit de fond électromagnétique)*



« CMB »

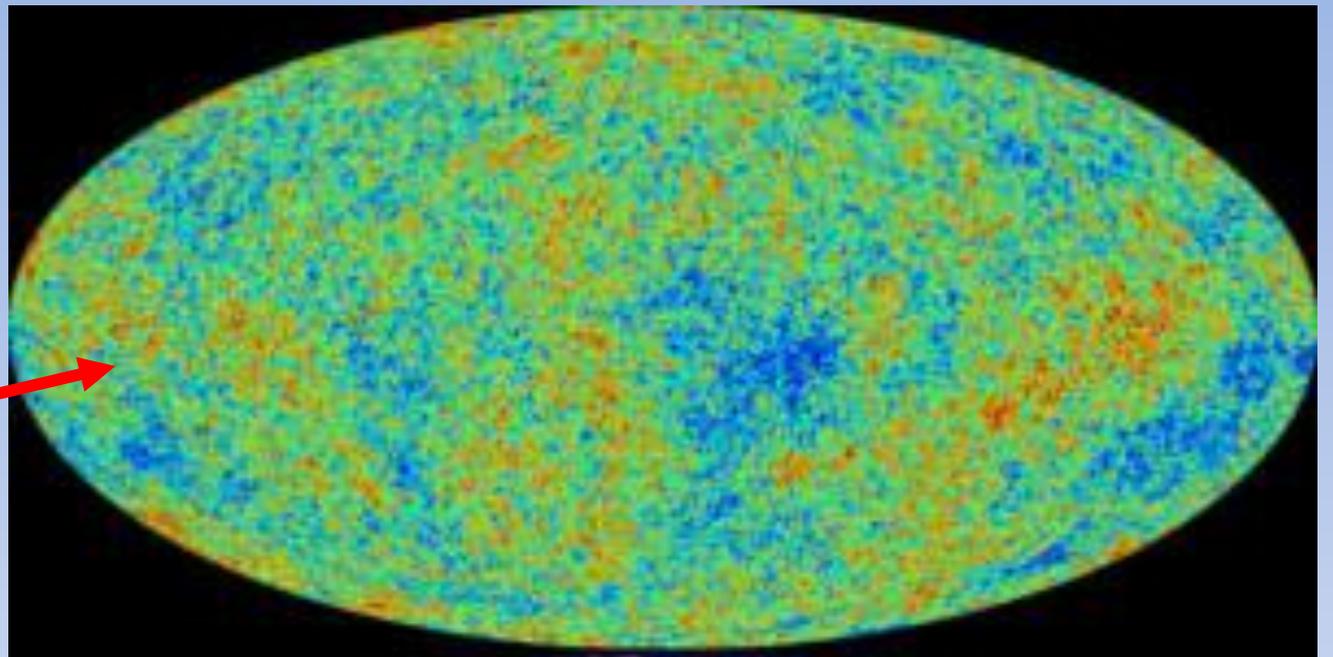
Rayonnement « fossile » émis 400 000 ans après le Big Bang :



Rayonnement Micro-Ondes « à 3 °K » maintenant

3000 °K à l'époque, : depuis, les distances dans l'Univers se sont dilatées d'un facteur 1000 et la température a baissé d'un facteur 1000

