



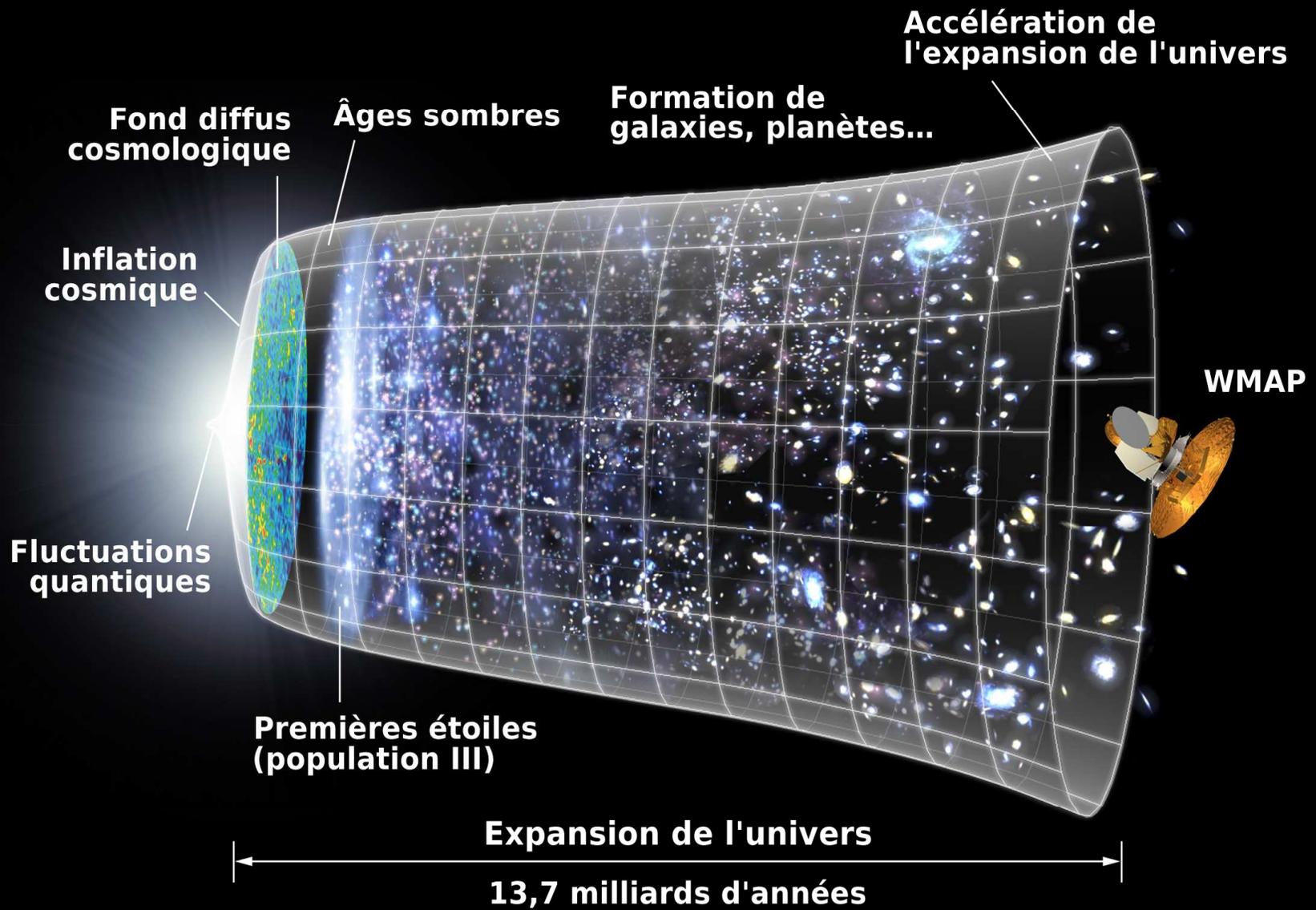
La fin des Ages Sombres

Un survol de l'état des lieux

Mathieu Langer

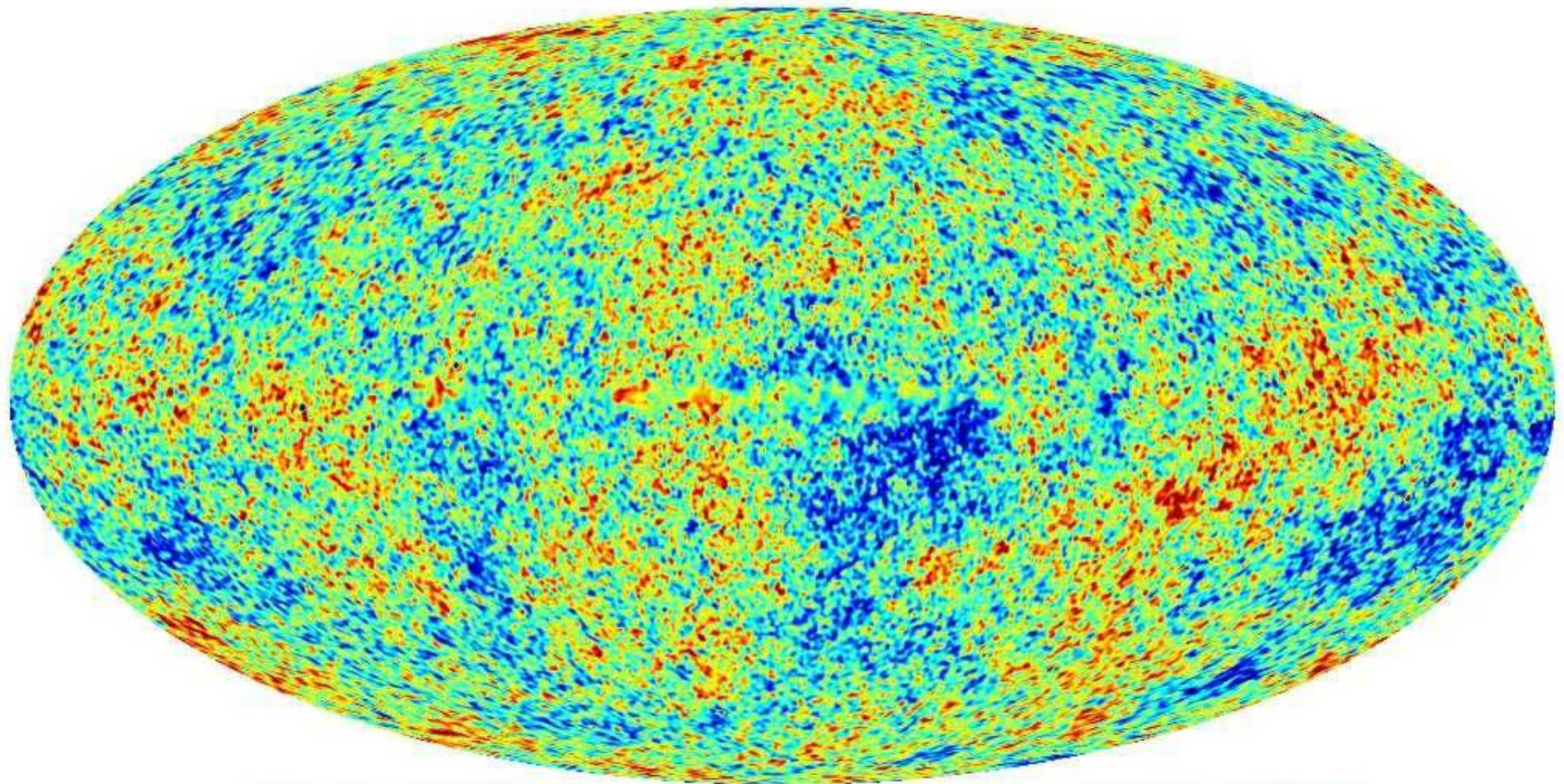
Institut d'Astrophysique Spatiale

Présentation cosmo-SAF – 17 mars 2007



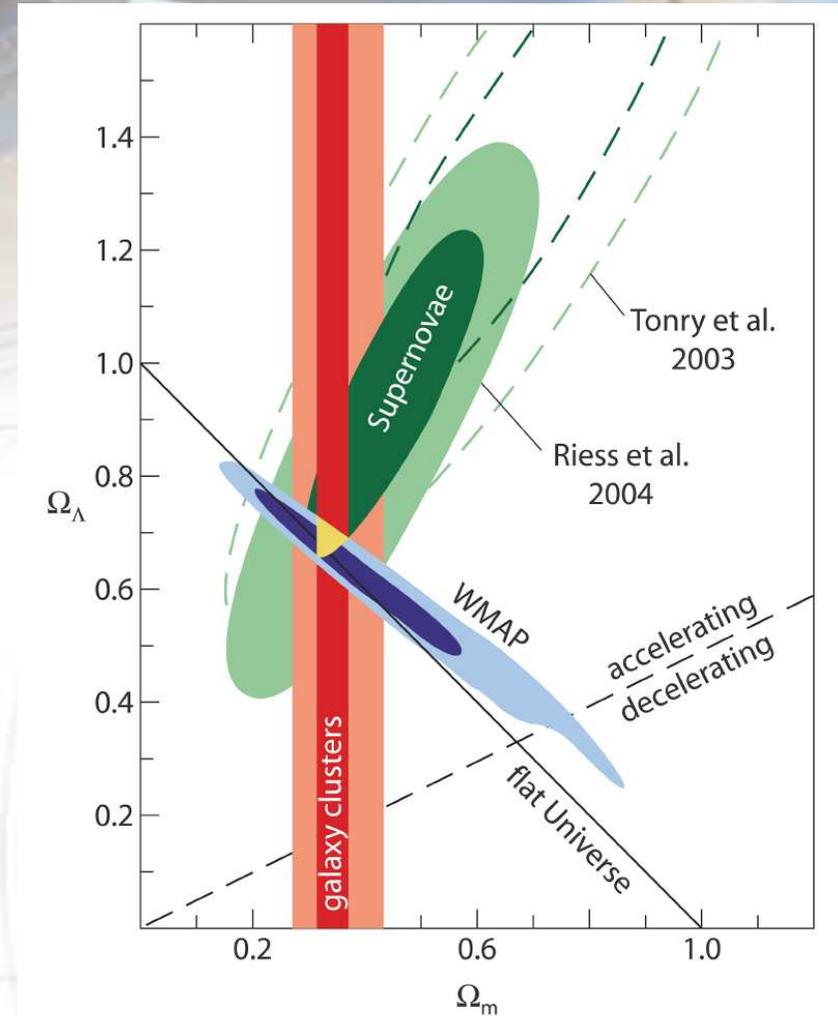
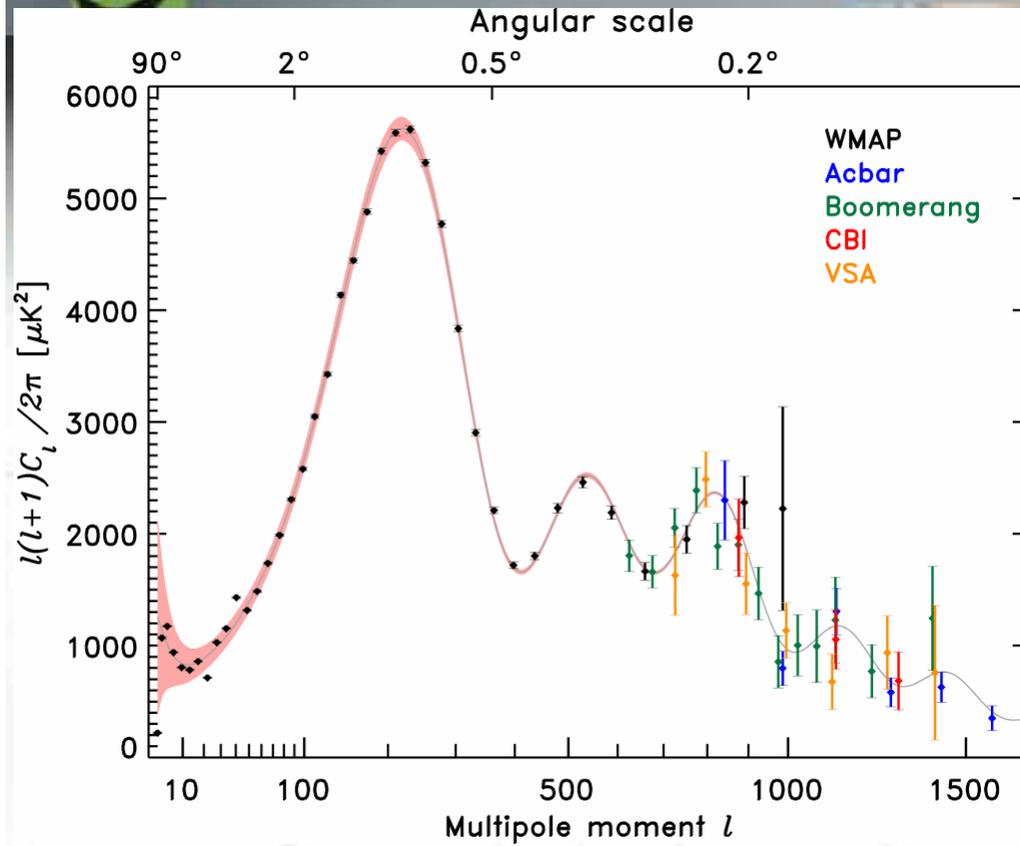


