



L'Hydrogène

Du Big Bang à nos jours

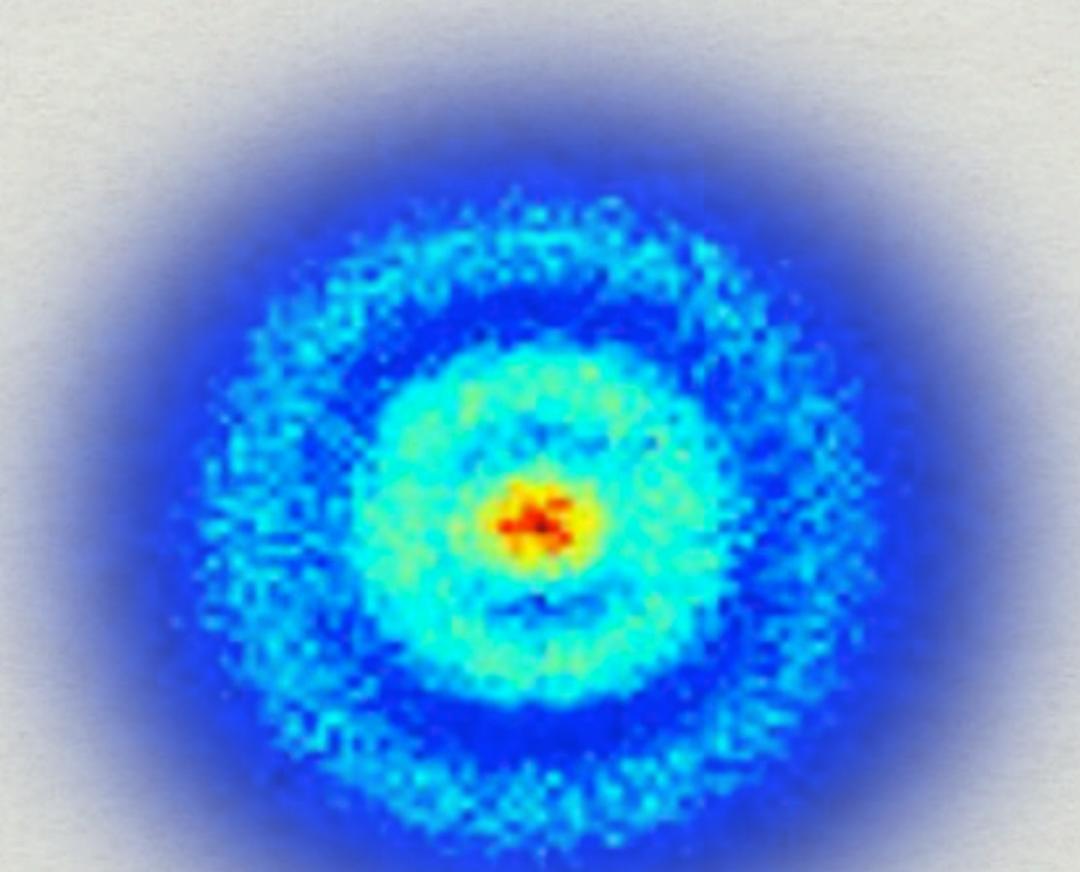
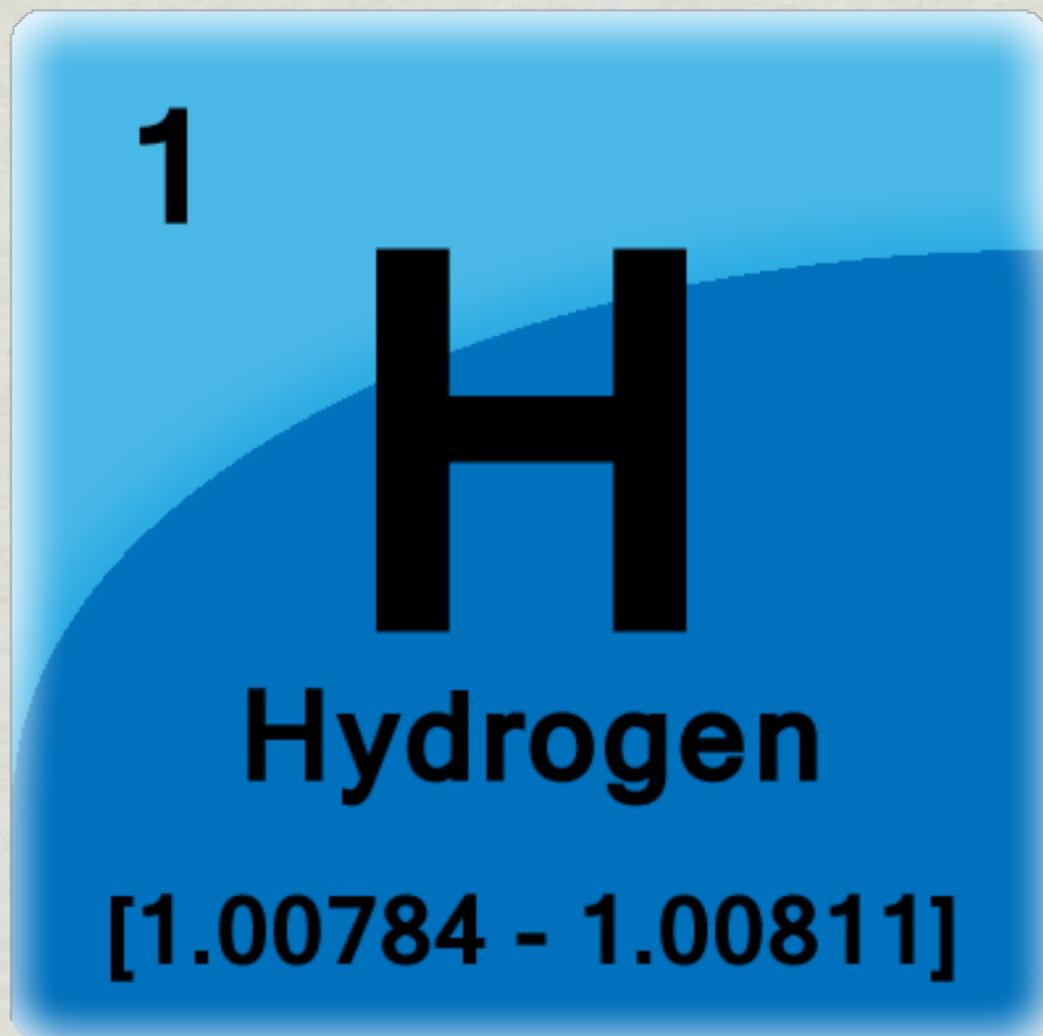
simon.nicolas@poledesetoiles.fr

Pour toutes questions n'hésitez à me contacter directement

Plan

- ➔ **La naissance de l'Hydrogène**
- ➔ **De l'Hydrogène aux atomes lourds**
- ➔ **Et en dehors des étoiles...**

Carte d'identité



rayon atomique : 25pm

composé d'un proton et éventuellement d'un électron et de 1 ou 2 neutron

Histoire

- ✱ Hydro : Eau
- ✱ gène : engendrer



terme créé par Lavoisier en 1766 pour désigner un gaz inflammable qui «engendre de l'eau»