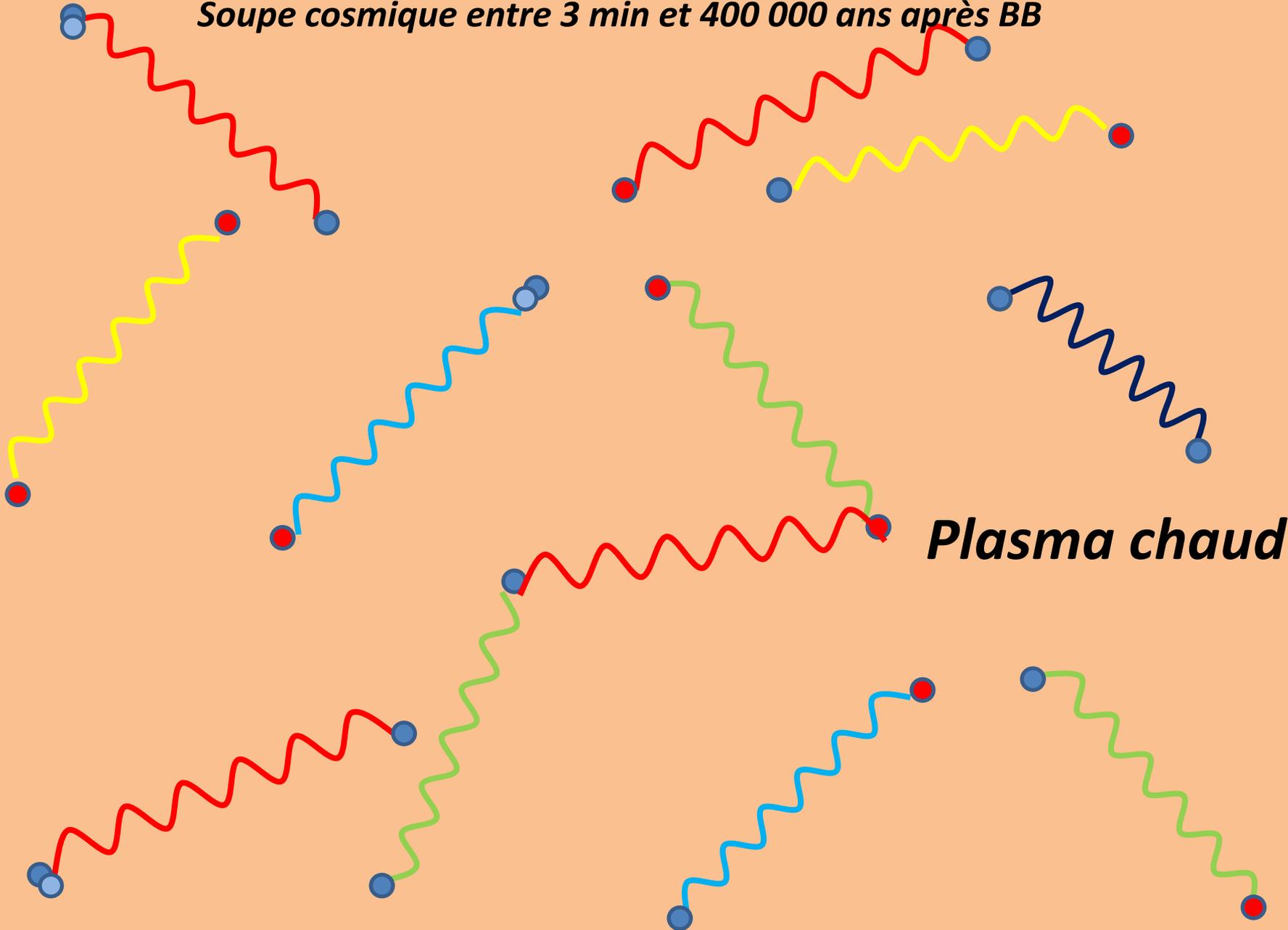
Carte du ciel



Carte de la Terre



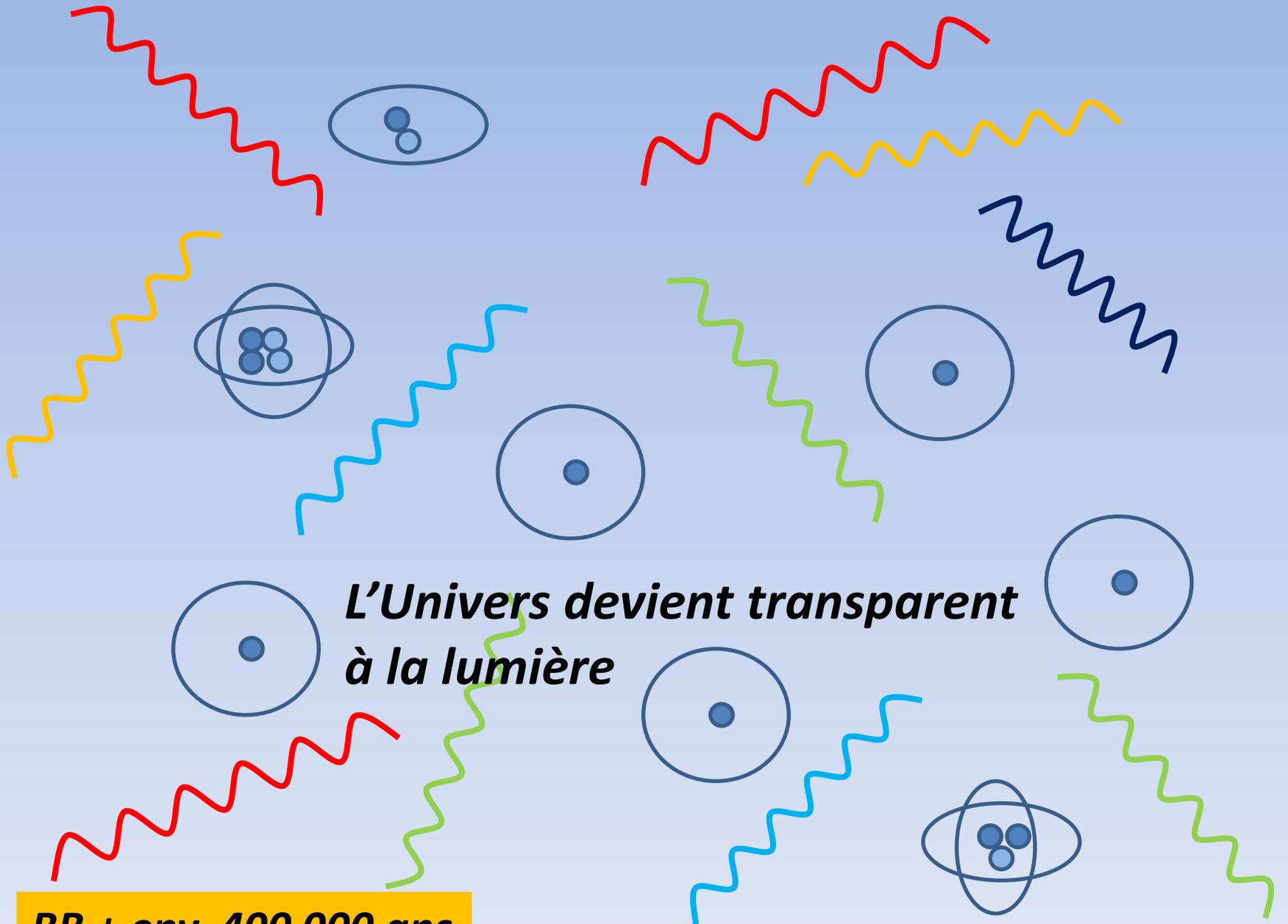
Soupe cosmique entre 3 min et 400 000 ans après BB



Plasma chaud

+ des neutrinos + de la matière noire + des ondes gravitationnelles primordiales ??

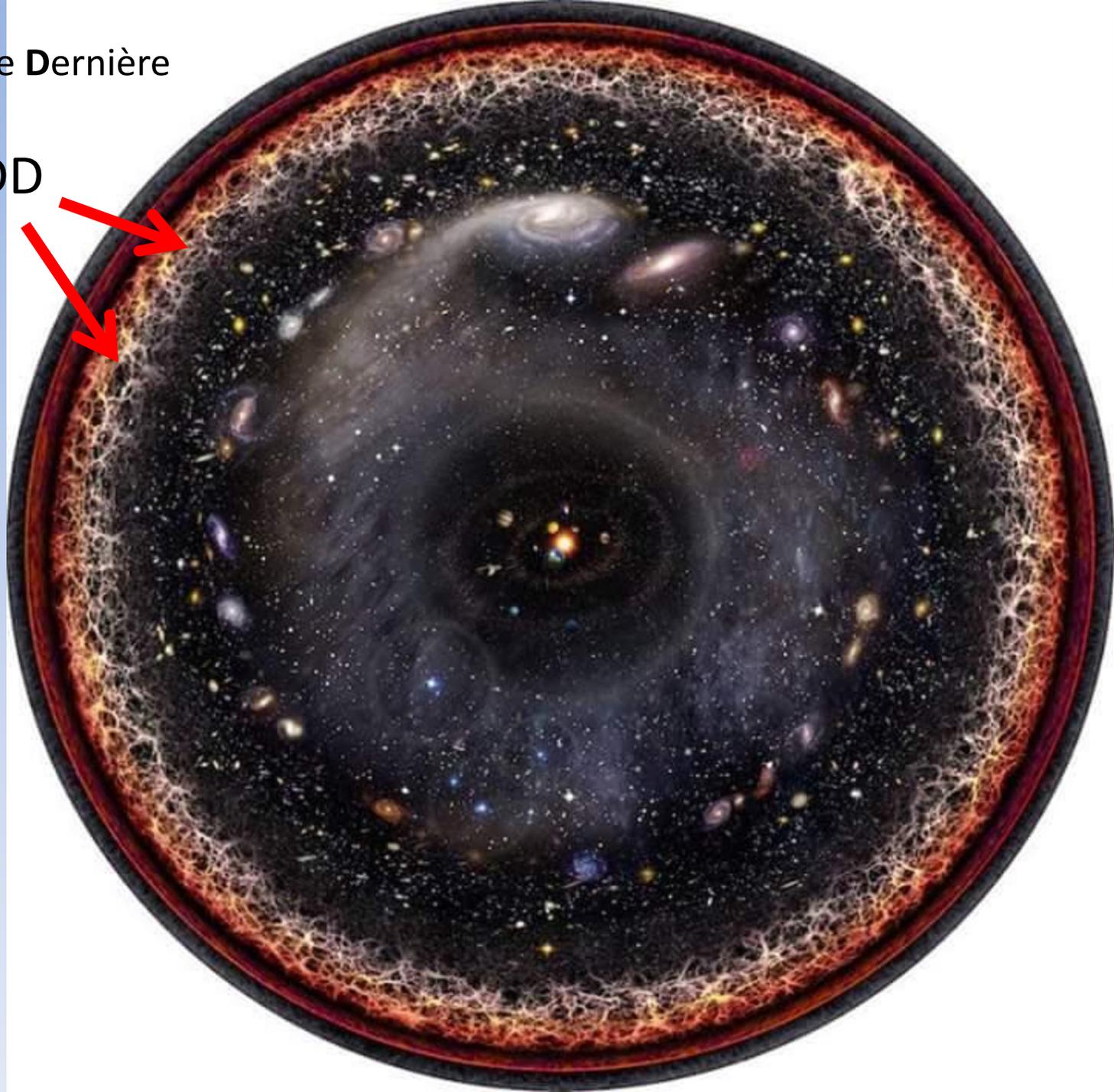
L'expansion fait baisser la température : les atomes (légers) se forment