Anisotropies du fond diffus cosmologique : germes des galaxies



-200 μ K  200 μ K

WMAP +3ans



CMB + grands relevés
→ paramètres cosmologiques

Matière : $\Omega_m \sim 0.3$

Baryons : $\Omega_b \sim 0.04$

Constante : $\Omega_\Lambda \sim 0.7$

Constraining the Cosmological Parametres





Formation hiérarchique : arbre de fusion des halos

Lacey & Cole, 1993

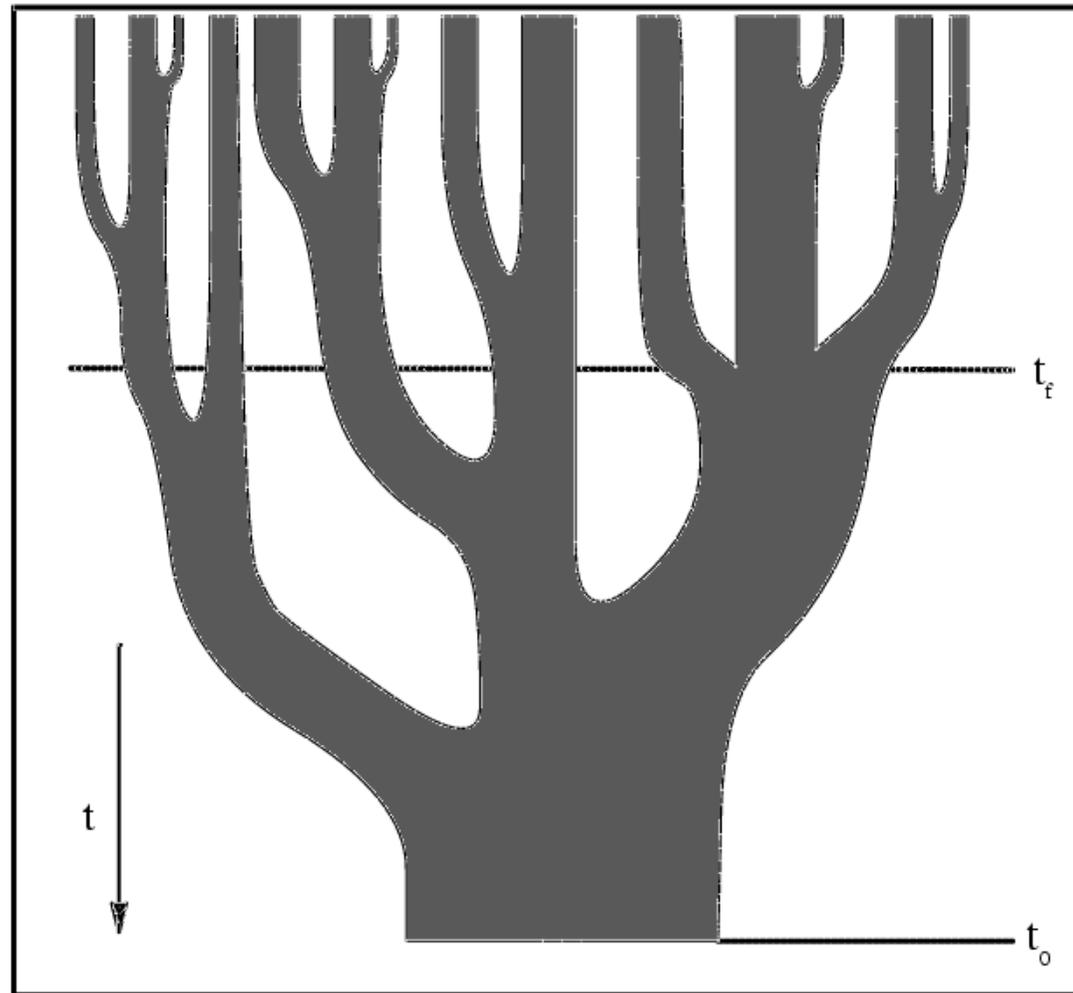
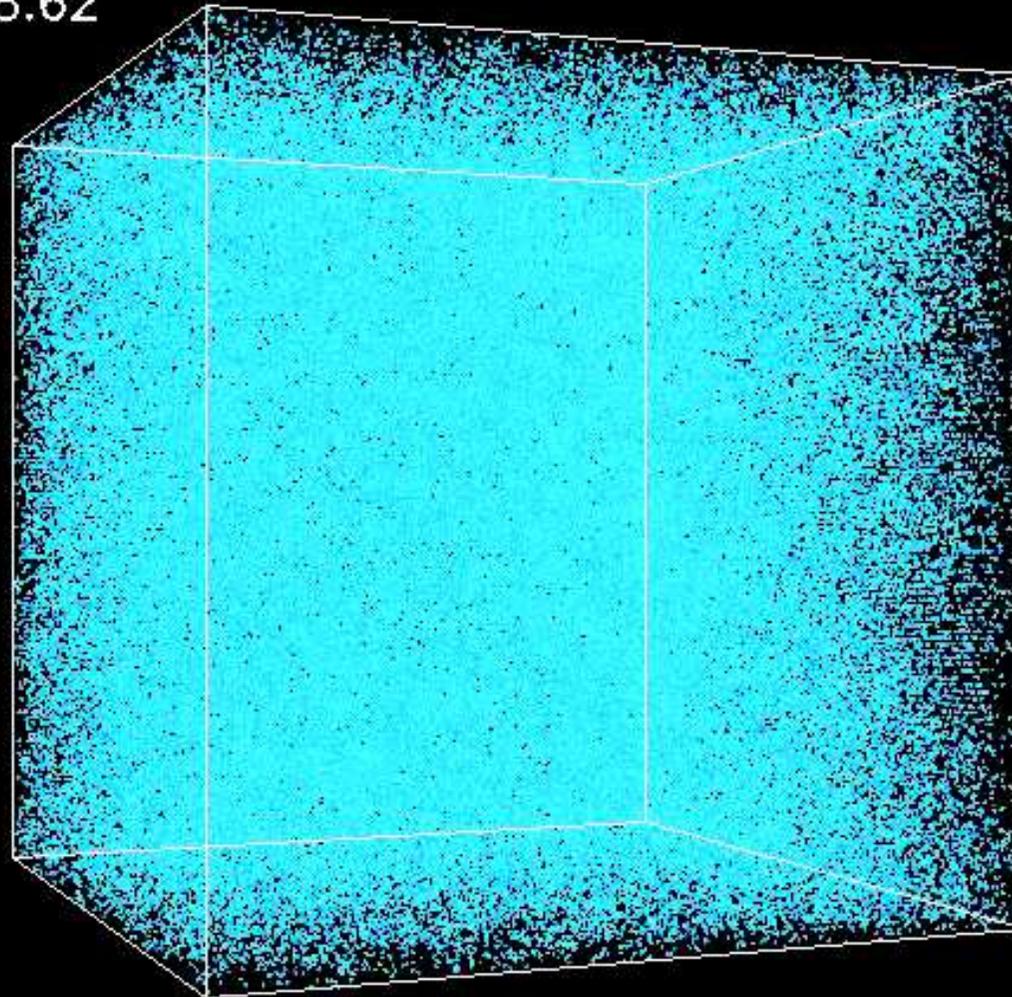


Figure 6. A schematic representation of a “merger tree” depicting the growth of a halo as the result of a series of mergers. Time increases from top to bottom in this figure and the widths of the branches of the tree represent the masses of the individual parent halos. Slicing through the tree horizontally gives the distribution of masses in the parent halos at a given time. The present time t_0 and the formation time t_f are marked by horizontal lines, where the formation time is defined as the time at which a parent halo containing in excess of half of the mass of the final halo was first created.



Formation hiérarchique : les petits d'abord!

$Z=28.62$



43 Mpc

Kravtsov & Klypin



Fluctuations de densité : instabilité de Jeans

Fluide :

- Conservation de la masse
- Conservation de l'impulsion
- Equation de Poisson

Surdensités : $\delta = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}$

Univers en expansion : $a(t)$

$$\ddot{\delta} + 2\frac{\dot{a}}{a}\dot{\delta} = \left(4\pi G\rho_0 - c_s^2 k^2 / a^2\right) \delta$$

gravité vs. pression

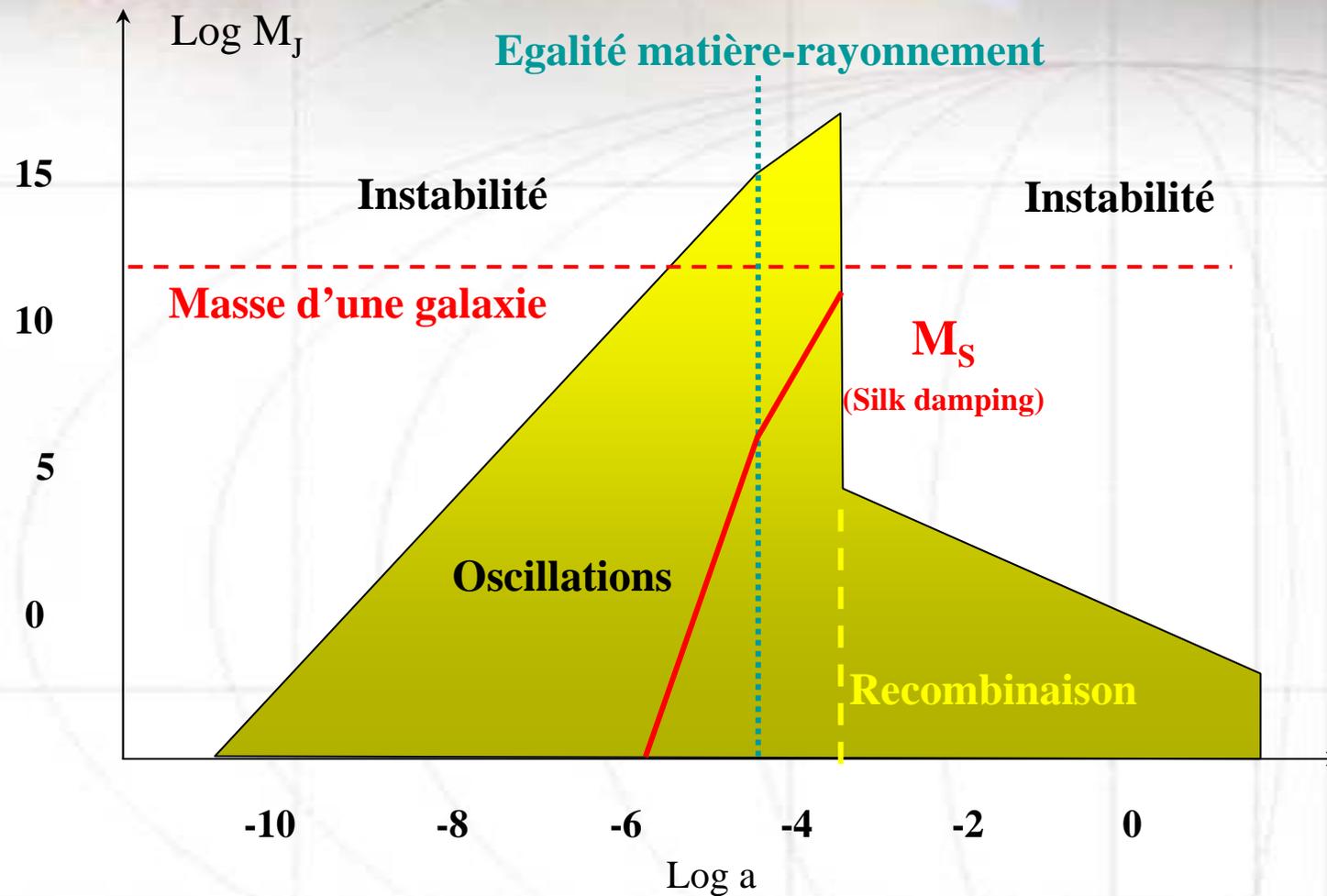
$k \sim 1/\lambda$	$\lambda > \lambda_J$	\rightarrow	effondrement
	$\lambda < \lambda_J$	\rightarrow	oscillations