l'Hydrogène

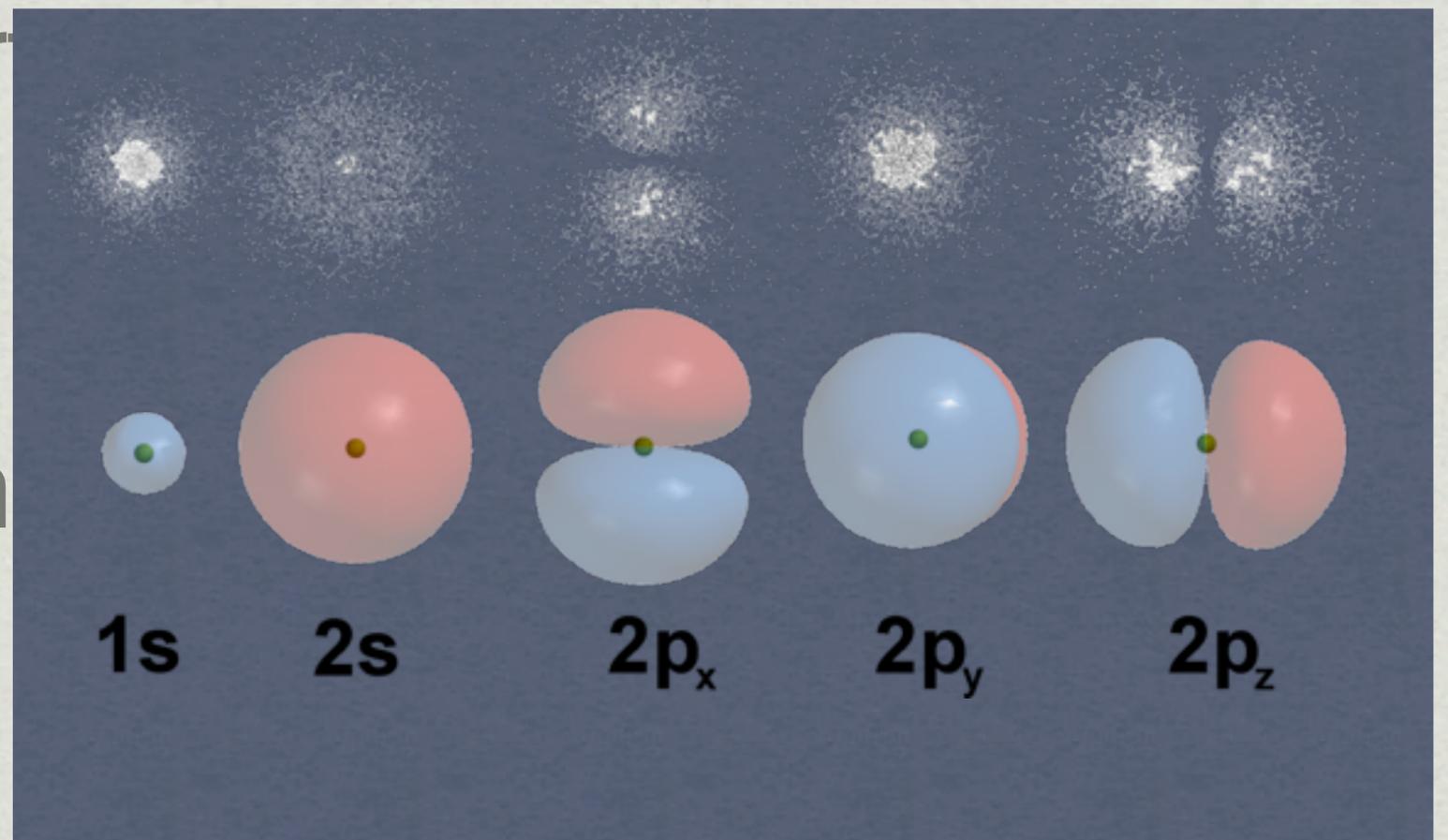
* -> 1911



* 1911 : Rutherford

* 1913 : Bohr

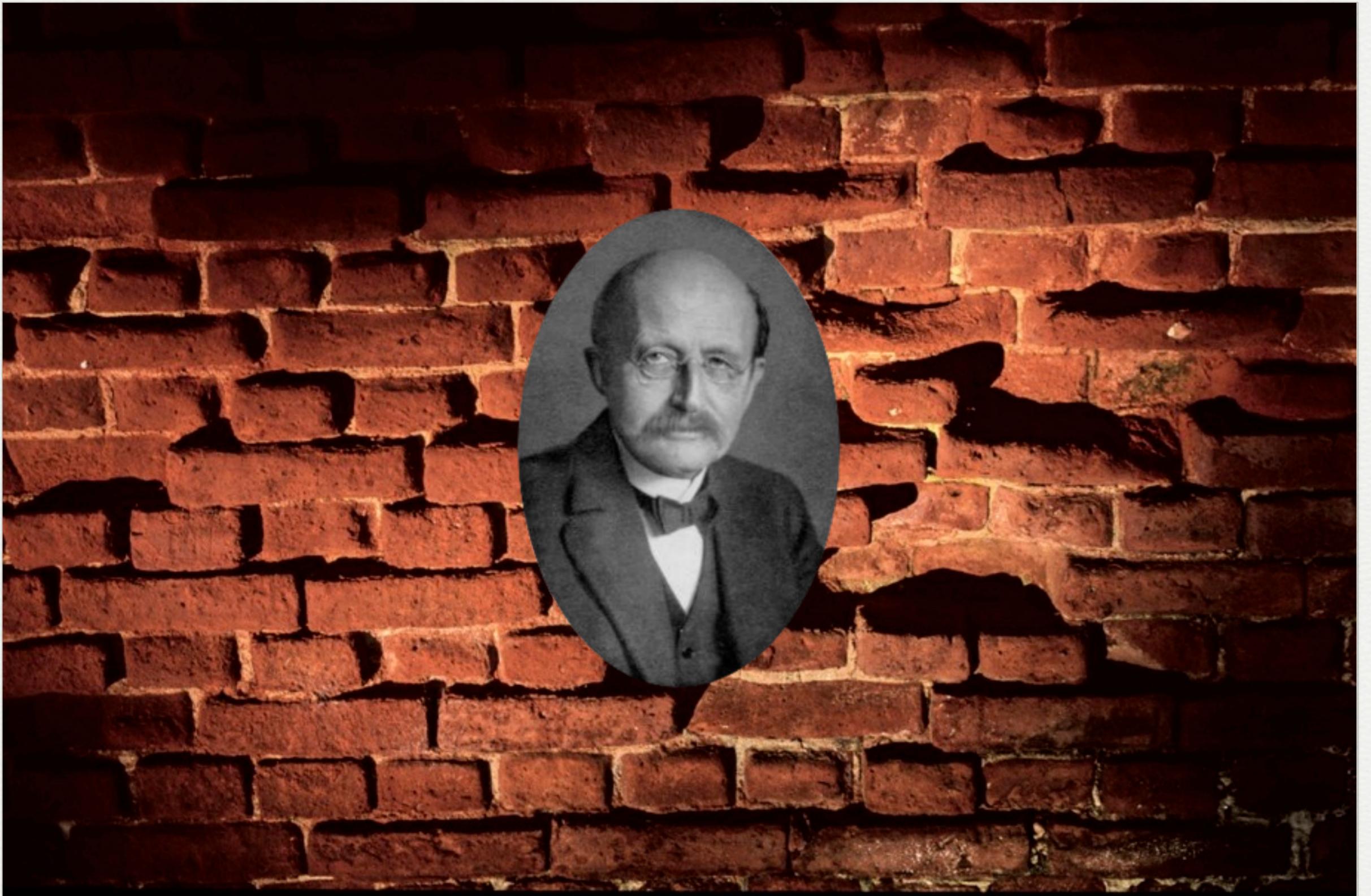
* 1930 : Mécanique



rutherford : modèle planétaire

Bohr : modèle quantifié

Dirac : unification des 2 écoles de mécanique quantique



Attention : le Big bang n'est qu'extrapolation de la seule Relativité Générale
Pas une Origine mais une Transition ! cf Etienne Klein

* $t=0$: Big Bang

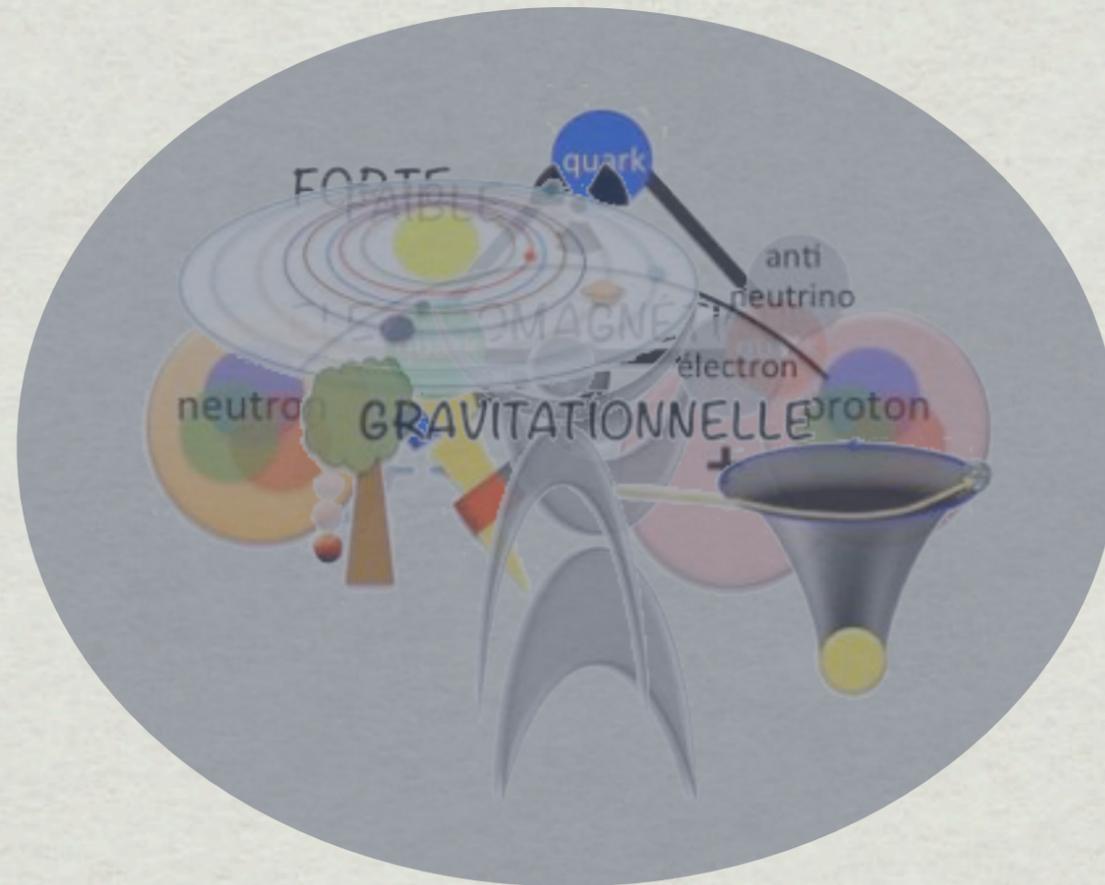
* $\rightarrow t=10^{-43}\text{s}$: ère de Planck



MUR DE PLANCK...

$$t_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}}$$

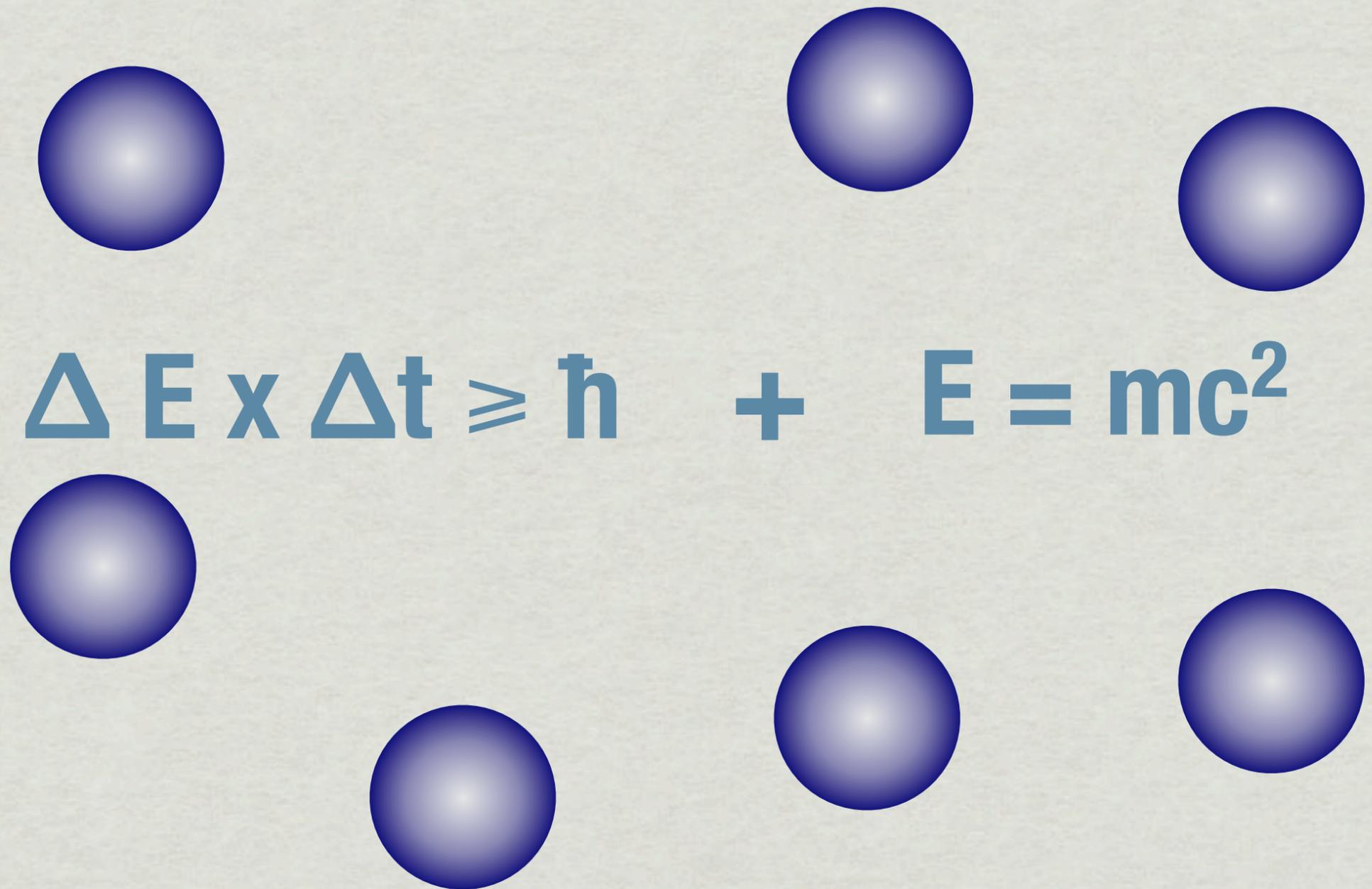
- * $t=0$: Big Bang
- * $\rightarrow t=10^{-43}\text{s}$: ère de Planck
- * $t=10^{-43}\text{s}$: Mur de Planck



Mur de planck : on ne remonte pas plus loin. plus petite unité de temporelle ayant du sens.
Avant la physique est incapable de répondre.
Pas d'explosion ? Pas de singularité ? Pas LE commencement ?