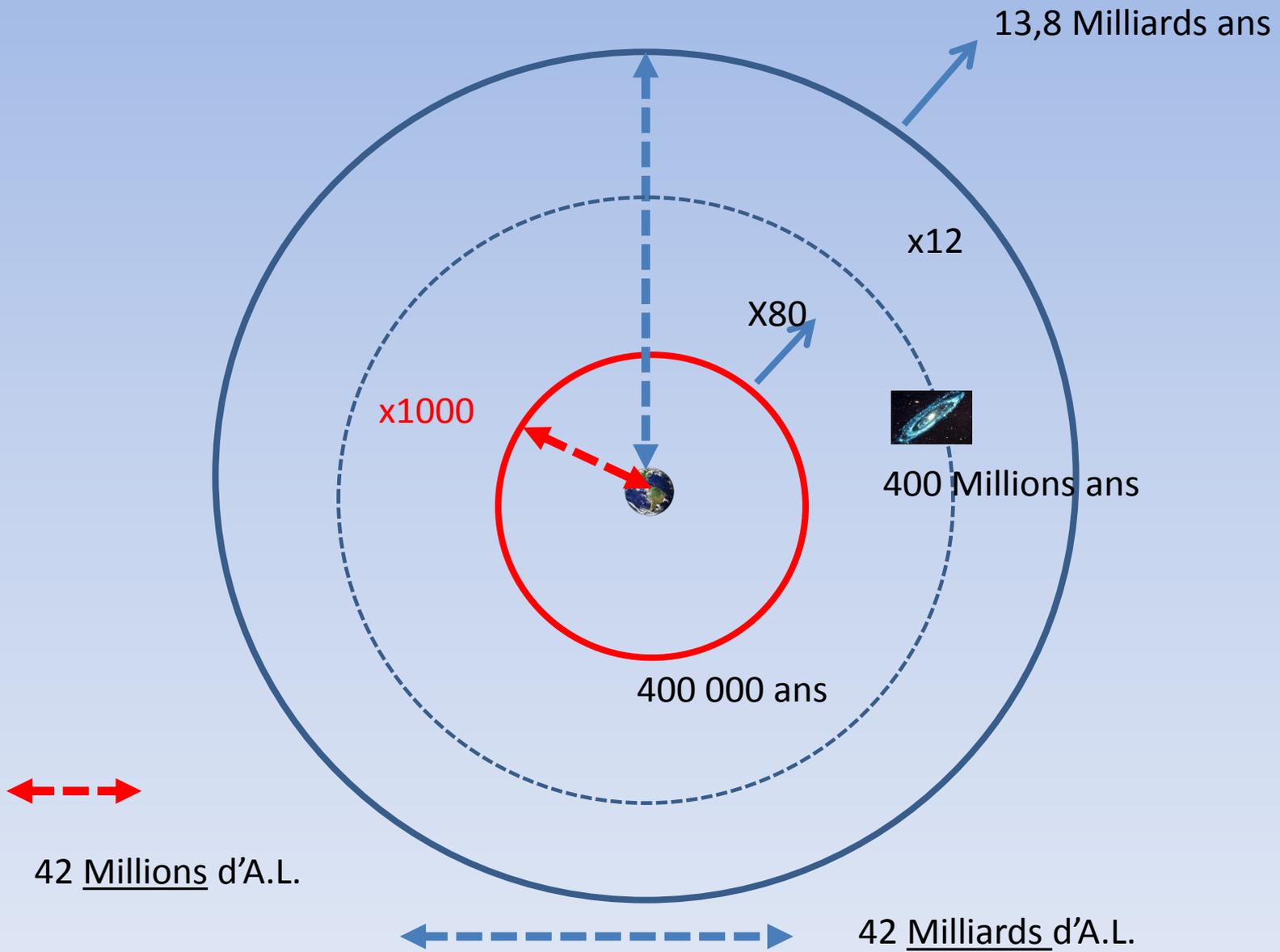


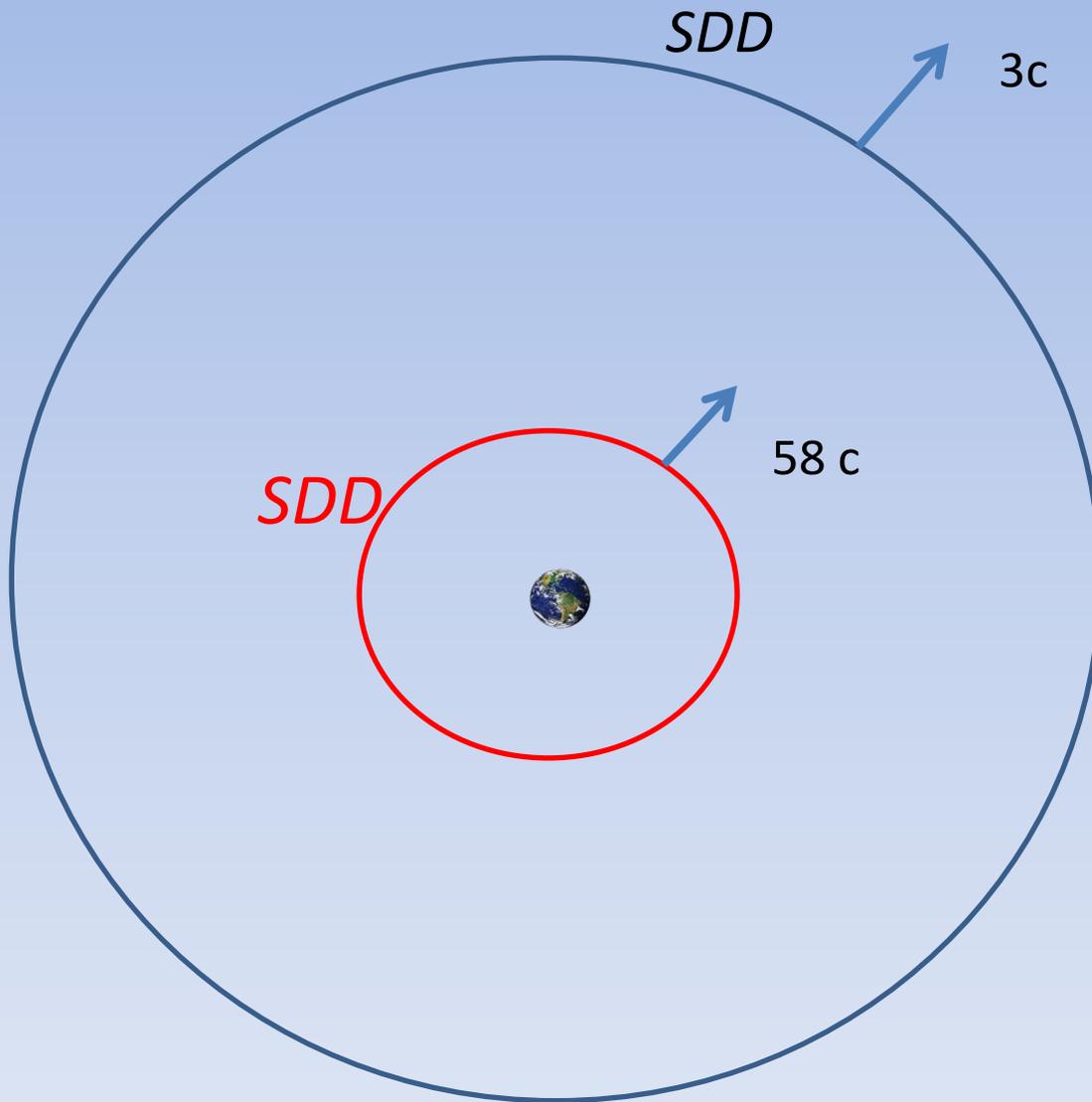
BB + env. 400 000 ans

Surface de Dernière
Diffusion

SDD