Masse de Jeans

$$M_J = \left(\frac{5kT}{Gm}\right)^{3/2} \left(\frac{3}{4\pi\rho_0}\right)^{1/2}$$



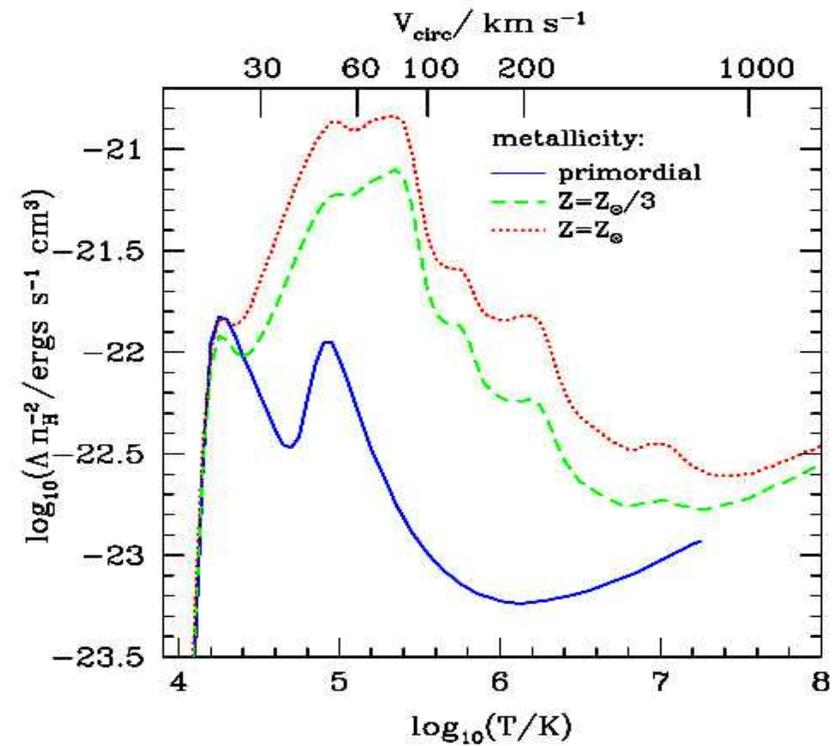
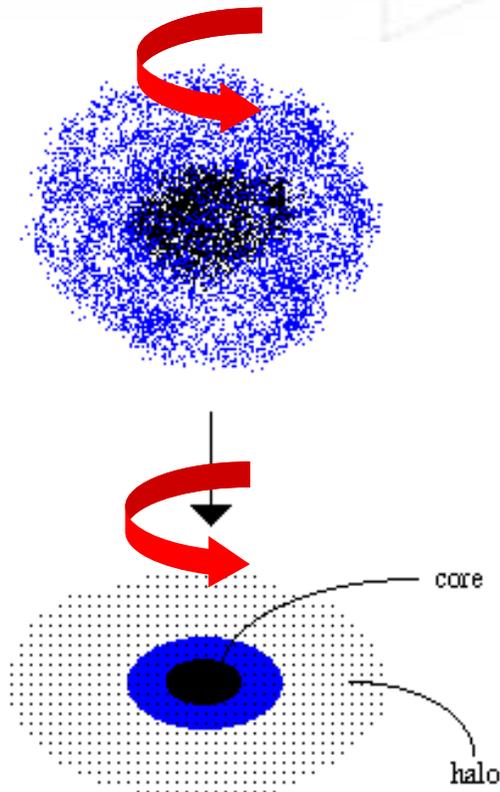
Evolution de la masse de Jeans





Devenir du gaz baryonique : refroidissement!

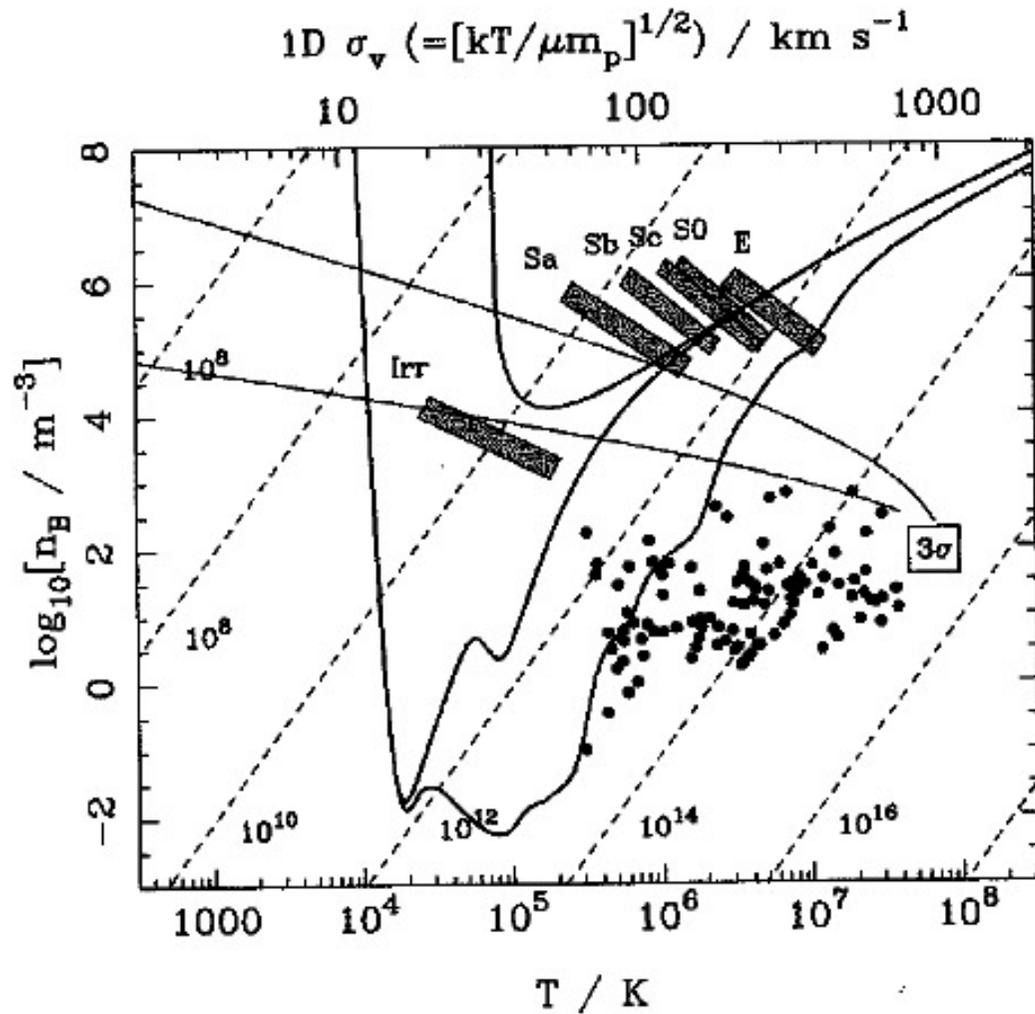
Formation du disque protogalactique
par condensation au cœur du halo
→ Perte d'énergie!



Importance de la métallicité



Refroidissement à l'œuvre : ségrégation des masses



Blumenthal et al. 1984

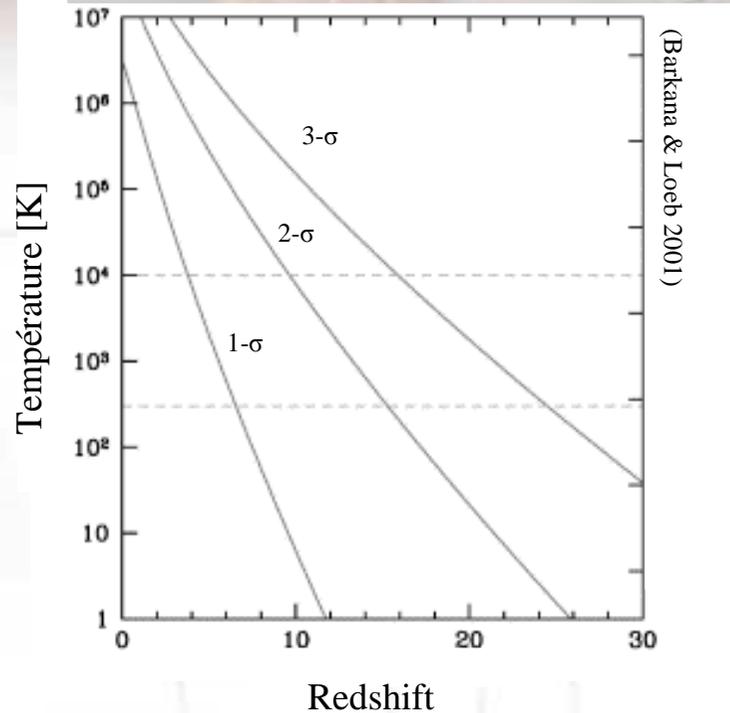


Formation des premières étoiles?