Particules virtuelles

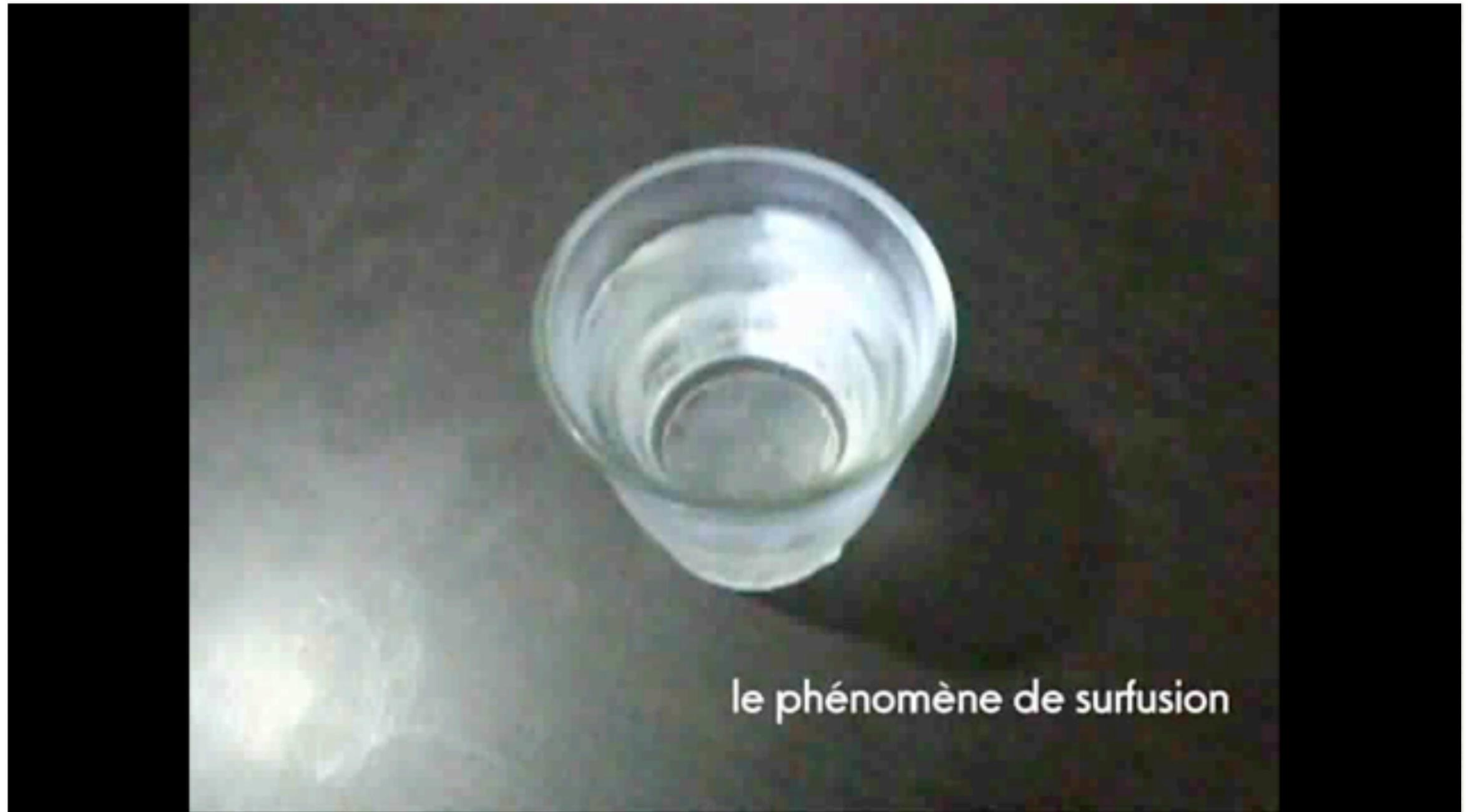
- * t=0 : Big Bang
- * $t=10^{-43}$ s : ère de Planck
- * $t=10^{-43}$ s : Mur de Planck



plus le temps est court plus l'incertitude sur l'énergie est grande, on peut donc «créer temporairement» de l'énergie (donc une particule) ex nihilo

Surfusion

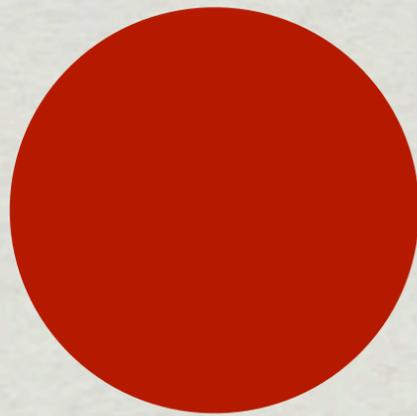
- * $t=0$: Big Bang
- * $\rightarrow t=10^{-43}\text{s}$: ère de Planck
- * $t=10^{-43}\text{s}$: Mur de Planck
- * $t=10^{-35}\text{s}$: transition de phase



dissociation Force forte et électro-faible \rightarrow assymétrie \rightarrow transition de phase MAIS
passage par surfusion impliquant ENORMEMENT d'énergie en tout point de l'univers \rightarrow inflation colossale

Inflation

- * $t=0$: Big Bang
- * $\rightarrow t=10^{-43}\text{s}$: ère de Planck
- * $t=10^{-43}\text{s}$: Mur de Planck
- * $t=10^{-35}\text{s}$: transition de phase
- * $\rightarrow t=10^{-32}\text{s}$: inflation



lors de l'inflation les particules virtuelles s'approprient l'énergie réelles pour exister de manière stable. Taille de l'univers multipliée par un facteur 10^{26}

Les Particules

- * $t=0$: Big Bang
- * $->t=10^{-43}s$: ère de Planck
- * $t=10^{-43}s$: Mur de Planck
- * $t=10^{-35}s$: transition de phase
- * $->t=10^{-32}s$: inflation

QUARKS



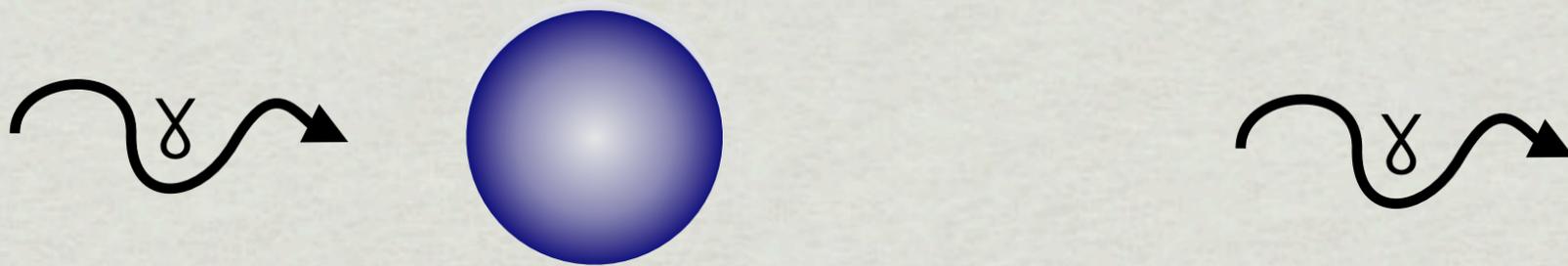
LEPTONS



Apparition de matière ET d'antimatière en proportion quasi égale
Electron : constituant de l'hydrogène

Création - Annihilation

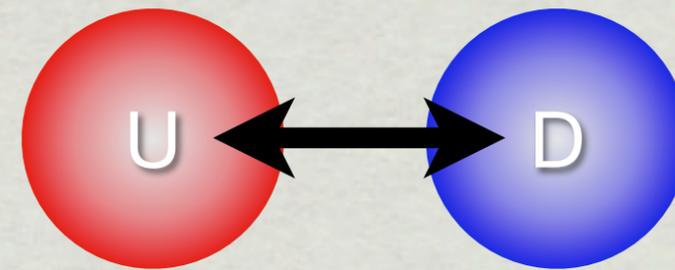
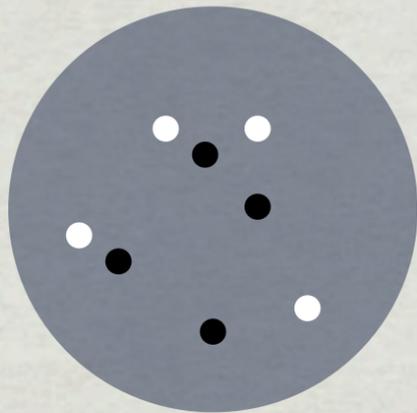
- * $t=0$: Big Bang
- * $\rightarrow t=10^{-43}\text{s}$: ère de Planck
- * $t=10^{-43}\text{s}$: Mur de Planck
- * $t=10^{-35}\text{s}$: transition de phase
- * $\rightarrow t=10^{-32}\text{s}$: inflation



Univers Opaque car Univers trop dense et trop chaud

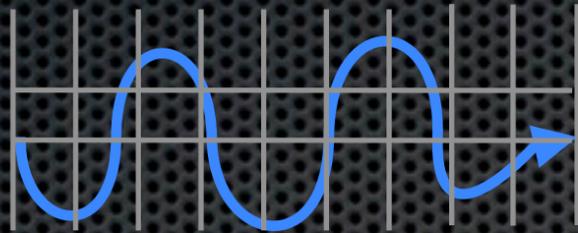
Inflation

- * $t=0$: Big Bang
- * $\rightarrow t=10^{-43}\text{s}$: ère de Planck
- * $t=10^{-43}\text{s}$: Mur de Planck
- * $t=10^{-35}\text{s}$: transition de phase
- * $\rightarrow t=10^{-32}\text{s}$: inflation
- * $\rightarrow t=10^{-12}\text{s}$: inflation douce



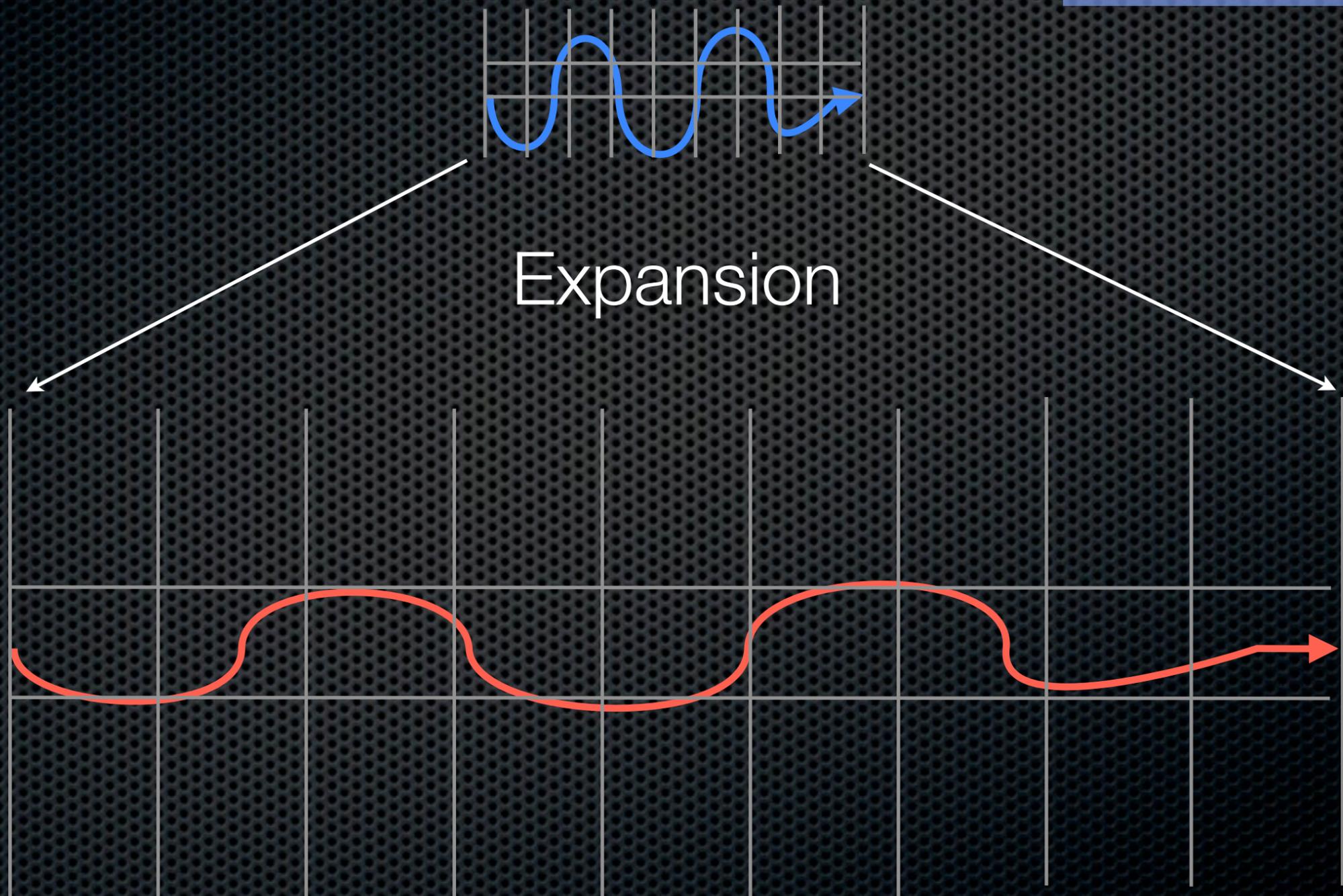
Les quarks et anti-quarks se créent et s'annihilent
Refroidissement due à l'inflation