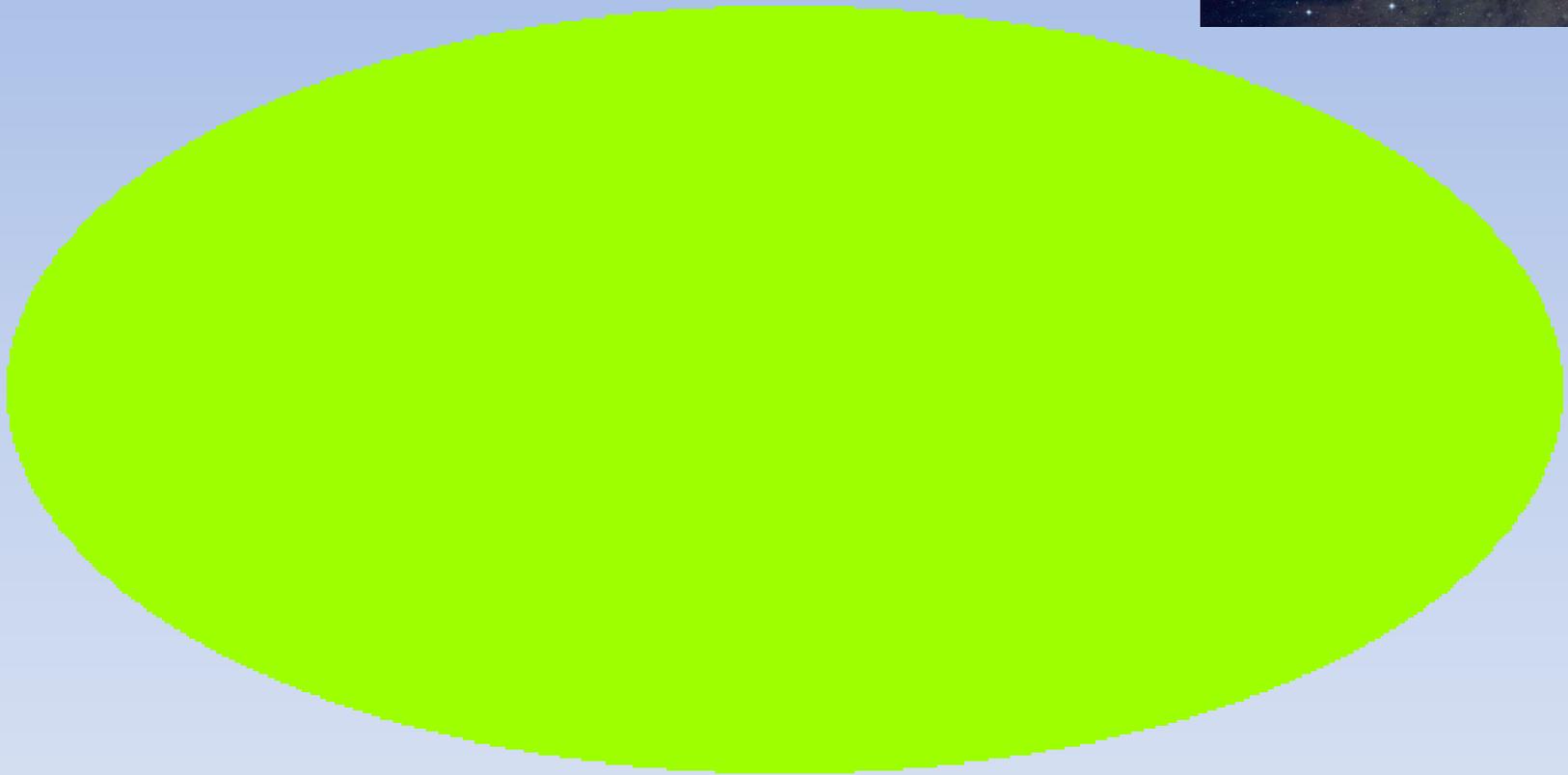




Obesrvation maintenant

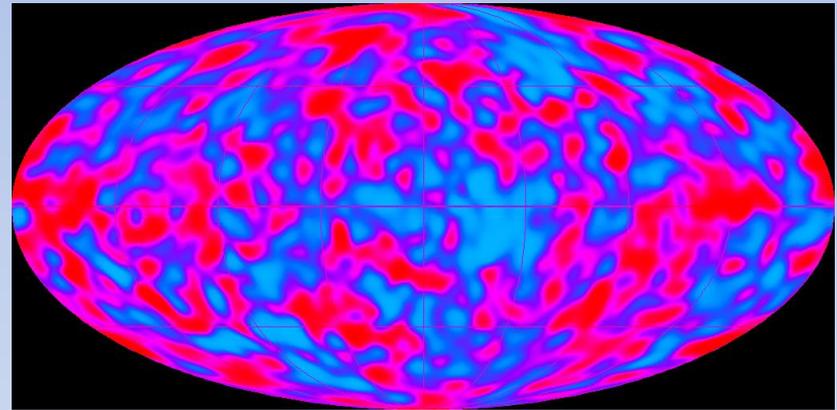
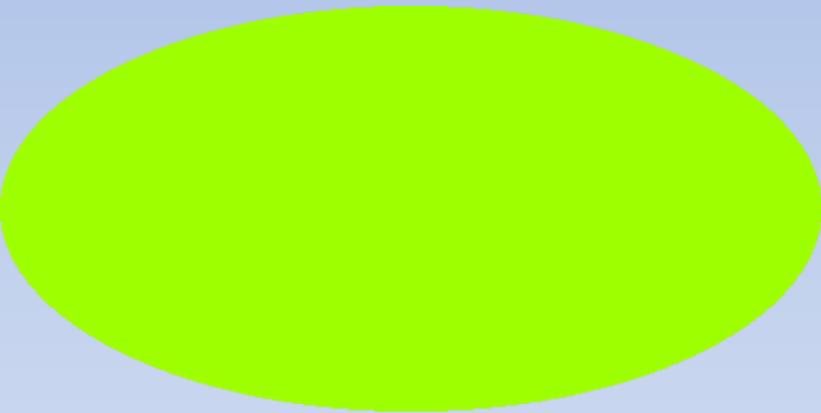