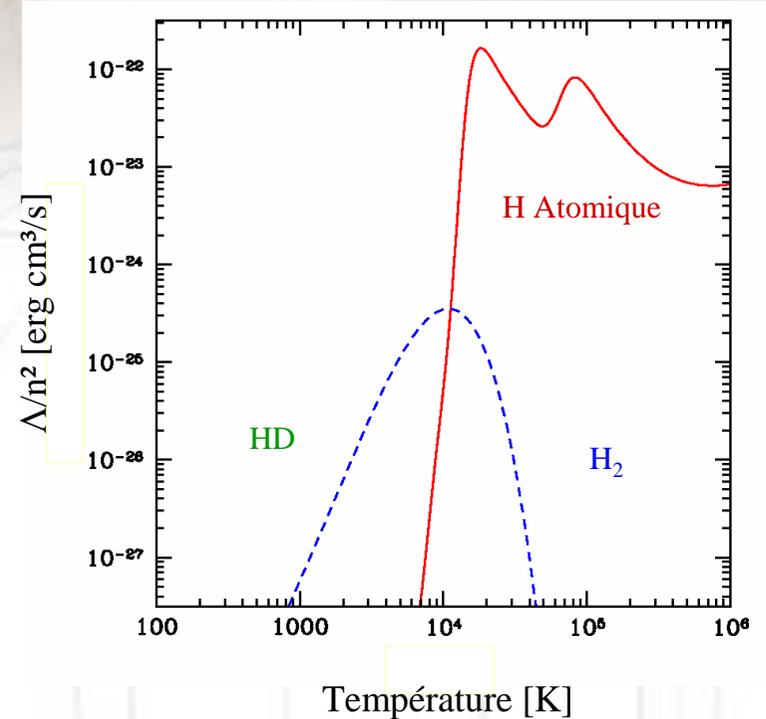


Les premiers sites de formation stellaire

Température des halos de MN



Fonction de refroidissement (zéro métaux)



$$T_{\text{vir}} > 10^4 \text{ K}$$

$$T_{\text{vir}} < 10^4 \text{ K}$$



Refroidissement par l'hydrogène atomique

Refroidissement par l'hydrogène moléculaire

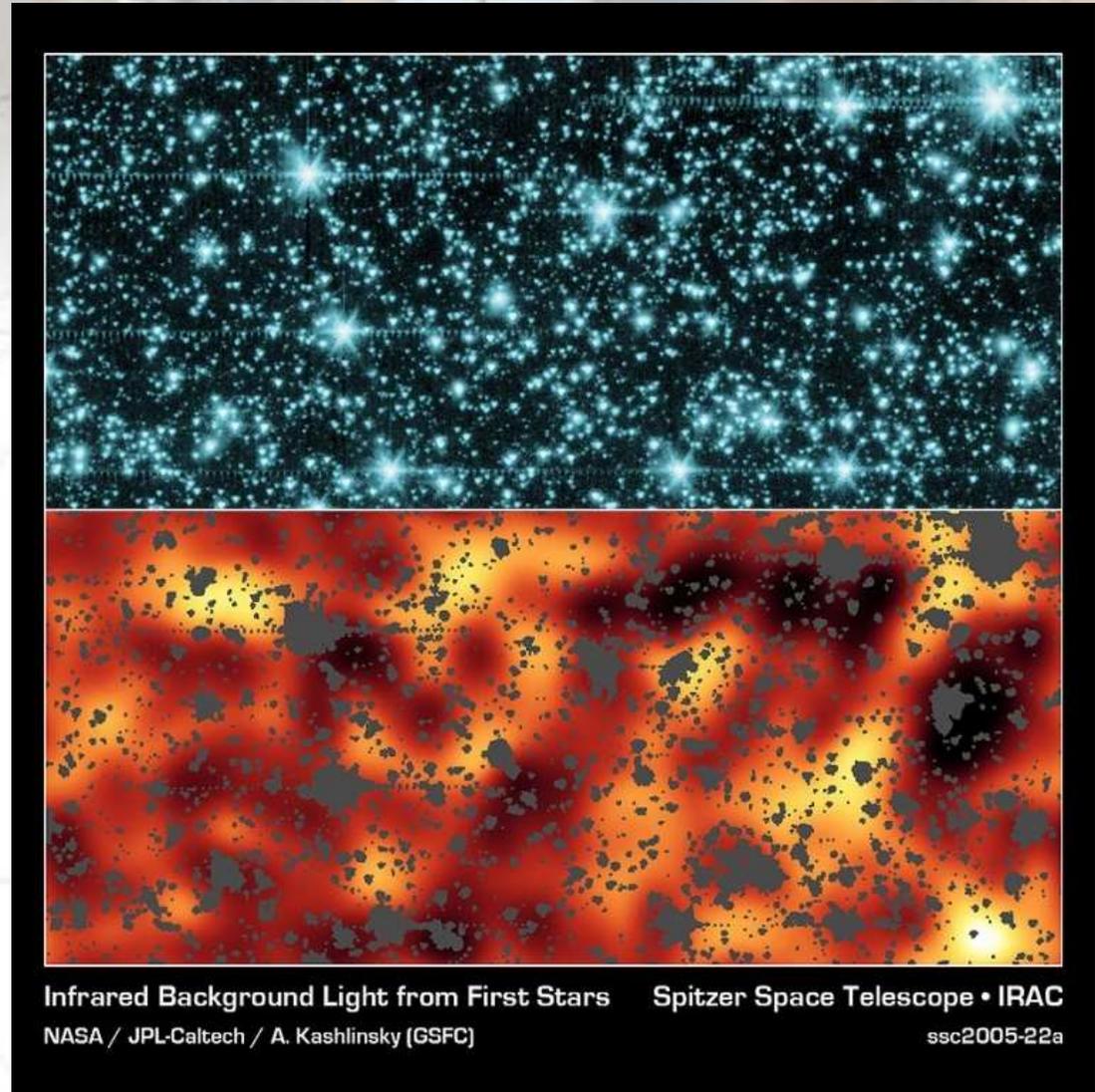


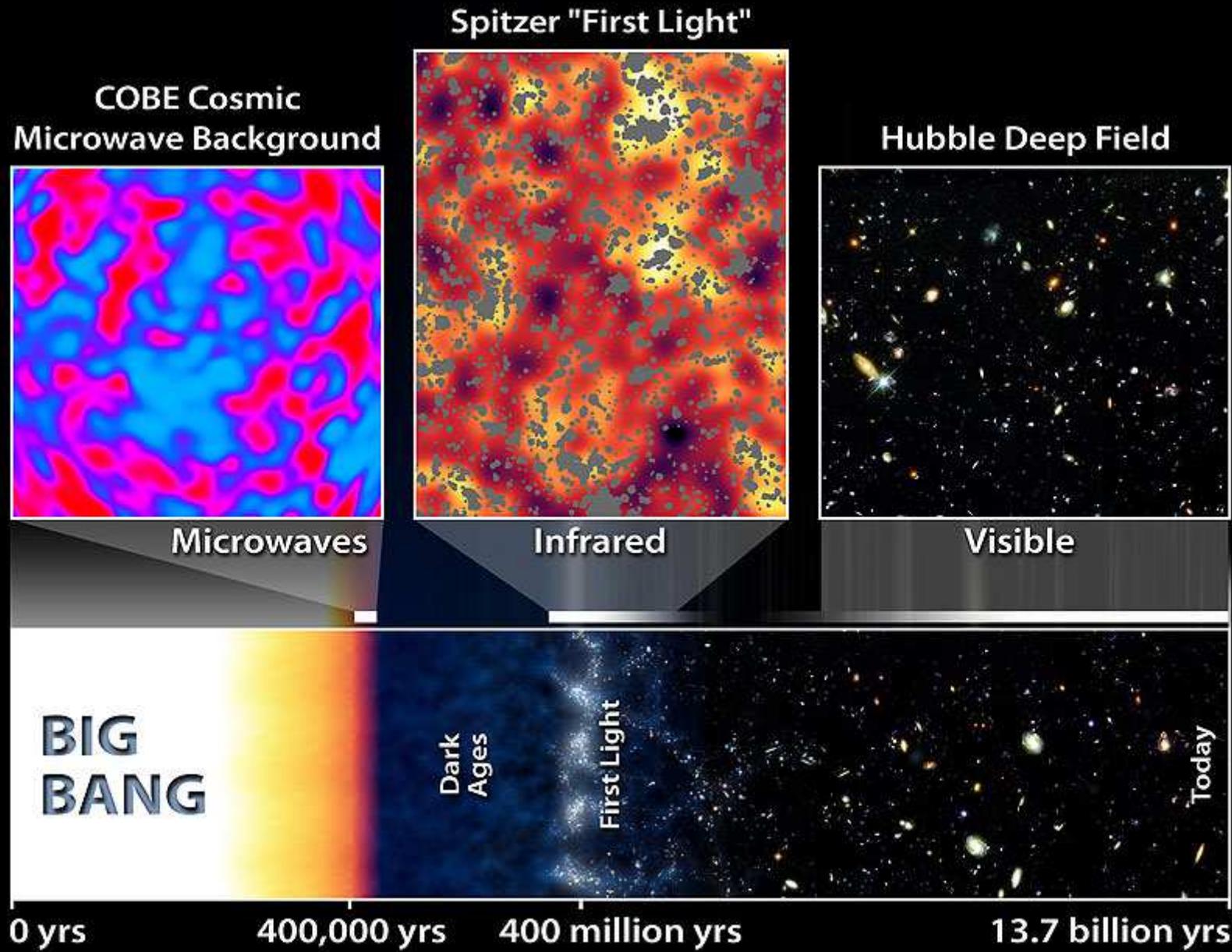
« Détection » des premières étoiles?



Télescope Spitzer (crédit :NASA/JPL)

Fluctuations du fond IR :
premières étoiles?





Timeline of the Universe

Spitzer Space Telescope • IRAC

NASA / JPL-Caltech / A. Kashlinsky (Goddard Space Flight Center)

ssc2006-22b



Formation des premières étoiles

- Vision classique
 - Effondrement gaz dans les 1^{rs} halos de matière noire
 - Masse des halos $\sim 2.5 \times 10^5 M_{\odot}$ (dès $z=49$; Reed et al. 2006)
 - Pas d'éléments lourds : refroidissement par H_2 seul
 - **~ 200 K** (c.f. 10 – 20 K aujourd'hui)
- Masse des nuages pré-stellaires (masse de Jeans)

$$M \gtrsim 700 M_{\odot} \left(\frac{T}{200\text{K}} \right)^{3/2} \left(\frac{n}{10^4 \text{cm}^{-3}} \right)^{-1/2}$$

(Abel et al 2002, Bromm et al 2002)



Processus de formation clef : accréation

- Cœur hydrostatique

- $M_{\text{cœur}} \sim 5 \times 10^{-3} M_{\odot}$ (Omukai & Nishi 98, d'après Larson 1969)

- Questions

- Sphérique ?

- ← majorité des études, 1D radiales

- Via disque ?

- ← plus probable (moment cinétique)

- Efficacité ?

- Taux d'accréation:

$$\dot{M} \approx \frac{M_{\text{Jeans}}}{t_{\text{ff}}} \approx \frac{c_s^3}{G} \propto T^{3/2}$$

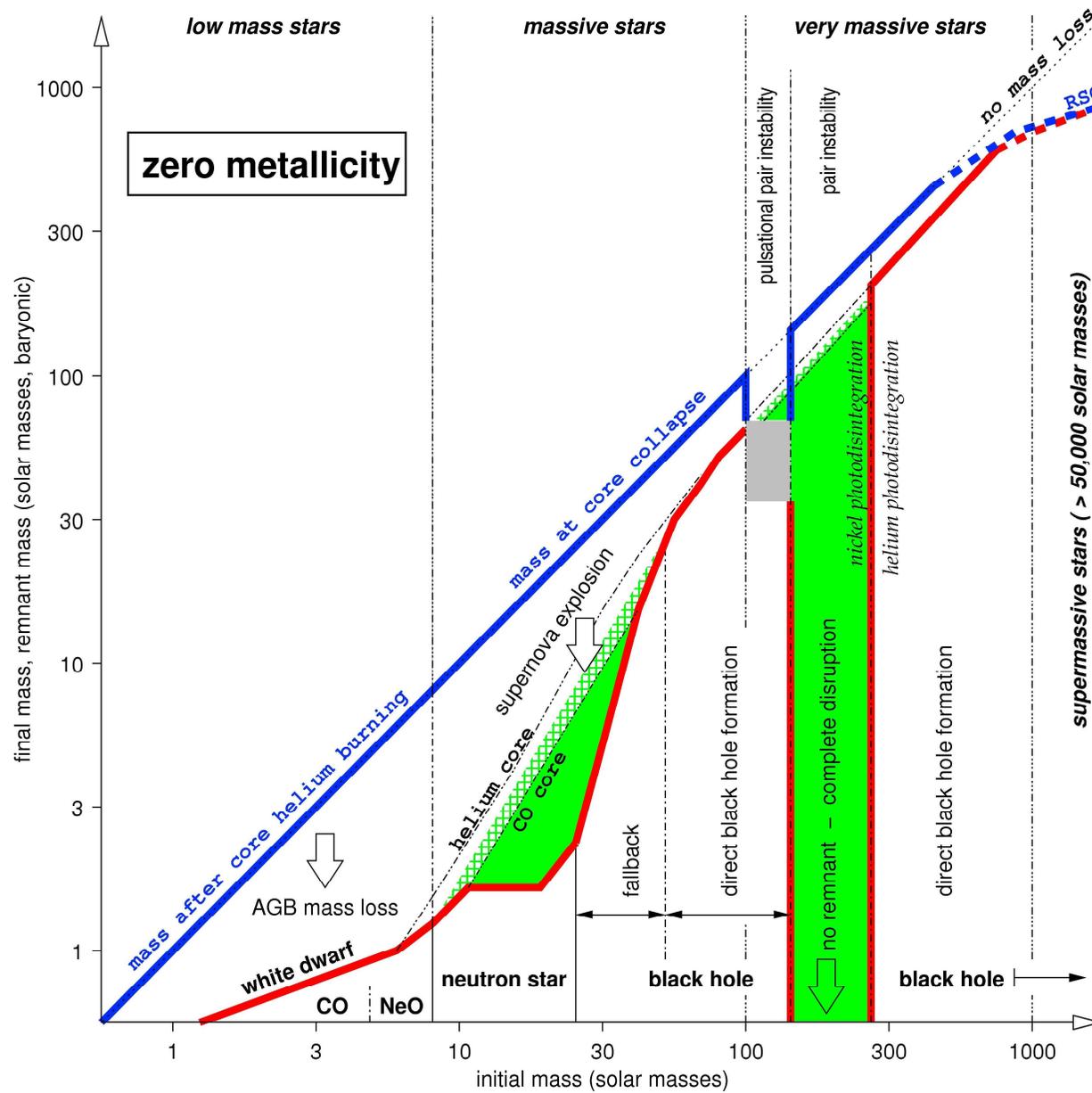
$$\dot{M}_{\text{acc}} (\text{PopIII: } T \sim 200\text{K}) \gg \dot{M}_{\text{acc}} (\text{Local: } T \sim 10\text{K})$$