Le Redshift



Le Redshift

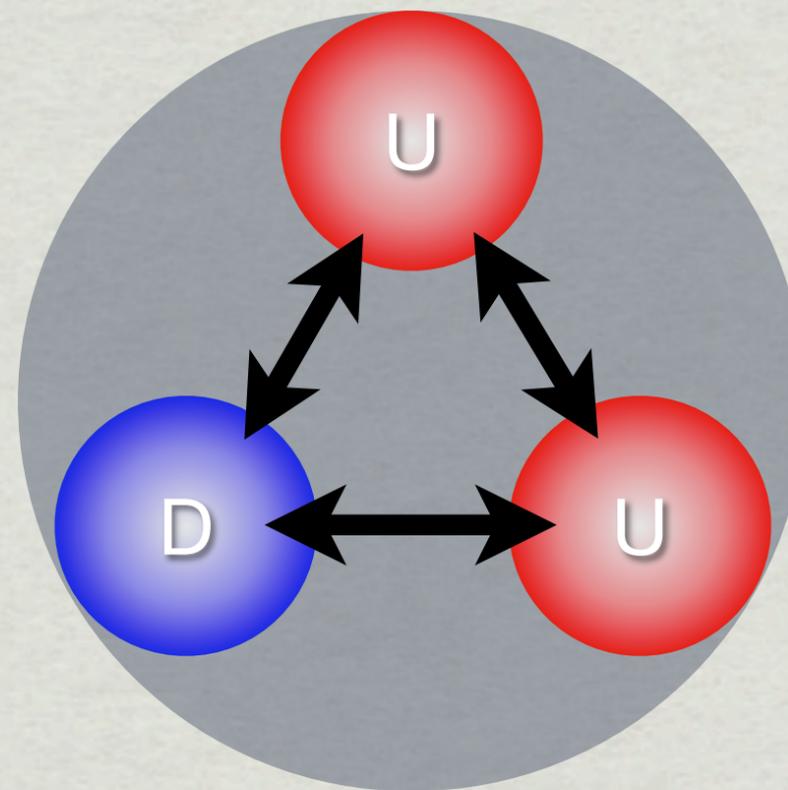
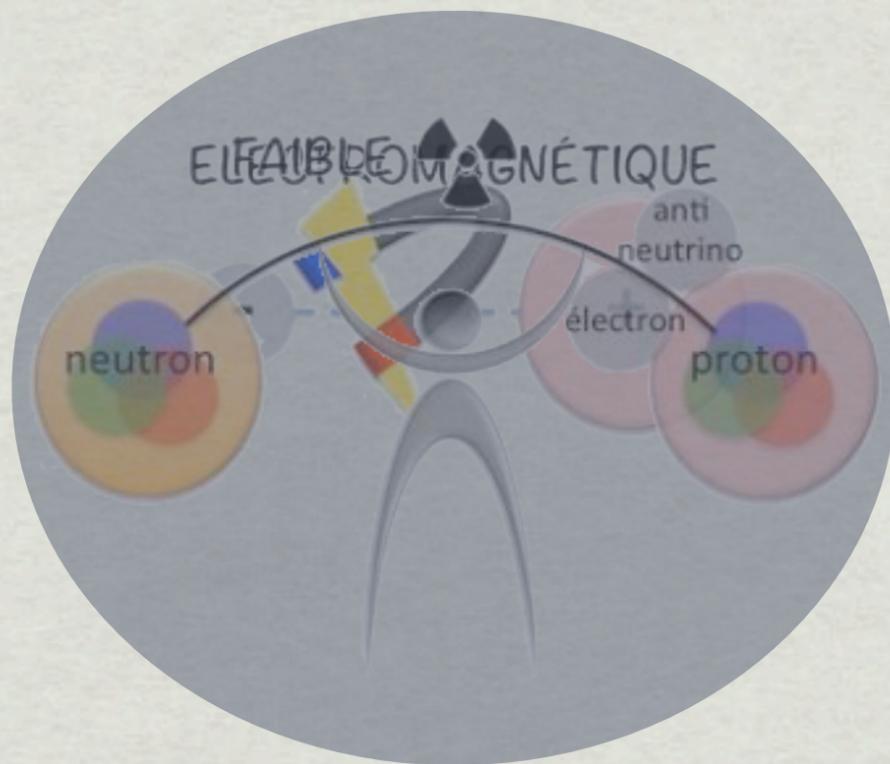
$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$$



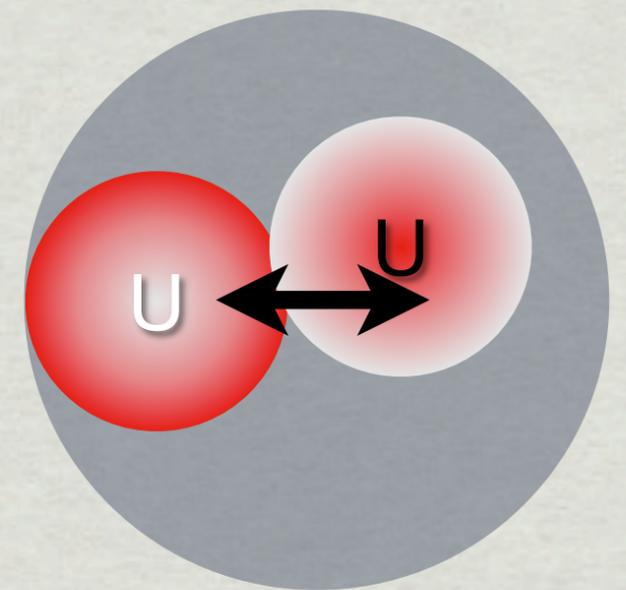
dilatation de l'espace, donc du photon, donc élongation de sa longueur d'onde, et diminution de l'amplitude

Transition de phase

- * $t=0$: Big Bang
- * $->t=10^{-43}s$: ère de Planck
- * $t=10^{-43}s$: Mur de Planck
- * $t=10^{-35}s$: transition de phase
- * $->t=10^{-32}s$: inflation
- * $->t=10^{-12}s$: inflation douce
- * $->t=10^{-4}s$: ère hadronique



BARYON

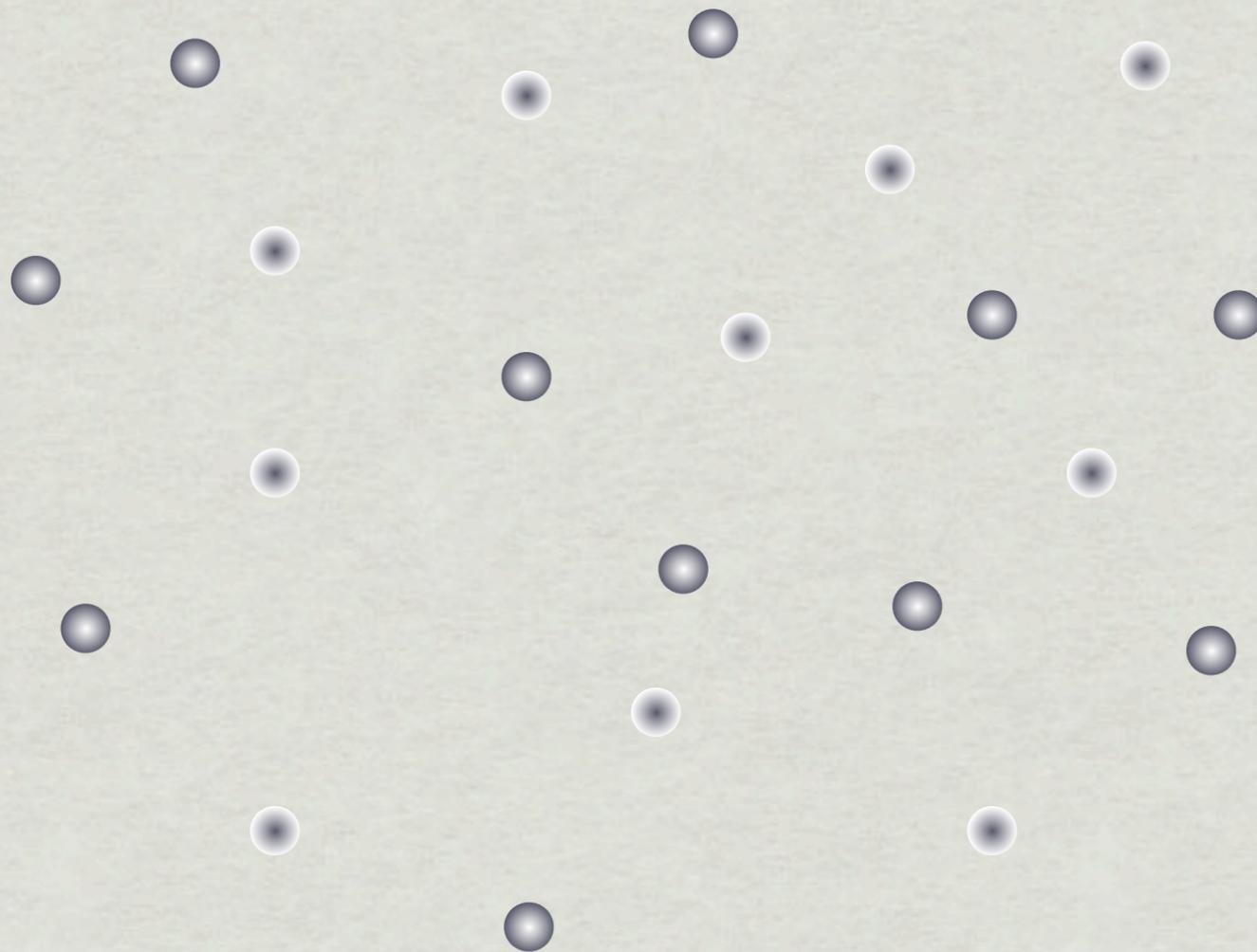


MESON

les photons deviennent trop faibles pour détruire les liaisons entre quarks,
ère hadronique, dominée par l'incessante production-désintégration de hadron-anti-hadron
transition de phase : changement de propriété fondamentale de l'environnement