Rayonnement isotrope au 100 000ème près



**L'Univers était extrêmement Homogène
*(et il l'est resté à grande échelle)***

Mesures plus précises grâce à des missions spatiales donnent une carte du ciel des fluctuations de température de ce rayonnement CMB :

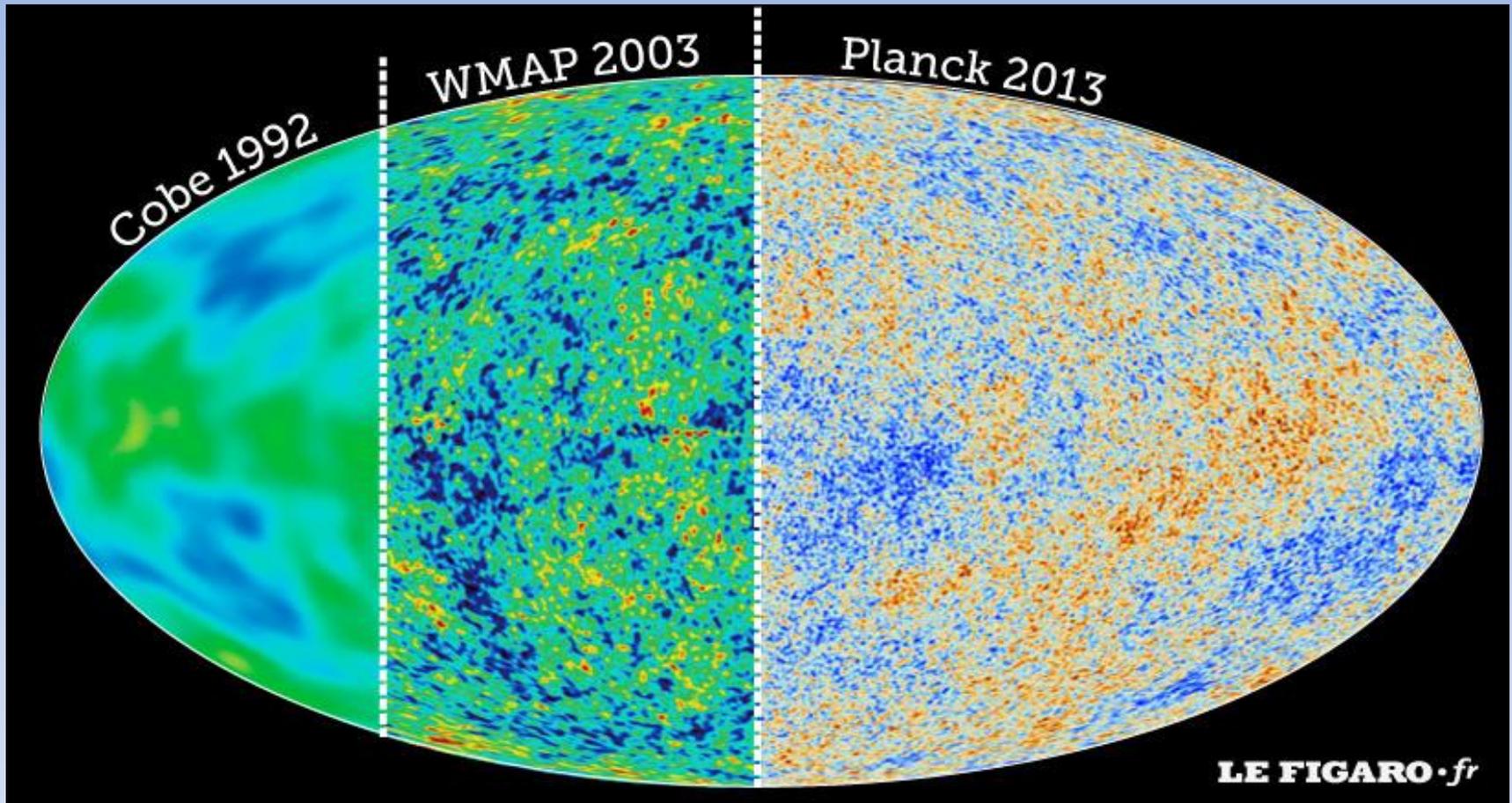


COBE 1992

***Ces fluctuations révèlent que l'Univers n'était pas parfaitement homogène,
Heureusement !***

... Car sinon pas d'évolution vers de grandes structures, pas de galaxies, ... pas de Terre ...

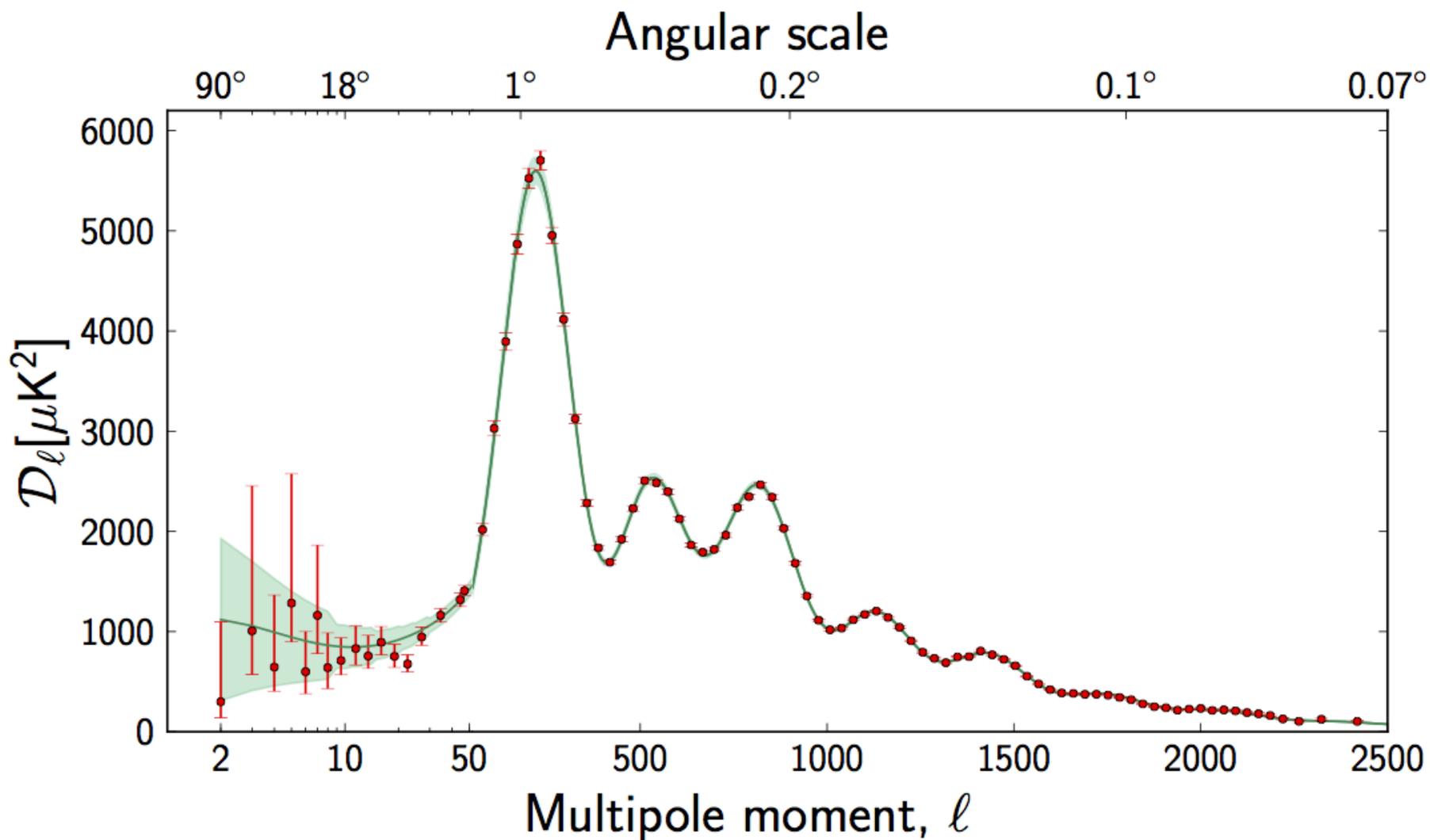
L'image se précise d'une mission à l'autre ...