$$\text{Conséquence : } M_{\text{PopIII}} \approx 100 - 1000 M_{\odot}$$



Indices **contre** des étoiles Pop III très massives

- Rapports d'abondance dans les étoiles extrêmement pauvres du halo galactique compatibles avec Pop III de 20-130 M_{\odot}
(Umeda & Nomoto 2005)
- Rapport FeII/MgII constant $0 < z < 5 \rightarrow$ SNaE II jusqu'à $z = 9$
(Dietrich et al. 2003)
- Signatures nucléosynthétiques SNaE instab. de paires non détectées dans les systèmes Ly- α ni dans les étoiles faiblement enrichies du halo
(Daigne et al. 2006)
- PopIII 10-100 M_{\odot} : à l'origine de la réionisation ?
(Tumlinson et al. 2006)



Heger et al. 2002



Ingrédients manquants?

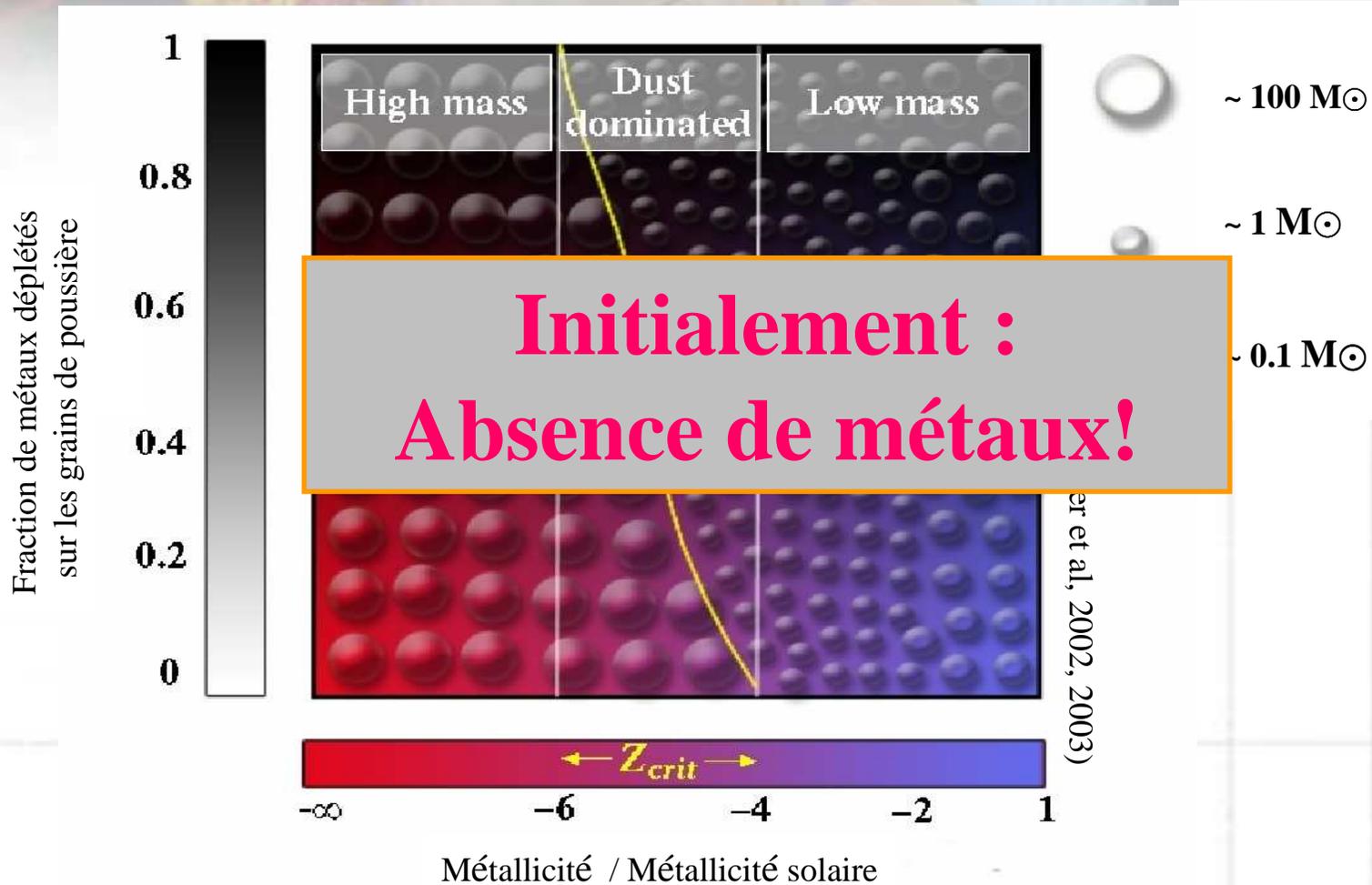
- Rotation : formation de binaires Pop III possible, nécessite un faible moment cinétique initial (simulations: Saigo et al. 2004)

mais masses résultantes toujours élevées

- Rétroaction radiative : peut affaiblir le taux d'accrétion (Tan & McKee, 2004)
- Comparaison avec formation Pop I & Pop II :
 - Éléments lourds, poussière → refroidissement efficace, **fragmentation**
 - Champs magnétiques → jets, **outflows** (+ freinage, etc.)



Effet de la métallicité : fragmentation





Champs magnétiques et Population III

Silk & Langer 2006

- Champs primordiaux
 - inflation, transitions de phase, perturbations du 2nd ordre à la recombinaison
→ survivre jusqu'à la formation des Pop III & échapper contraintes obs.
- Génération *in situ* (hypothèse minimale : événement générique)
 - Batterie de Biermann (effets de pression thermique)
 - Entraînement différentiel e^- vs. p par le rayonnement
→ essentiellement le même résultat:

$$B_{\text{seed}} \sim 4 \times 10^{-12} f \left(\frac{M_{\star}}{10 M_{\odot}} \right)^{1/2} \left(\frac{r}{10^3 R_{\odot}} \right)^{-3/2} \text{ Gauss}$$

Faibles germes seulement ? → **Besoin d'amplification :**
Instabilité Magnéto-Rotationnelle (MRI)



Amplification par MRI

Silk & Langer 2006

Modes d'instabilité maximale $\lambda = V_A/\Omega \ll H = f R$

Conditions :

- Modes instables $\lambda >$ libre parcours moyen

$$\rightarrow B > 10^{-9} \text{ G} \quad \text{trop grand!}$$

- Temps d'amplification $<$ temps de diffusion

$$\rightarrow B > 5 \times 10^{-8} \text{ G} \quad \text{trop grand!}$$

- Modes d'instabilité marginale $\lambda \leq H = f R$

stabilisés par diffusivité magnétique (Kitchatinov & Rüdiger 2004)

$$B_{\min} \geq 4 \times 10^{-15} \alpha^{-1/2} f^{-11/2} \left(\frac{\dot{M}}{10^{-4} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}} \right)^{1/2} \left(\frac{M_{\star}}{10 M_{\odot}} \right)^{-7/4} \left(\frac{r}{10^3 R_{\odot}} \right)^{-1/4} \text{ G}$$



Quand est-ce que cette amplitude est atteinte ?

Silk & Langer 2006

- L'accrétion se poursuit, l'objet central (M_{\star}) grandit:
 B_{\min} diminue
 B_{seed} augmente
- B_{\min} devient plus faible que B_{seed} quand M_{\star} assez grande :

$$M_{\star} \geq 0.5 \alpha^{-2/9} f^{-22/9} \left(\frac{\dot{M}}{10^{-4} M_{\odot} \text{yr}^{-1}} \right)^{2/9} \left(\frac{r}{10^3 R_{\odot}} \right)^{5/9} M_{\odot}$$

Disques très fins (refroidissement efficace) :

$$f \sim 0.1 \rightarrow M_{\star} = 130 - 340 M_{\odot}$$

Disques plus réalistes (Pop III) : $f \sim 0.4 \rightarrow M_{\star} = 4 - 30 M_{\odot}$



Champ B et Pop III : pour résumer

- Champs magnétiques inévitables dans la formation des Pop III
- Amplification des germes B via MRI quand objet central assez massif
- Masse minimale : 4 – 30 masses solaires seulement
- Dépend fortement de l'épaisseur du disque (refroidissement du gaz)

→ Développement d'outflows magnétiques probable

Conséquence : accrétion réduite déjà quand masse pré-stellaire petite!

→ Pop III probablement pas super-lourdes

Etape suivante : modéliser l'efficacité des vents & outflows magnétiques...

(cf. premières simulations de jets dans le cadre Pop III, Machida et al 2006)

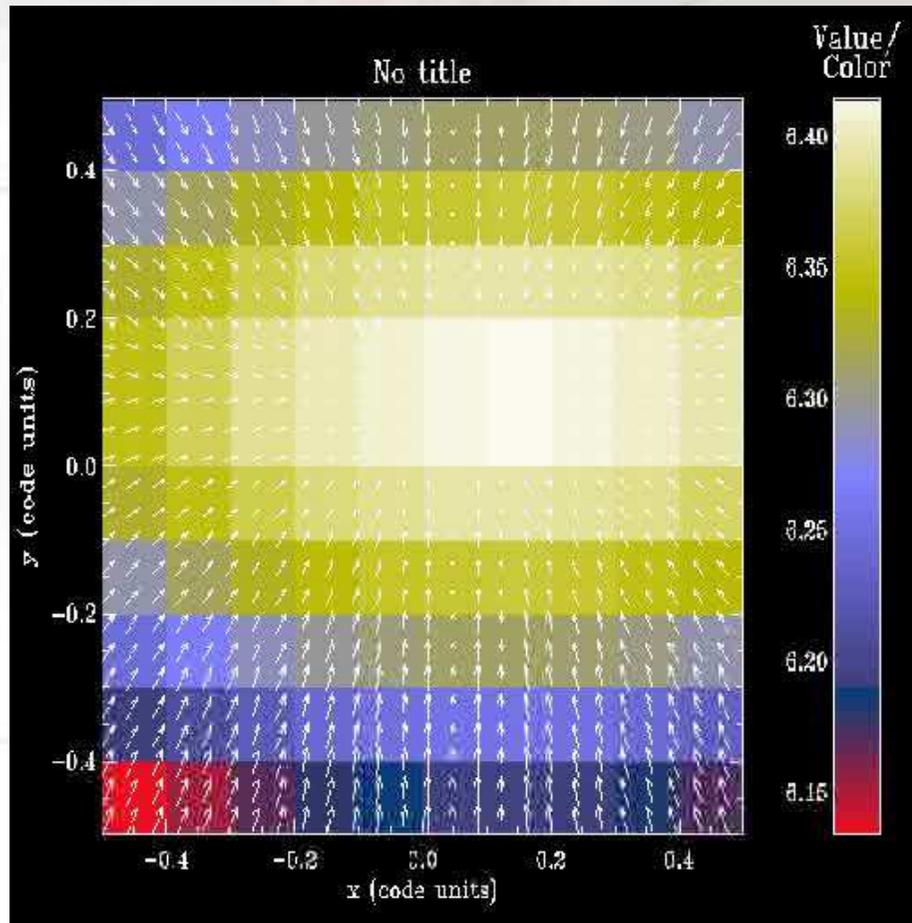
Piste prometteuse : comparaison avec formation des Pop I & Pop II!