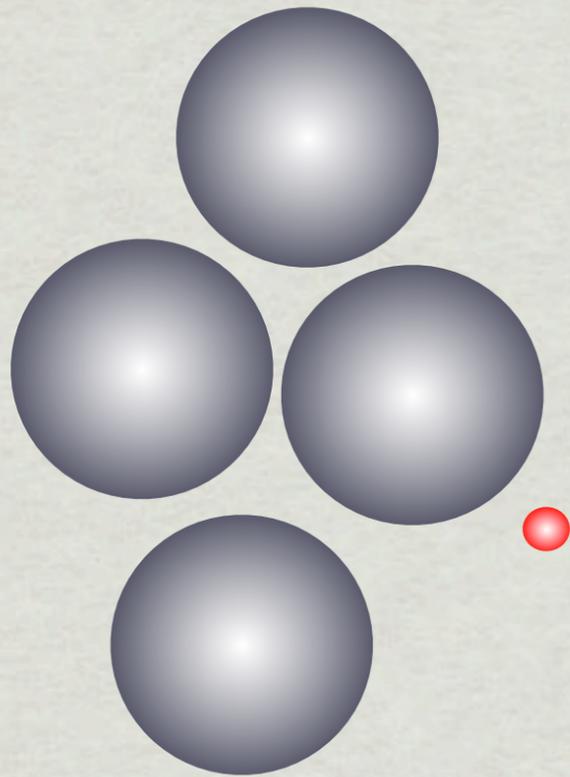
Ère hadronique

- * $t=0$: Big Bang
- * $\rightarrow t=10^{-43}\text{s}$: ère de Planck
- * $t=10^{-43}\text{s}$: Mur de Planck
- * $t=10^{-35}\text{s}$: transition de phase
- * $\rightarrow t=10^{-32}\text{s}$: inflation
- * $\rightarrow t=10^{-12}\text{s}$: inflation douce
- * $\rightarrow t=10^{-4}\text{s}$: ère hadronique



paradoxe matière-antimatière
écart de quantité de 1 pour 10^9

Ère leptonique

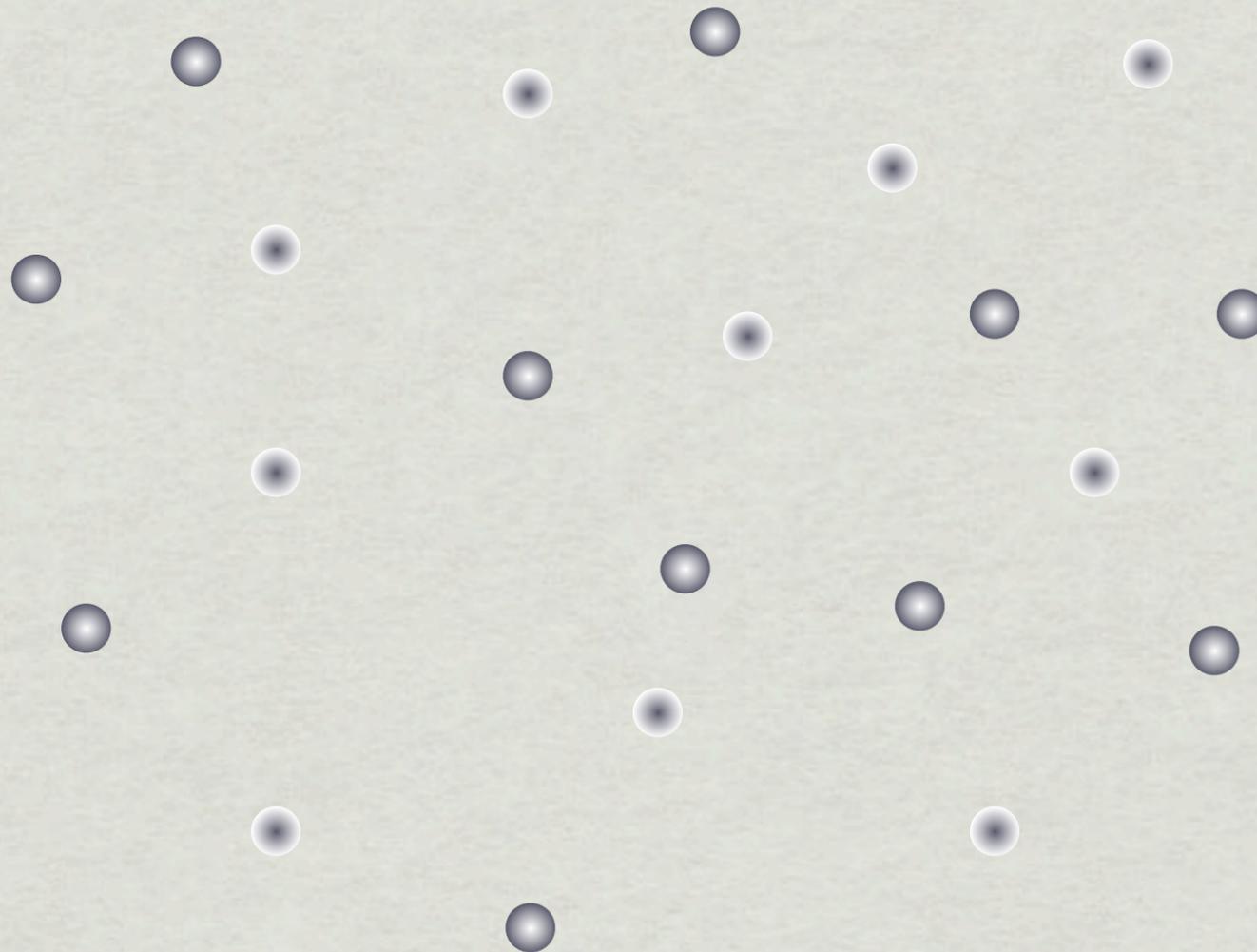


- * $t=0$: Big Bang
- * $\rightarrow t=10^{-43}\text{s}$: ère de Planck
- * $t=10^{-43}\text{s}$: Mur de Planck
- * $t=10^{-35}\text{s}$: transition de phase
- * $\rightarrow t=10^{-32}\text{s}$: inflation
- * $\rightarrow t=10^{-12}\text{s}$: inflation douce
- * $\rightarrow t=10^{-4}\text{s}$: ère hadronique
- * $\rightarrow t=1\text{s}$: ère leptonique

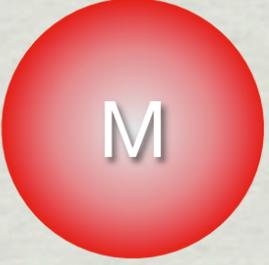
«dilution de la matière», distance trop grande pour la force faible
découplage des neutrinos : à l'heure actuelle : une plaque de 1Ly de plomb arrêterait $\sim 1/2$
neutrino

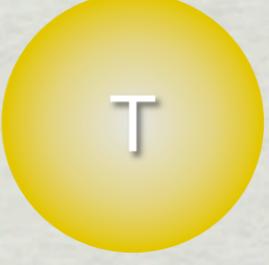
Ère leptonique

- * $t=0$: Big Bang
- * $->t=10^{-43}s$: ère de Planck
- * $t=10^{-43}s$: Mur de Planck
- * $t=10^{-35}s$: transition de phase
- * $->t=10^{-32}s$: inflation
- * $->t=10^{-12}s$: inflation douce
- * $->t=10^{-4}s$: ère hadronique
- * $->t=1s$: ère leptonique



ELECTRON 

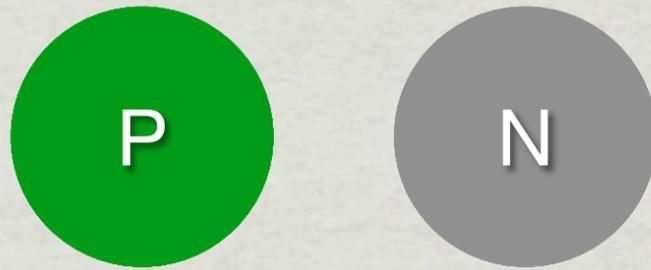
MUON 

TAUON 

NEUTRINO 

Fin définitive de l'antimatière «primordiale»

Nucléosynthèse primordiale



- * $t=0$: Big Bang
- * $\rightarrow t=10^{-43}\text{s}$: ère de Planck
- * $t=10^{-43}\text{s}$: Mur de Planck
- * $t=10^{-35}\text{s}$: transition de phase
- * $\rightarrow t=10^{-32}\text{s}$: inflation
- * $\rightarrow t=10^{-12}\text{s}$: inflation douce
- * $\rightarrow t=10^{-4}\text{s}$: ère hadronique
- * $\rightarrow t=1\text{s}$: ère leptonique
- * $t=100\text{s}$: ère du rayonnement
- * $t=3-20\text{min}$: Nucléosynthèse

HYDROGÈNE

DEUTÉRIUM

HÉLIUM-3

HÉLIUM-4

Neutron durée de vie 1/4h, force faible régule avant, maintenant chute du nb neutron

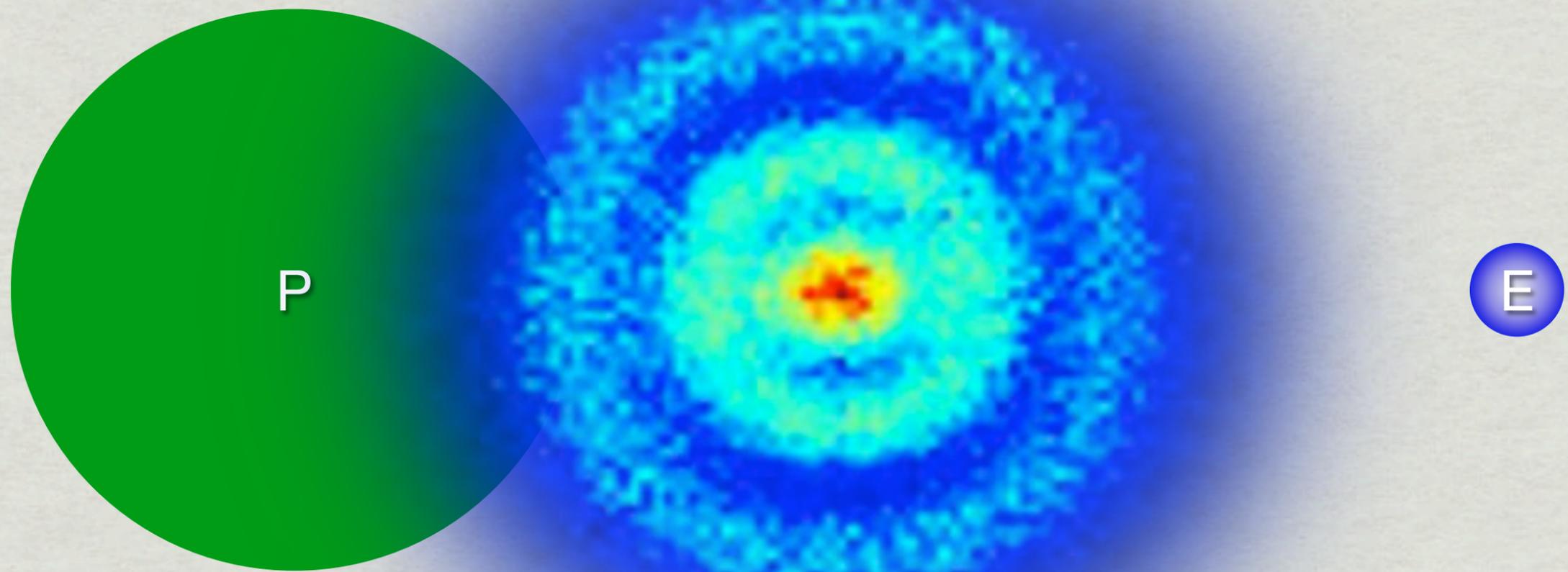
Univers : $T^\circ = 10^9\text{K}$ vers $t=100\text{s}$

Les noyaux plus lourds sont instables

75% Hydrogène et 25% Hélium (en masse), lié à l'abondance de neutron.