Un observateur dans une galaxie lointaine ne voit PAS exactement la même image mais (en principe) il voit une image qui est très semblable à celle-ci

Pour nous, demain l'image sera (très très légèrement) différente : les photons proviendront d'une autre SDD sera située juste un peu plus loin ...

Analyse statistique de cette image :



Donne des informations uniques sur le contenu en matière noire + ordinaire de l'Univers et aussi sur sa Géométrie

La courbure de l'Univers semble nulle, ce qui est compatible avec le contenu en matière + énergie :

- Matière ordinaire 5%
- Matière Noire de nature inconnue : 25%
- Energie noire de nature inconnue : 75%

Découverte de la présence de cette Energie Noire :
grâce à l'étude des Supernovae lointaines : accélération de l'expansion
il y a environ 6 à 7 Milliards d'années

Un argument moins connu en faveur de l'accélération de l'expansion

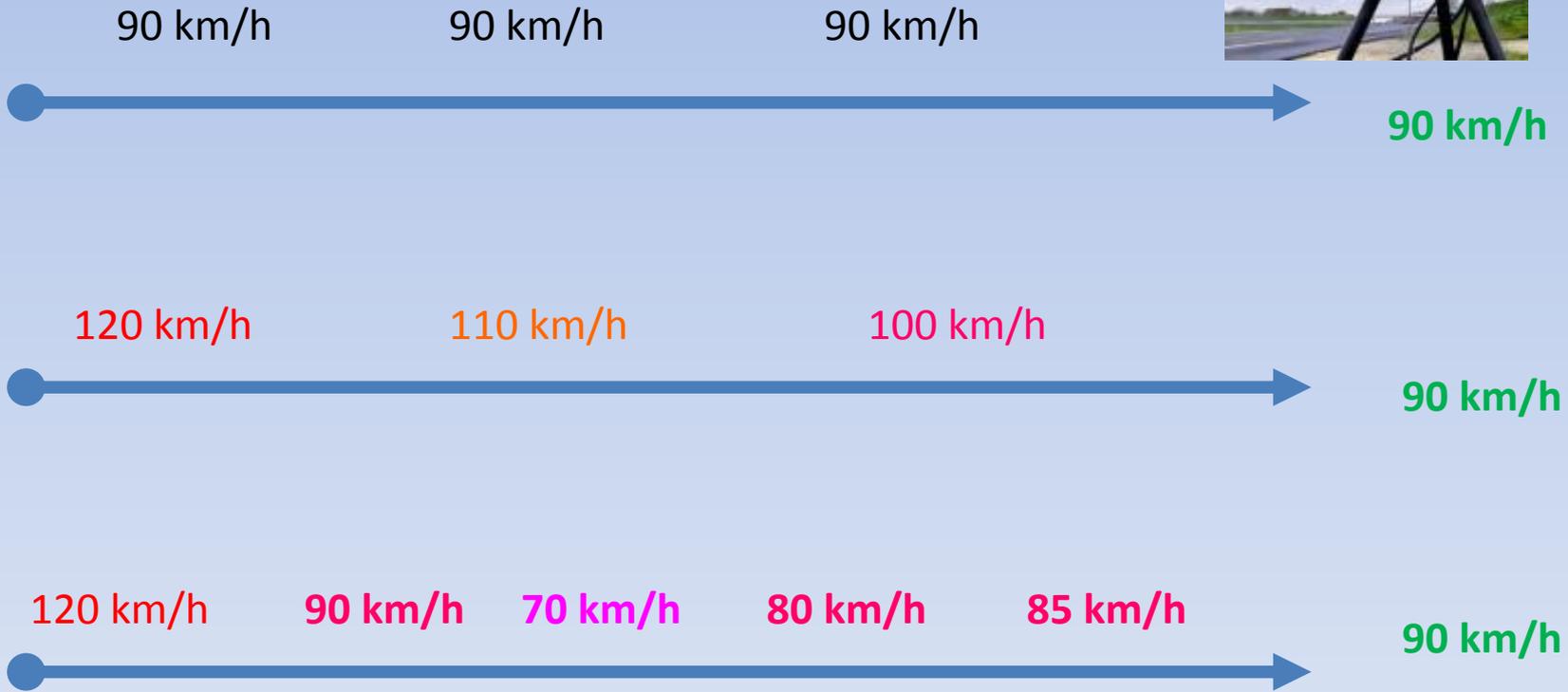


Avant cette découverte (1998), un conflit semblait apparaître entre l'âge estimé de l'Univers (environ 11-12 Milliards d'années) et l'âge des plus vieilles étoiles 14 ± 2 Milliards d'années !!

L'accélération de l'expansion nous conduit à un Univers plus âgé alors que la décélération constante correspond à un Univers plus jeune

Accélération de l'expansion et âge de l'Univers

*Brigadier Hubble
Gendarme galactique
(escadron 42)*



C'est la voiture qui a décéléré puis ensuite accéléré qui a mis le plus de temps !