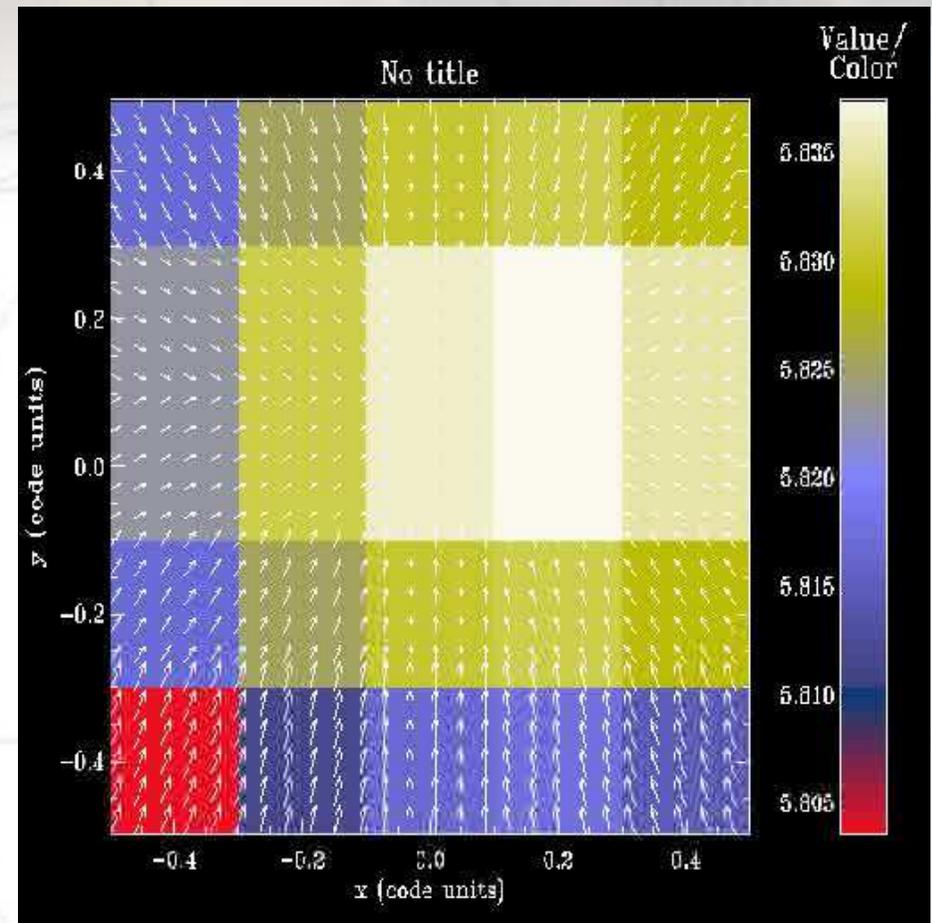
Influence du champ magnétique sur l'accrétion

0.01 pc

Fromang, Hennebelle, Teyssier, 2006



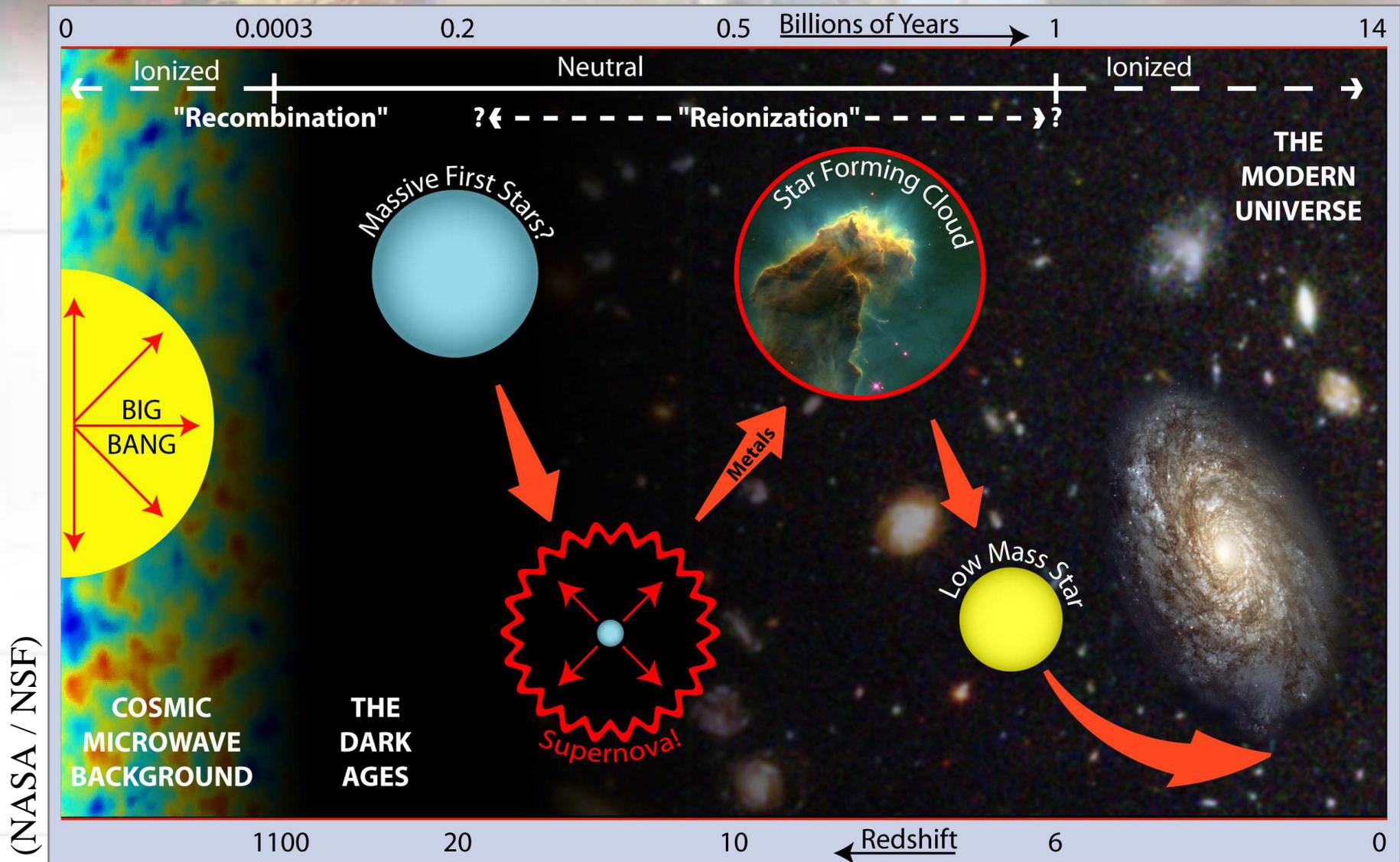
Hydro



Magnétisé



Propriétés des Population III : enjeux?





Réionisation vs. nature des sources

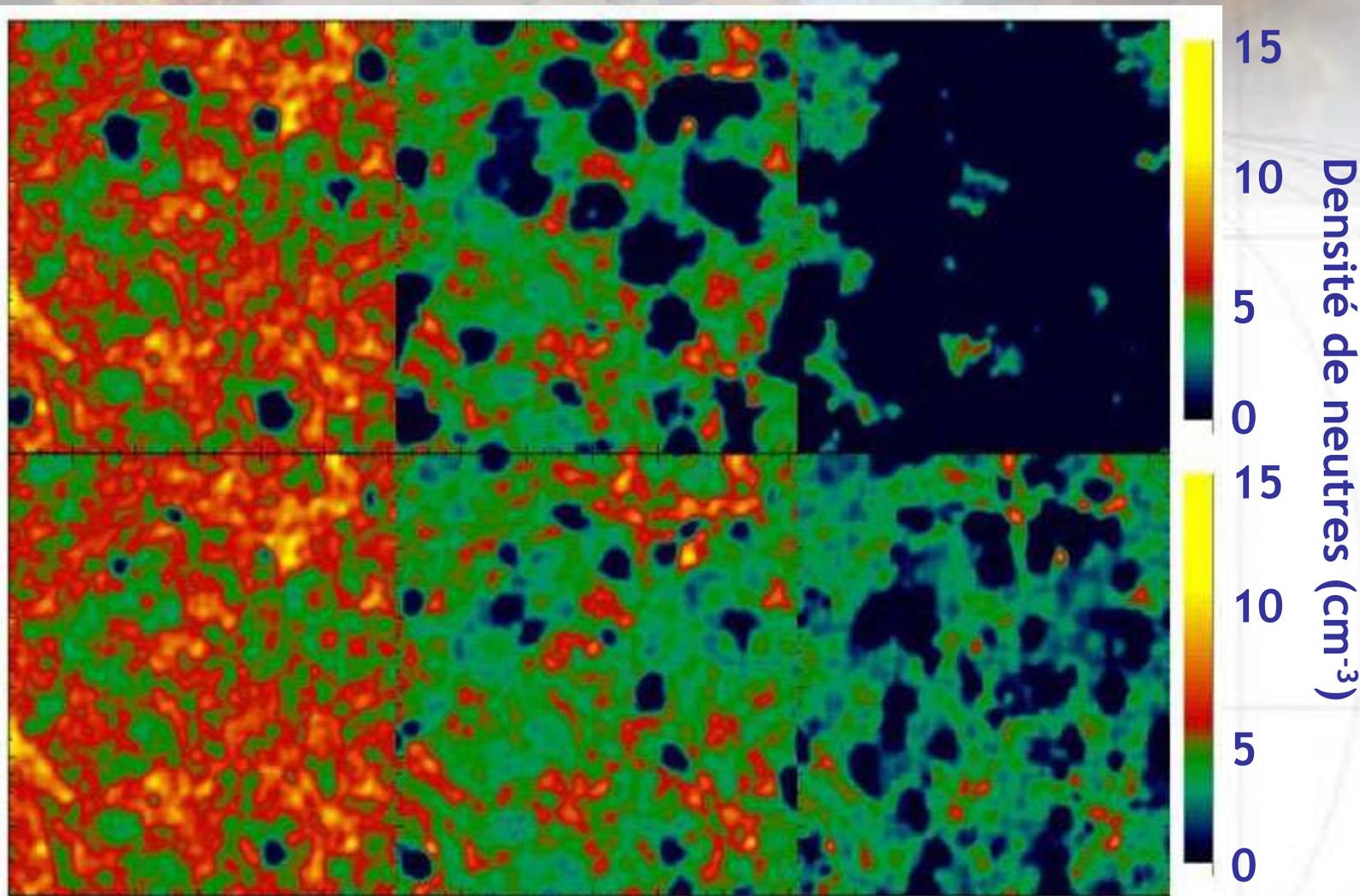
$Z = 17.5$

15.5

13.7

Larson IMF
(„Top heavy”)