Conforté par des observations d'abondance dans les premières galaxies.

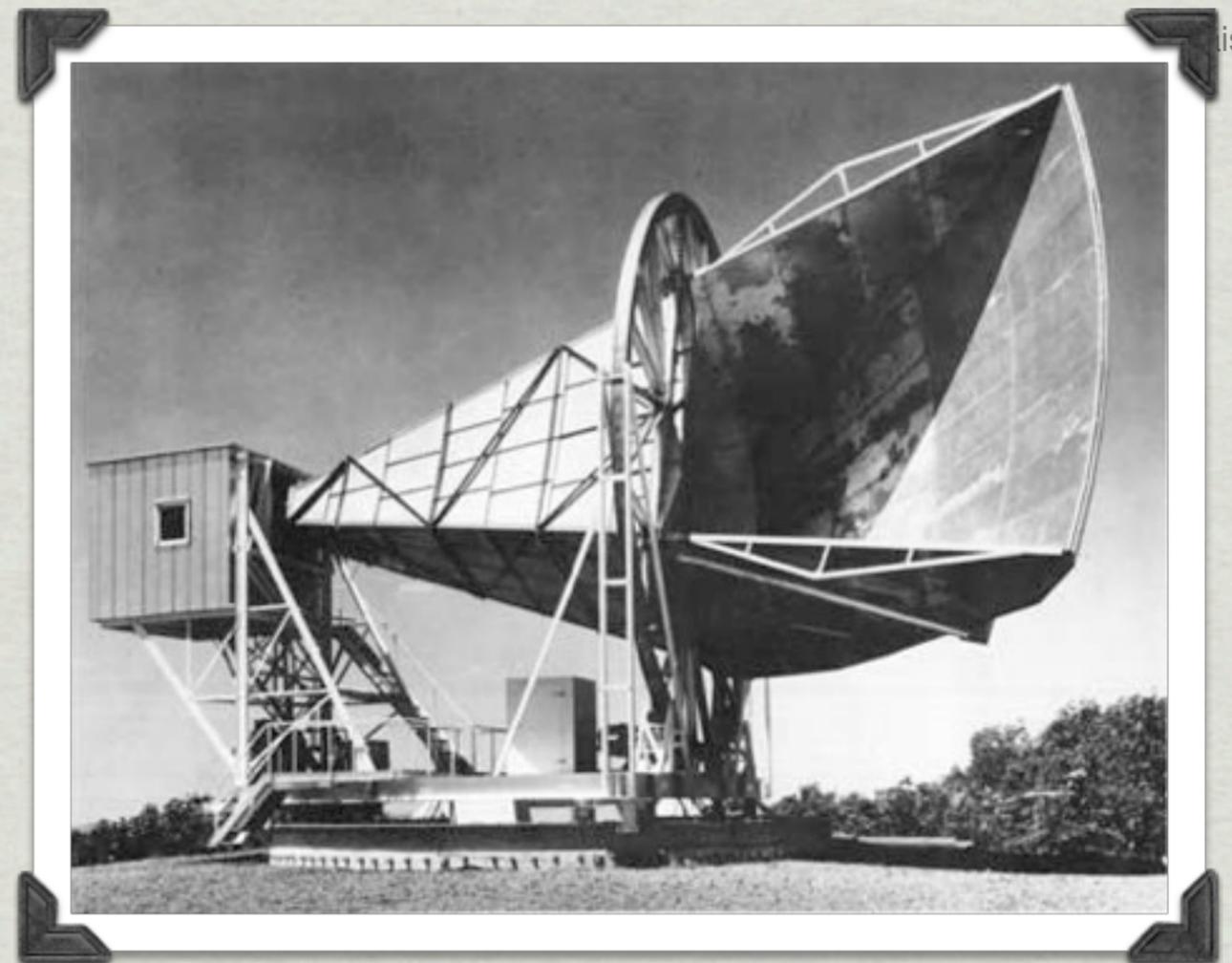
Naissance



Découverte

- * Penzias & Wilson
- * Peebles
- * Dicke, Roll & Wilkinson
- * 1965

- * $t=0$: Big Bang
- * $\rightarrow t=10^{-43}\text{s}$: ère de Planck
- * $t=10^{-43}\text{s}$: Mur de Planck
- * $t=10^{-35}\text{s}$: transition de phase
- * $\rightarrow t=10^{-32}\text{s}$: inflation
- * $\rightarrow t=10^{-12}\text{s}$: inflation douce
- * $\rightarrow t=10^{-4}\text{s}$: ère hadronique
- * $\rightarrow t=1\text{s}$: ère leptonique
- * $t=100\text{s}$: ère du rayonnement
- * $t=3-20\text{min}$: Nucléosynthèse

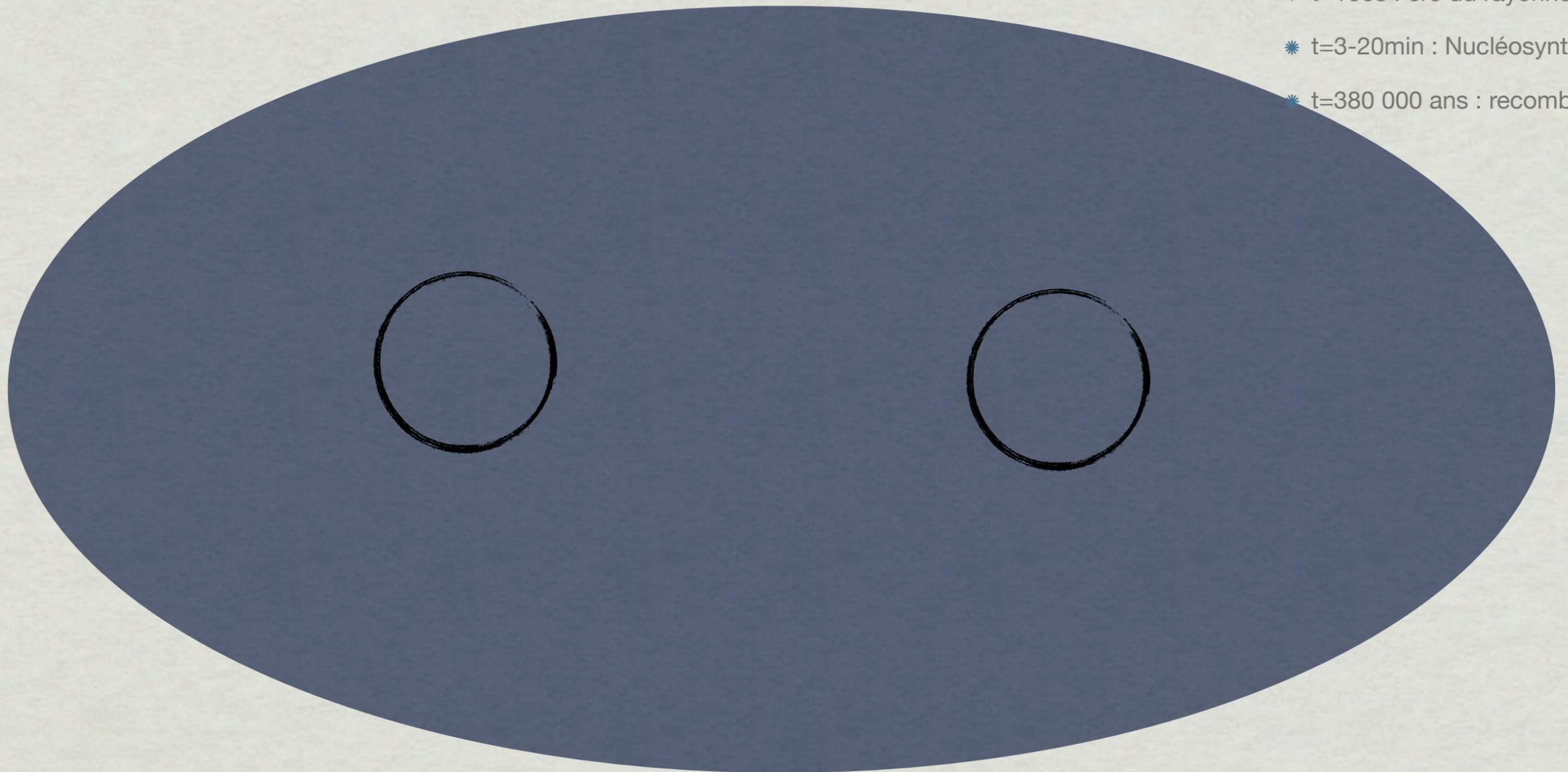


CRÉDIT : BELL LABS

du fond diffus cosmologique ou Cosmic Microwave Background (CMB)