Expansion à vitesse constante (situation fictive)



$T = 13,6$ Milliards d'années

H_0



Expansion ralentie



H_0

Univers de matière à 100% (Matière noire + atomes) $T = 11-12$ Milliards d'années



+



H_0

Univers avec accélération il y a 6-7 Milliards d'années $T = 13,8$ Milliards d'années
due à l'Energie Noire (70%) + Matière (30%)

L'Accélération implique l'existence d'un nouvel horizon :

La vitesse d'expansion de l'espace devenant exponentielle, la lumière issue d'une source trop lointaine ne pourra plus nous parvenir

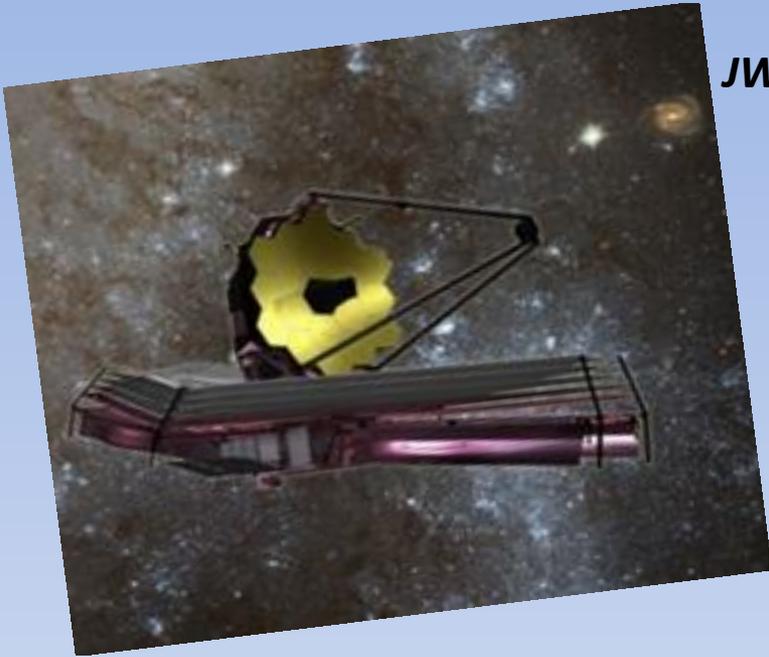
Horizon des événements situé à env. 16 Milliards d'A.L. :

Pour une Galaxie qui est aujourd'hui à plus de env. 16 Milliards d'A.L. ($z = 1,8$) nous la voyons car nous voyons la lumière qu'elle a émise dans le passé, mais la lumière qu'elle émet aujourd'hui ne nous parviendra jamais !!



Tout cela dans le modèle actuel où l'accélération est due à une constante cosmologique

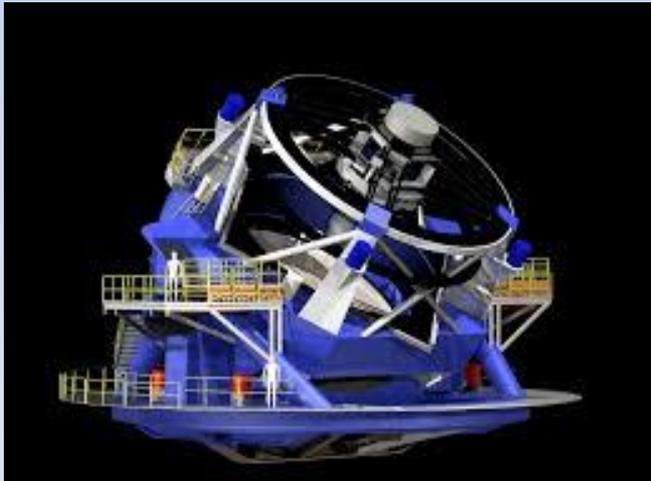
De nouveaux moyens d'observation dans un futur proche :



JWST - 2019



EUCLID - 2021



LSST - 2021



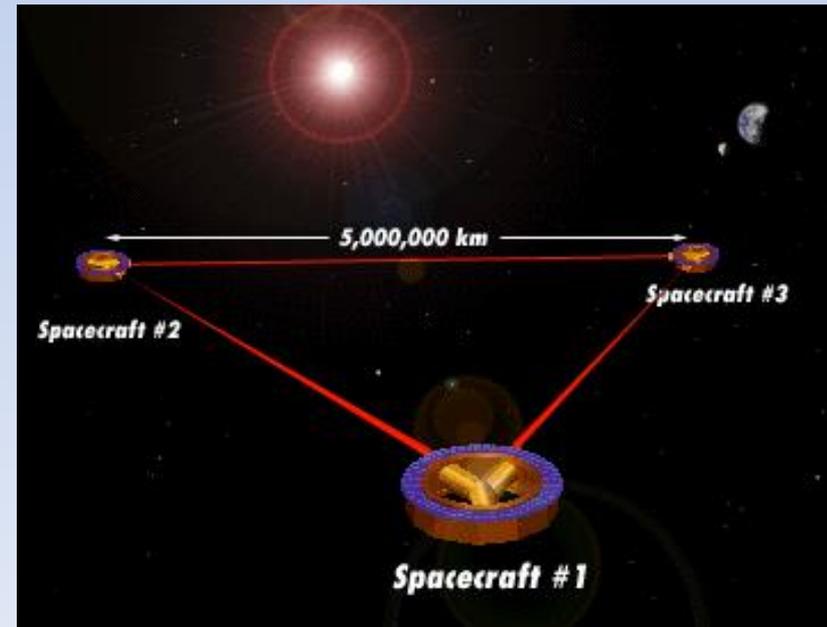
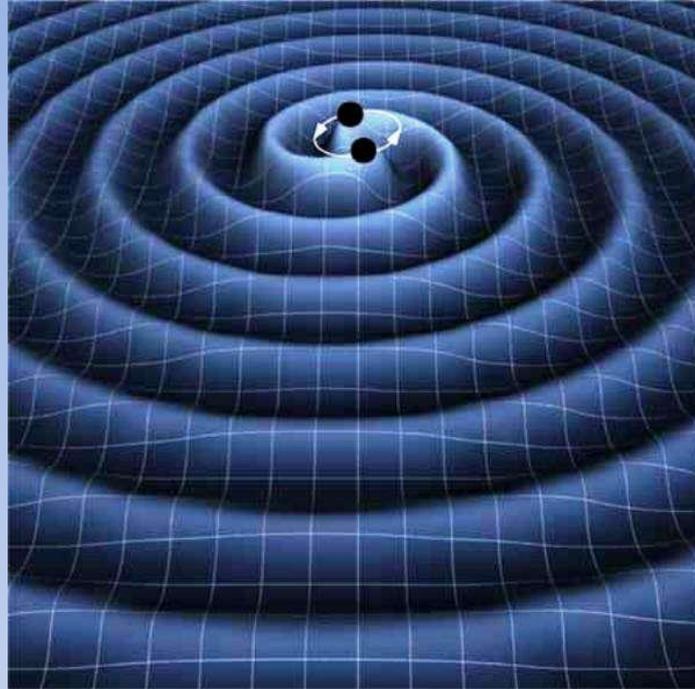
E-ELT - 2024