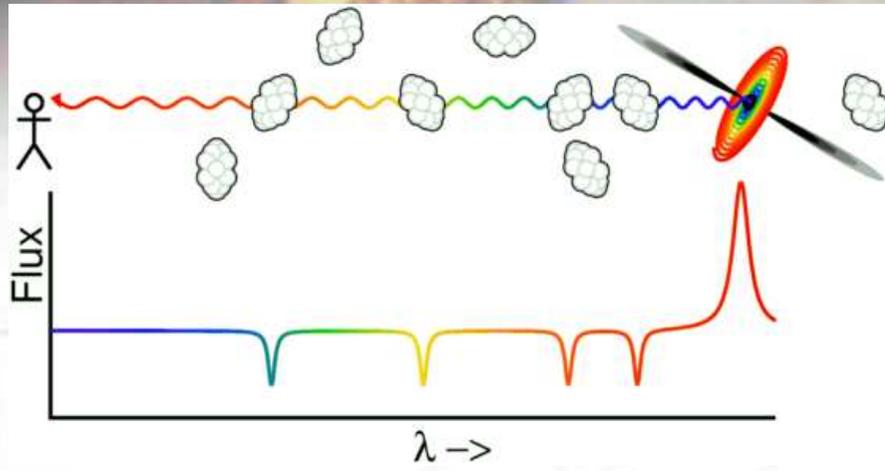
Salpeter IMF



Ciardi et al. 2001



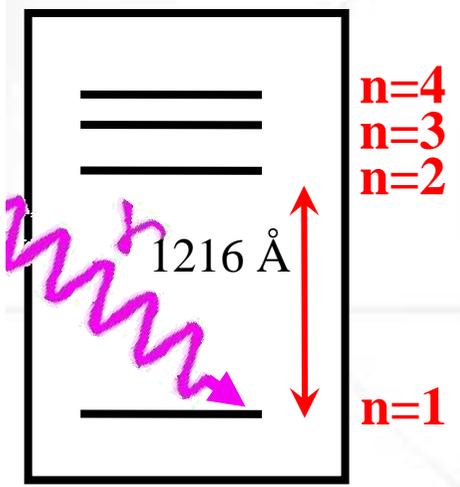
Forêt Lyman α dans le spectre des quasars distants



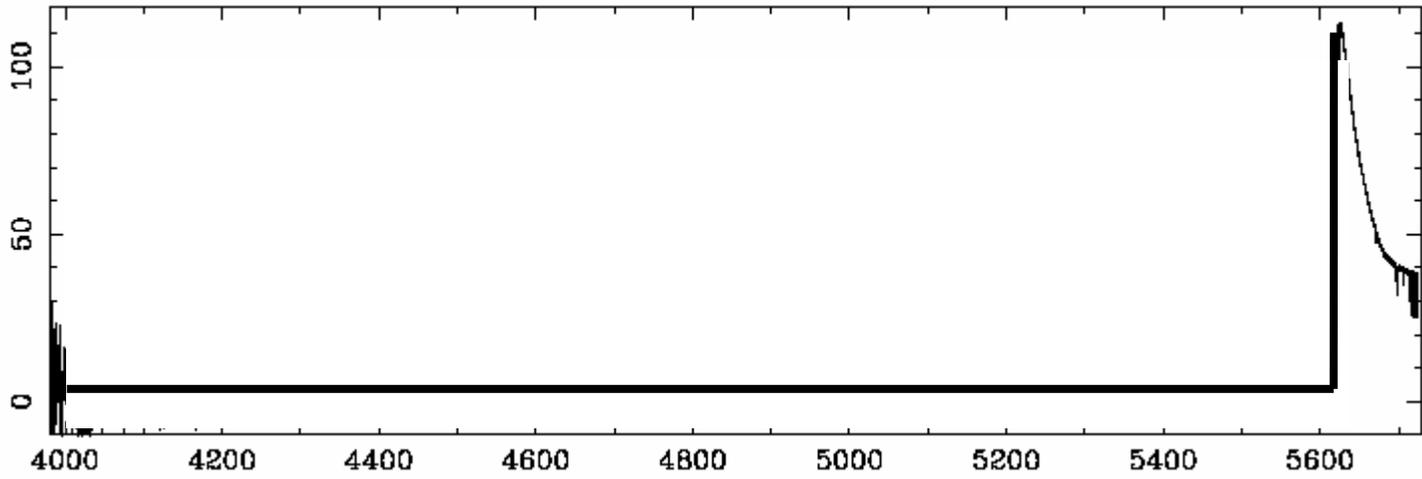
Epaisseur optique Ly- α :

$$\tau_s = \frac{\pi e^2 f_\alpha \lambda_\alpha n_{\text{HI}}(z)}{m_e c H(z)}$$

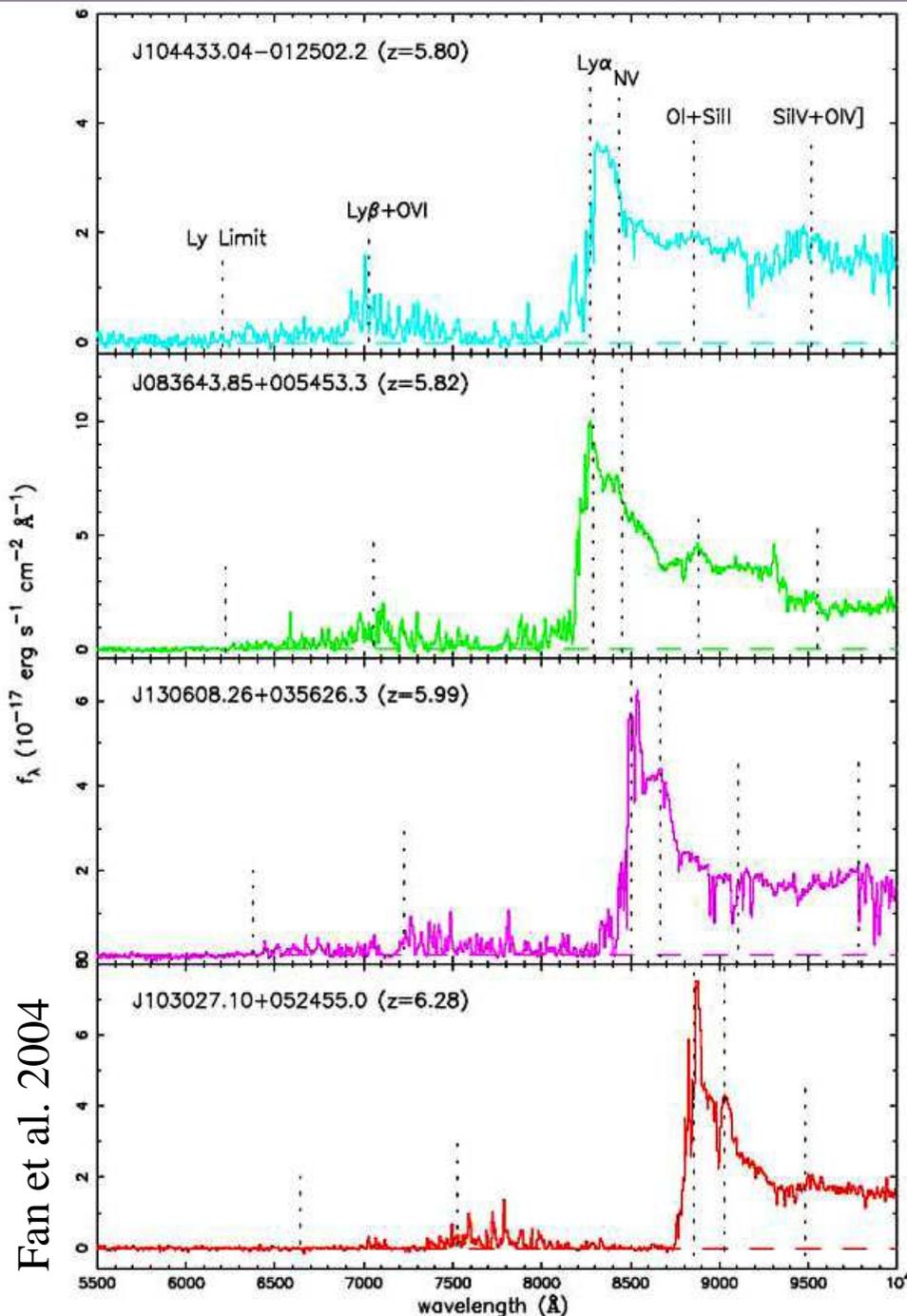
$$\approx 6.45 \times 10^5 x_{\text{HI}} \left(\frac{\Omega_b h}{0.0315} \right) \left(\frac{\Omega_m}{0.3} \right)^{-1/2} \left(\frac{1+z}{10} \right)^{3/2}$$



transitions Lyman



A $z \sim 4$, milieu intergalactique $\sim 10^{-4}$ neutre



Fan et al. 2004

Spectre des quasars distants :

Augmentation brusque
de la densité neutre vers $z > 6$

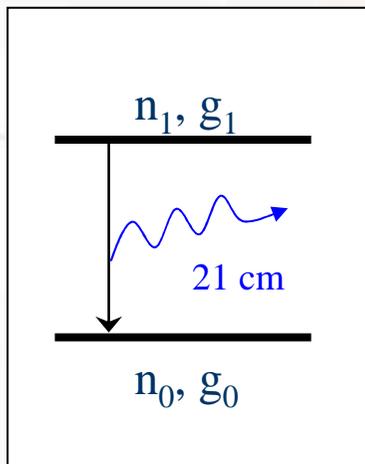
Trace la fin de la réionisation

Comment voir le début?

→ raie à 21 cm



La physique de la transition à 21 cm



- Transition à 21 cm : transition interdite entre les deux niveaux hyperfins $1s_{1/2}$ du fondamental de l'atome d'hydrogène.

- Population relative des deux niveaux :

$$n_1/n_0 = g_1/g_0 \exp[-T_*/T_s] \quad \text{ou } T_* = 0.068 \text{ K}$$

- La température de spin T_s est définie par :

$$T_s = \frac{T_{\text{CMB}} + y_c T_K + y_\alpha T_K}{1 + y_c + y_\alpha}$$

(Field 1958)

Excitation par collisions H-H et H-e⁻
(e⁻ énergétiques : X-ray → trous noirs)

Excitation par Ly- α
effet Wouthuysen-Field
(photons UV → étoiles)



Observations : absorption ou émission?

Quantité mesurée : température de brillance différentielle

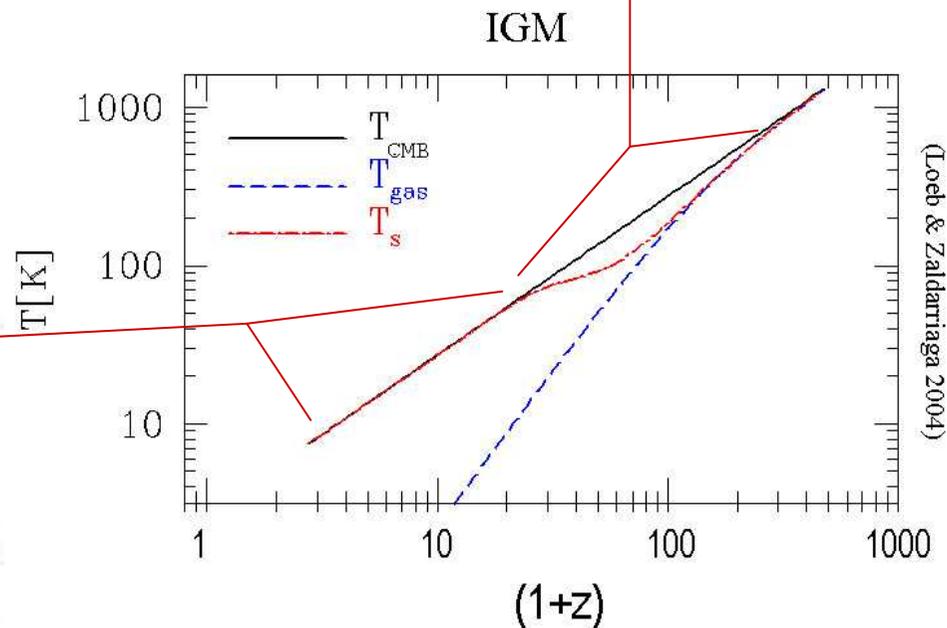
$$\delta T_b \approx \frac{T_s - T_{CMB}}{1+z} \tau \propto (1 - T_{CMB}/T_s)$$