le CMB

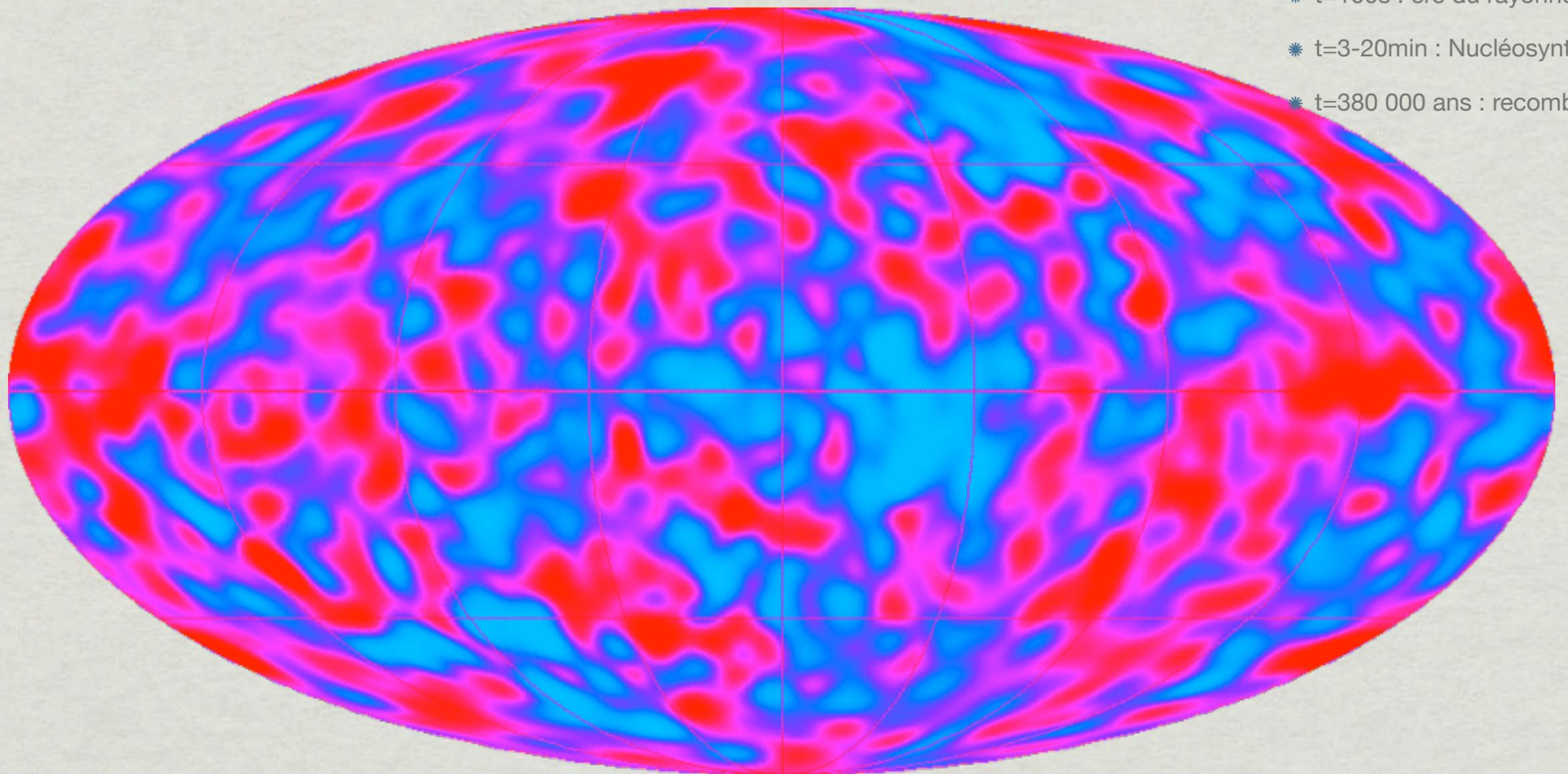
- * $t=0$: Big Bang
- * $\rightarrow t=10^{-43}\text{s}$: ère de Planck
- * $t=10^{-43}\text{s}$: Mur de Planck
- * $t=10^{-35}\text{s}$: transition de phase
- * $\rightarrow t=10^{-32}\text{s}$: inflation
- * $\rightarrow t=10^{-12}\text{s}$: inflation douce
- * $\rightarrow t=10^{-4}\text{s}$: ère hadronique
- * $\rightarrow t=1\text{s}$: ère leptonique
- * $t=100\text{s}$: ère du rayonnement
- * $t=3-20\text{min}$: Nucléosynthèse
- * $t=380\,000\text{ans}$: recombinaison



corps noir quasi parfait à 2.725K
redshift 1000, température divisée par 1000, taille multipliée par 1000
fluctuation $\sim 1/100\,000$

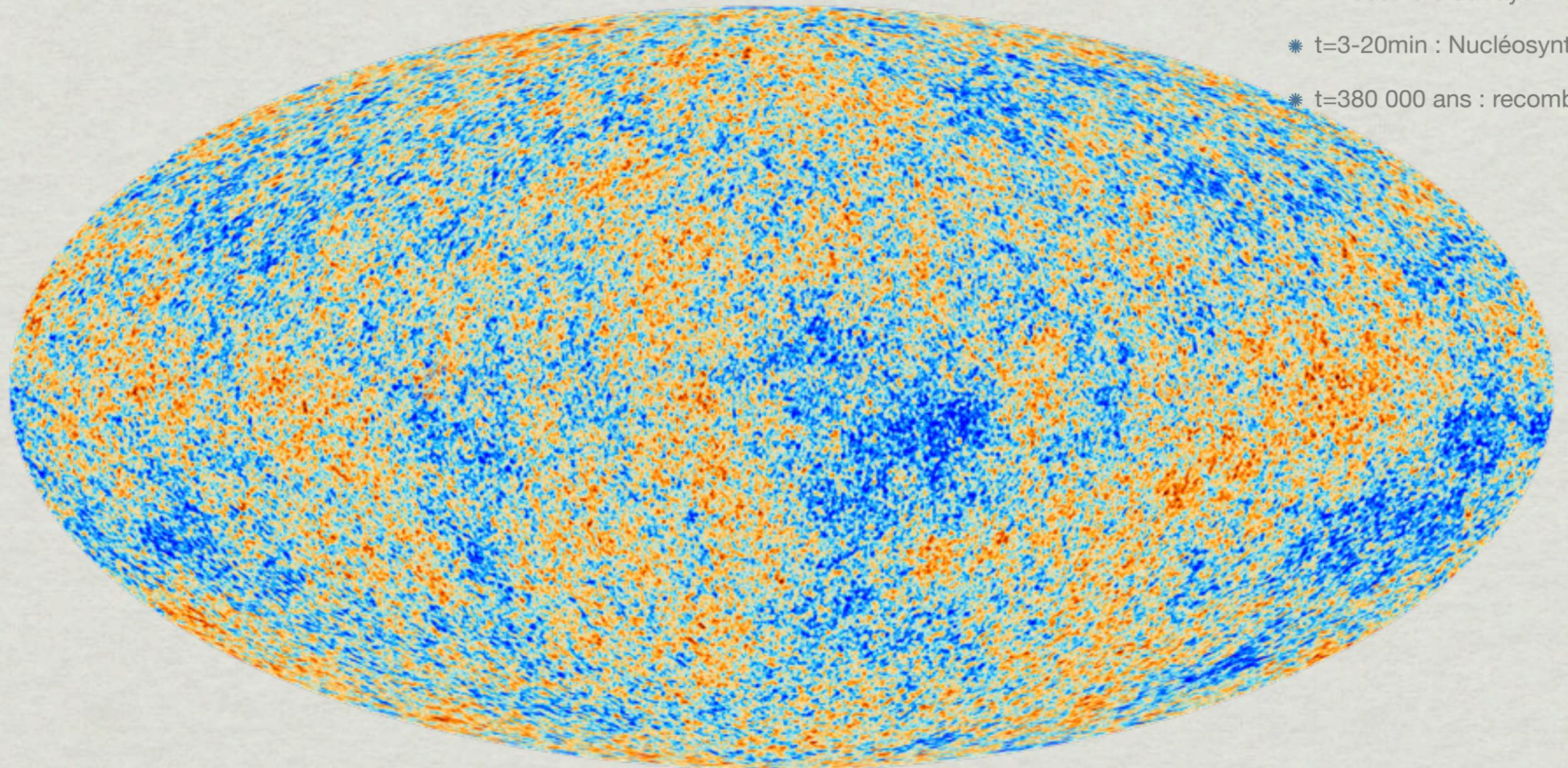
le CMB vue par COBE

- * $t=0$: Big Bang
- * $\rightarrow t=10^{-43}\text{s}$: ère de Planck
- * $t=10^{-43}\text{s}$: Mur de Planck
- * $t=10^{-35}\text{s}$: transition de phase
- * $\rightarrow t=10^{-32}\text{s}$: inflation
- * $\rightarrow t=10^{-12}\text{s}$: inflation douce
- * $\rightarrow t=10^{-4}\text{s}$: ère hadronique
- * $\rightarrow t=1\text{s}$: ère leptonique
- * $t=100\text{s}$: ère du rayonnement
- * $t=3-20\text{min}$: Nucléosynthèse
- * $t=380\,000\text{ans}$: recombinaison



le CMB vue par Planck

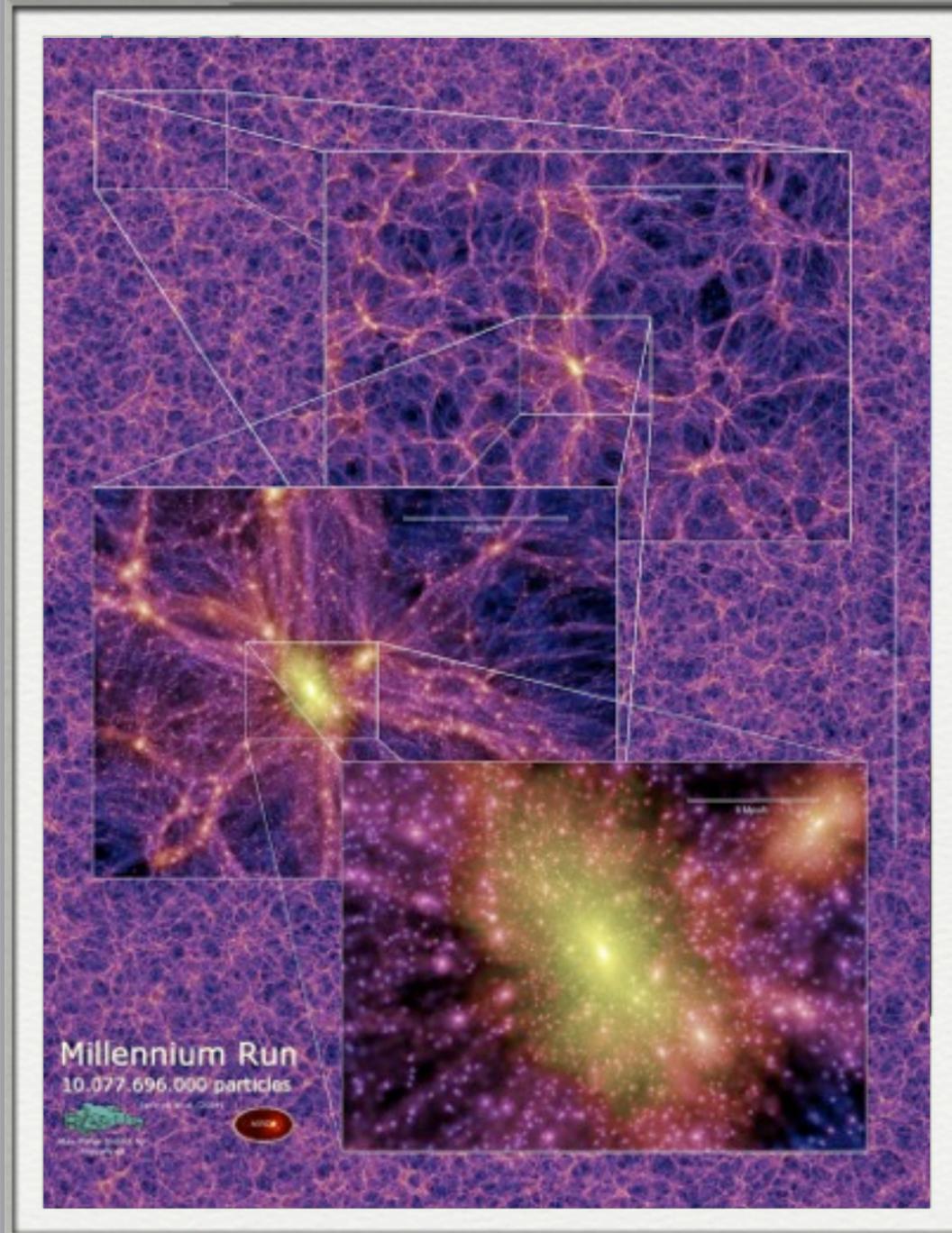
- * $t=0$: Big Bang
- * $\rightarrow t=10^{-43}\text{s}$: ère de Planck
- * $t=10^{-43}\text{s}$: Mur de Planck
- * $t=10^{-35}\text{s}$: transition de phase
- * $\rightarrow t=10^{-32}\text{s}$: inflation
- * $\rightarrow t=10^{-12}\text{s}$: inflation douce
- * $\rightarrow t=10^{-4}\text{s}$: ère hadronique
- * $\rightarrow t=1\text{s}$: ère leptonique
- * $t=100\text{s}$: ère du rayonnement
- * $t=3-20\text{min}$: Nucléosynthèse
- * $t=380\,000\text{ans}$: recombinaison



les inhomogénéités expliquent les galaxies, vibration acoustique, vidéo des harmoniques soniques ?