★ Actualités : ★

**Détection des ondes
Gravitationnelles !!**

**Une nouvelle fenêtre
Sur l'Univers !!**

...
**Demain une fenêtre
Sur l'Univers Primordial ???**

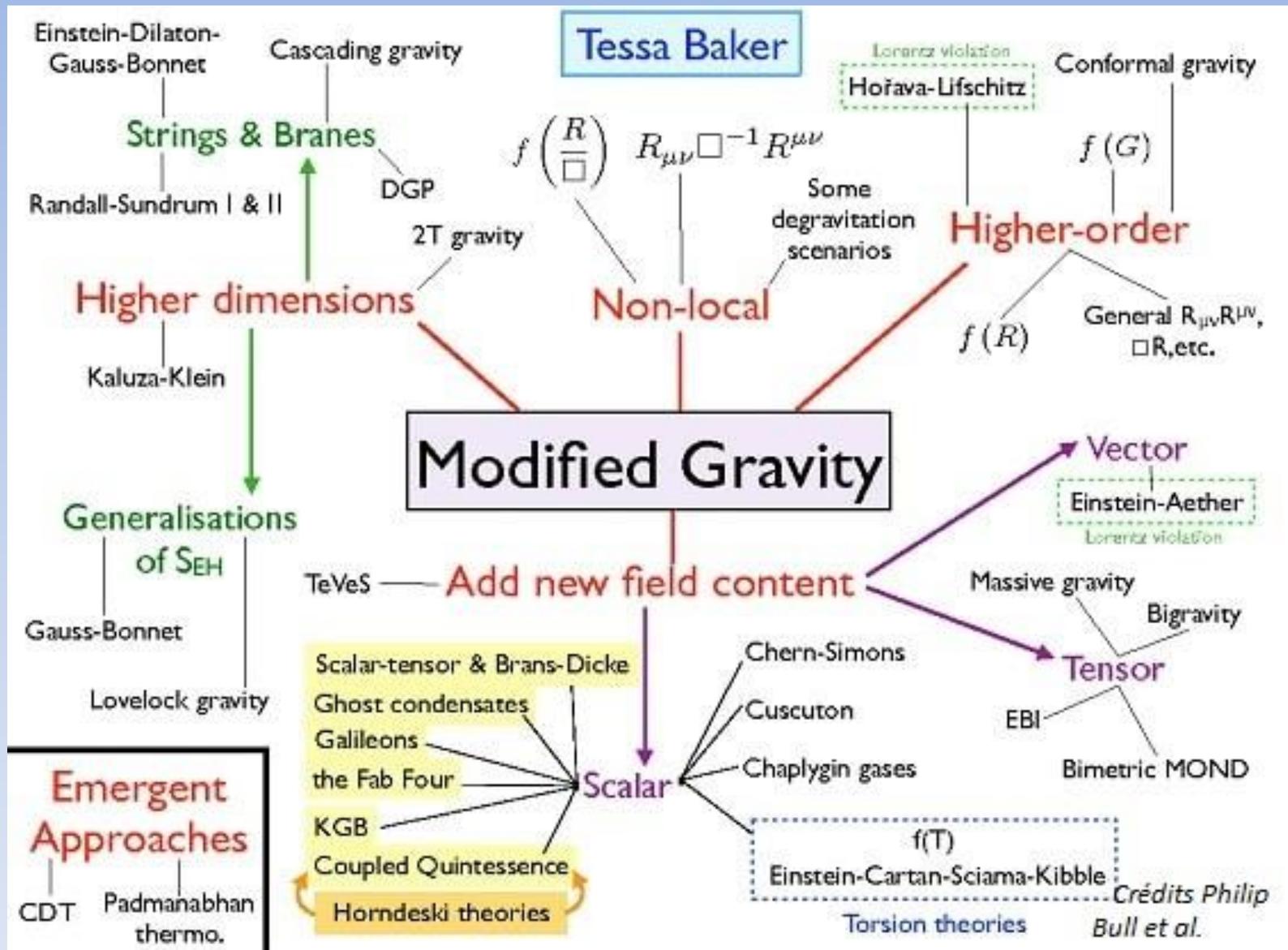


Observation Août 2017 de la

Fusion de 2 étoiles à neutron

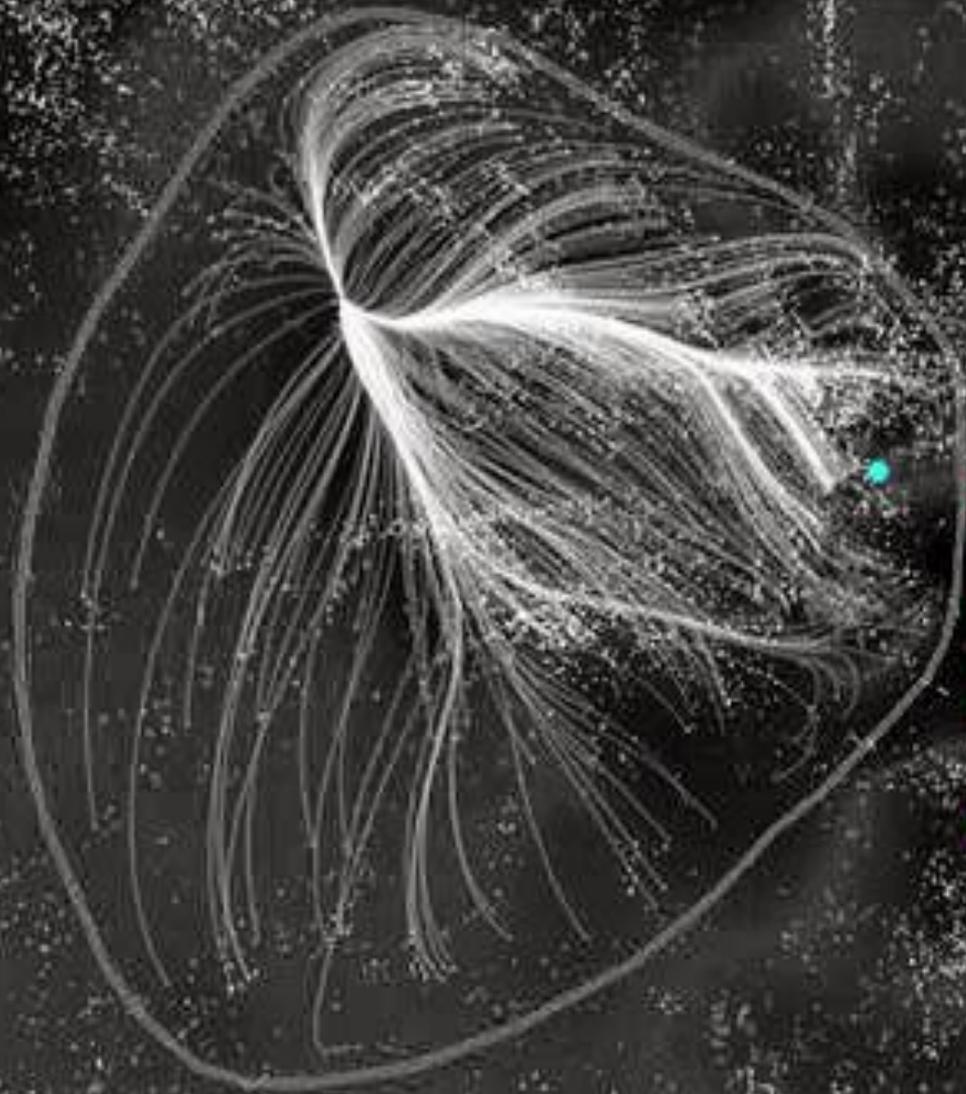


Vitesse de l'onde gravitationnelle = Vitesse de la Lumière



Certains modèles de Gravité Modifiée sont déjà invalidés !!

The huge circled structure is LANIAKEA



• The red dot represents our galaxy...one of 100,000

You are here

Vous êtes ici - Usted está aquí - Du bist hier