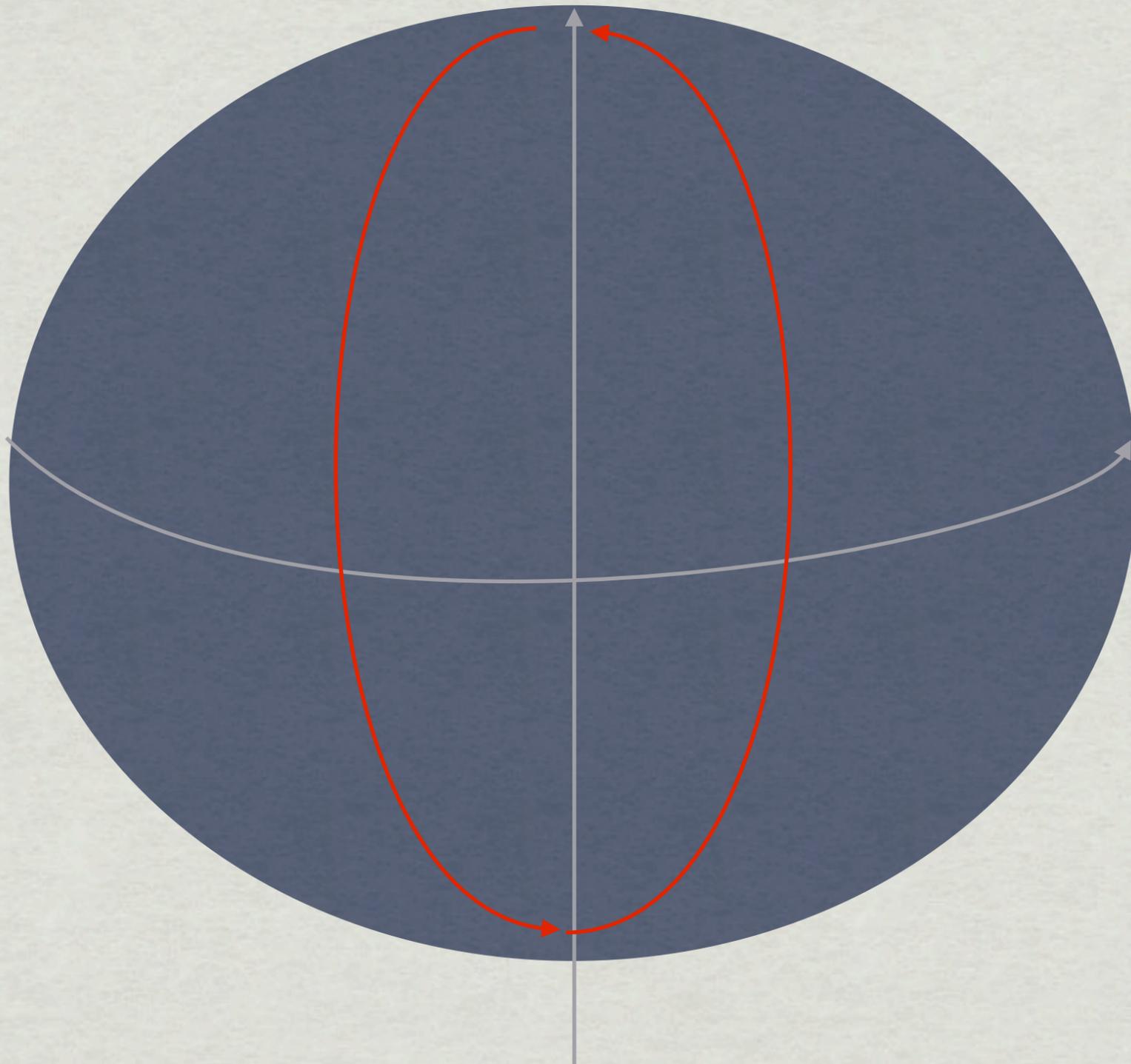
Age sombre

- * $t=0$: Big Bang
- * $\rightarrow t=10^{-43}\text{s}$: ère de Planck
- * $t=10^{-43}\text{s}$: Mur de Planck
- * $t=10^{-35}\text{s}$: transition de phase
- * $\rightarrow t=10^{-32}\text{s}$: inflation
- * $\rightarrow t=10^{-12}\text{s}$: inflation douce
- * $\rightarrow t=10^{-4}\text{s}$: ère hadronique
- * $\rightarrow t=3\text{s}$: ère leptonique
- * $\rightarrow t=3\text{s}$: fin du rayonnement
- * $\rightarrow t=3\text{s}$: nucléosynthèse
- * $\rightarrow t=380\text{000 ans}$: recombinaison



assez difficile de dire ce qu'il se passe vu que la matière est froide et non ionisée, pas de lumière émise

Les 1ères galaxies

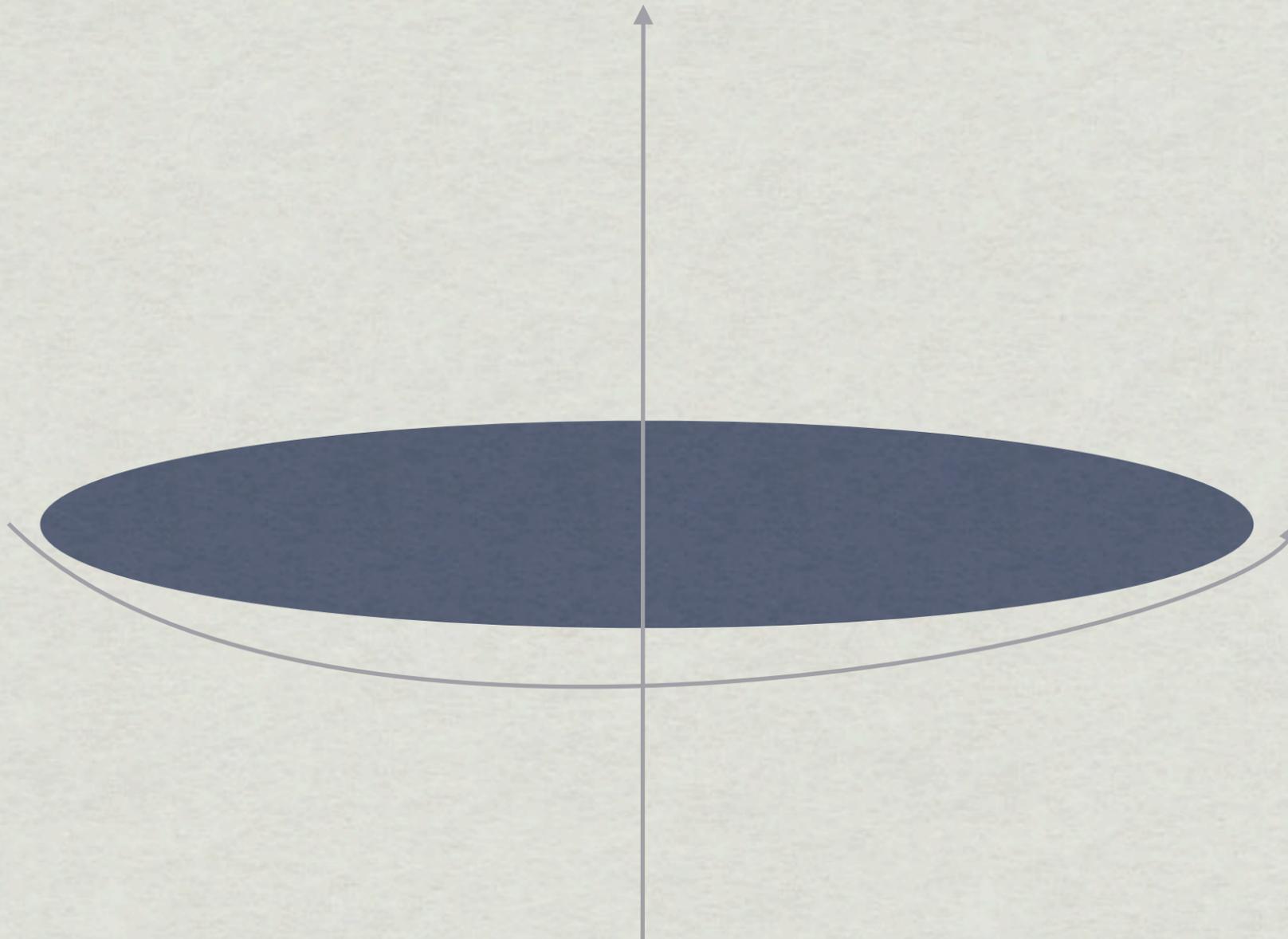


- * $t=0$: Big Bang
- * $\rightarrow t=10^{-43}\text{s}$: ère de Planck
- * $t=10^{-43}\text{s}$: Mur de Planck
- * $t=10^{-35}\text{s}$: transition de phase
- * $\rightarrow t=10^{-32}\text{s}$: inflation
- * $\rightarrow t=10^{-12}\text{s}$: inflation douce
- * $\rightarrow t=10^{-4}\text{s}$: ère hadronique
- * $\rightarrow t=1\text{s}$: ère leptonique
- * $t=100\text{s}$: ère du rayonnement
- * $t=3-20\text{min}$: Nucléosynthèse
- * $t=380\,000\text{ ans}$: recombinaison
- * $\rightarrow 1\text{G an}$: Age sombre

Définition : Objet qui forme des étoiles
essentiellement composée d'hydrogène

Les 1ères galaxies

- * $t=0$: Big Bang
- * $\rightarrow t=10^{-43}\text{s}$: ère de Planck
- * $t=10^{-43}\text{s}$: Mur de Planck
- * $t=10^{-35}\text{s}$: transition de phase
- * $\rightarrow t=10^{-32}\text{s}$: inflation
- * $\rightarrow t=10^{-12}\text{s}$: inflation douce
- * $\rightarrow t=10^{-4}\text{s}$: ère hadronique
- * $\rightarrow t=1\text{s}$: ère leptonique
- * $t=100\text{s}$: ère du rayonnement
- * $t=3-20\text{min}$: Nucléosynthèse
- * $t=380\,000\text{ans}$: recombinaison
- * $\rightarrow 1\text{G an}$: Age sombre



Grand nuage d'**hydrogène**, formant des étoiles.
10M_{so} / an contre 1M_{sol} / an pour Voie-lactée ou Andromède

La Réionisation



- * $t=0$: Big Bang
- * $\rightarrow t=10^{-43}\text{s}$: ère de Planck
- * $t=10^{-43}\text{s}$: Mur de Planck
- * $t=10^{-35}\text{s}$: transition de phase
- * $\rightarrow t=10^{-32}\text{s}$: inflation
- * $\rightarrow t=10^{-12}\text{s}$: inflation douce
- * $\rightarrow t=10^{-4}\text{s}$: ère hadronique
- * $\rightarrow t=1\text{s}$: ère leptonique
- * $t=100\text{s}$: ère du rayonnement
- * $t=3-20\text{min}$: Nucléosynthèse
- * $t=380\,000\text{ ans}$: recombinaison
- * $\rightarrow 1\text{G an}$: Age sombre

CRÉDIT : OLIVIER ESSLINGER

Les premières étoiles s'allument et émettent une première lumière qui va réioniser tout l'hydrogène atomique et former des éléments plus lourds.
Transition sur 2ème parties : Naissance, vie et mort des étoiles.