$T_{CMB} \gg T_s \Rightarrow$ absorption

$T_s \gg T_{CMB} \Rightarrow$ émission

$z_{ion} < z < 30 \rightarrow$ émission

$30 < z < 200 \rightarrow$ absorption



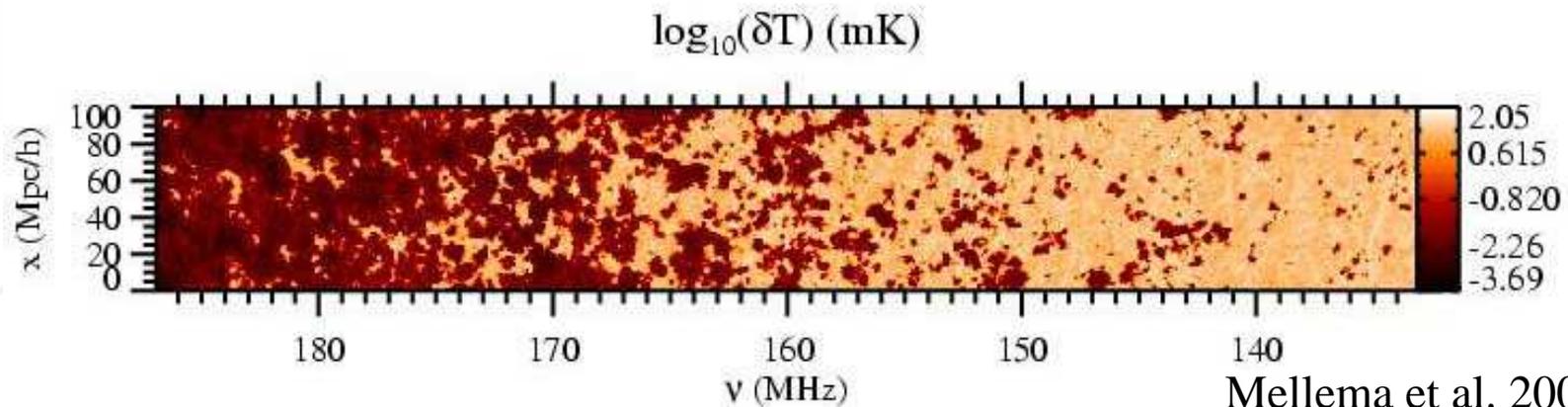


Compétition entre T_{CMB} et fraction de gaz neutre x_{HI}

$$\delta T_b(\nu) \approx 28\text{mK} (1 + \delta) x_{HI} \frac{T_s - T_{CMB}}{T_s} \frac{\Omega_b h^2}{0.02} \left[\frac{0.24}{\Omega_m} \left(\frac{1+z}{10} \right) \right]^{1/2}$$

Field 1958

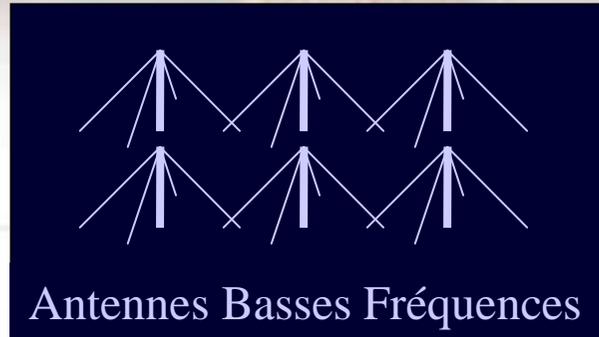
Redshift : $1+z = \nu/\nu_{obs} \rightarrow$ **tomographie**



Exemple : $\nu = 1420.4 \text{ MHz} \rightarrow \nu_{obs} = 160 \text{ MHz} \leftrightarrow z \sim 8.9$

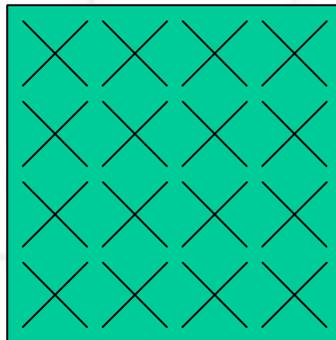


Interférométrie radio : LOFAR



Hz

e...



Antennes Hautes Fréquences

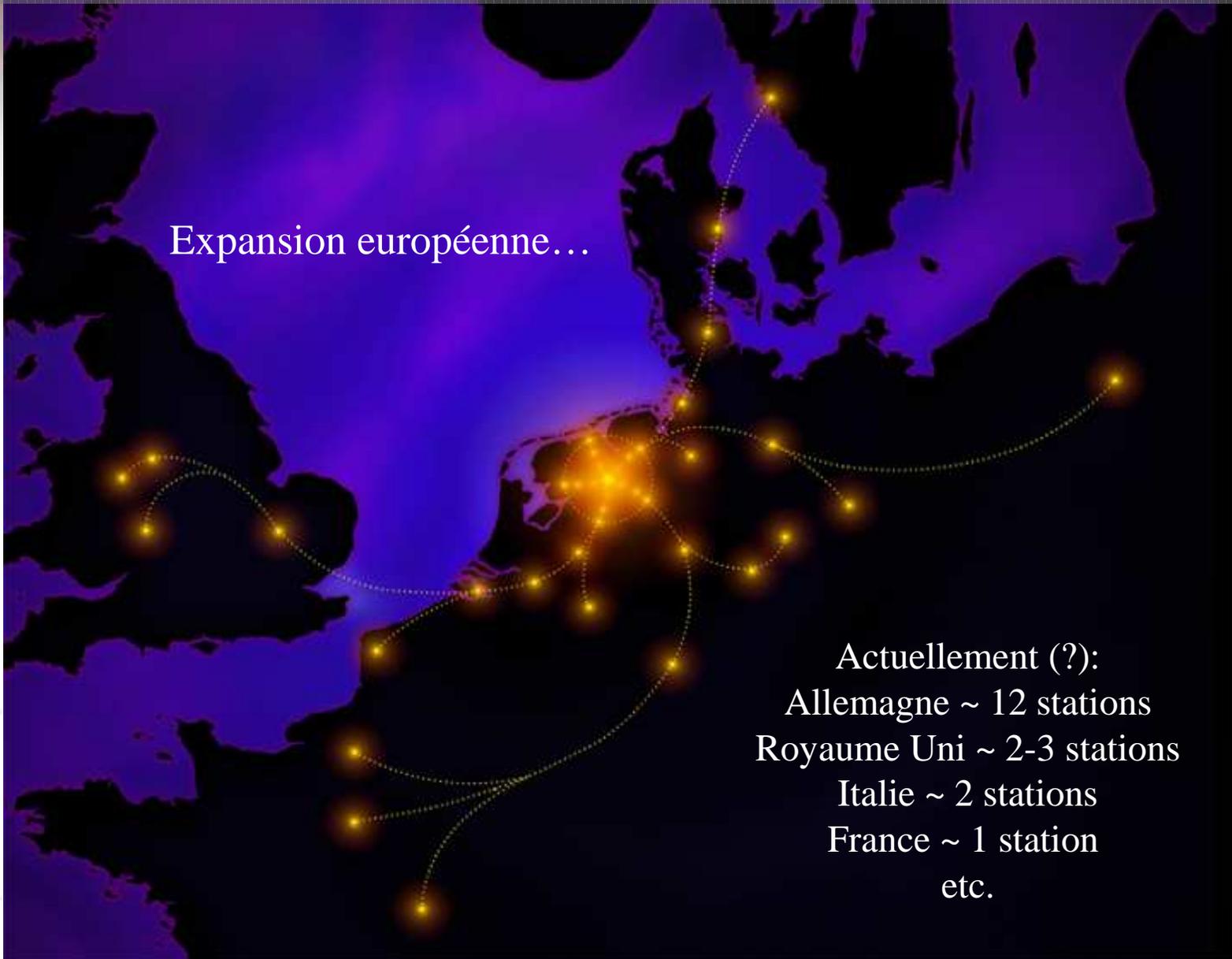


MHz



LOFAR Europe

Expansion européenne...



Actuellement (?):
Allemagne ~ 12 stations
Royaume Uni ~ 2-3 stations
Italie ~ 2 stations
France ~ 1 station
etc.

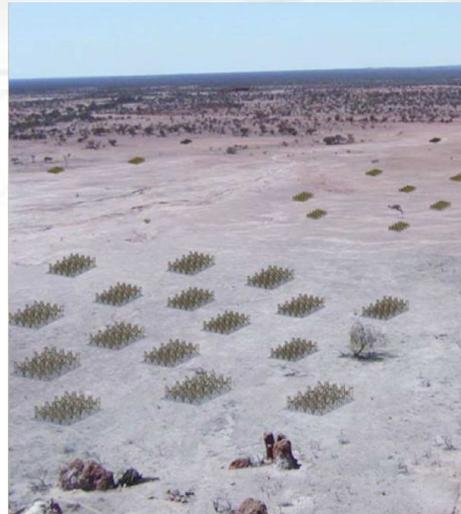


Projets d'interférométrie

LOFAR: Pays-Bas
Freq: 110-240 MHz

MWA: Australie
Freq: 80-300 MHz

PAST: Chine
Freq: 70-200 MHz



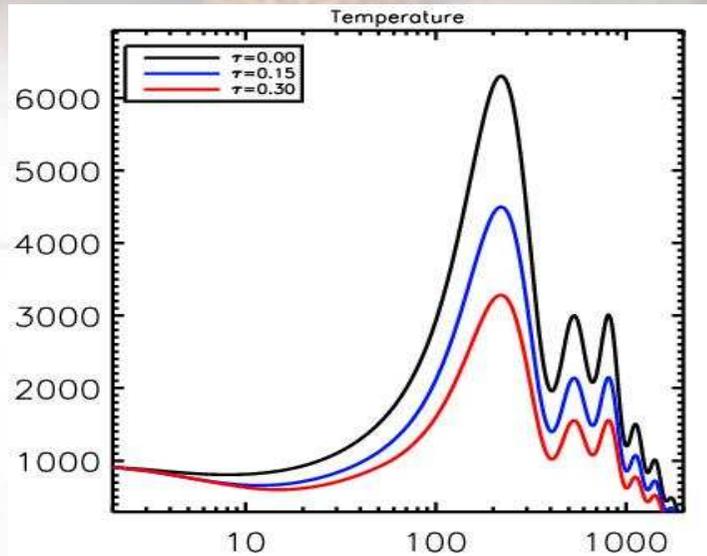
SKA: ???
Freq: 60 MHz-35 GHz



Remarque :
problème des avant-plans!

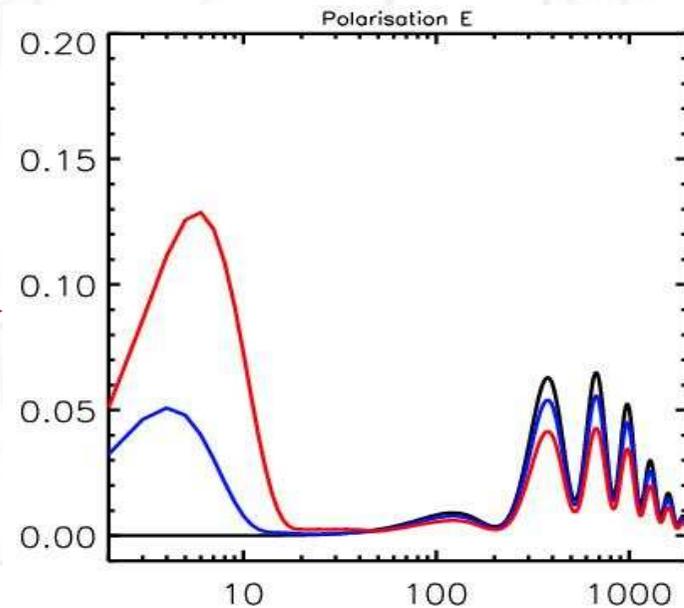


CMB, polarisation et température, effets de la réionisation



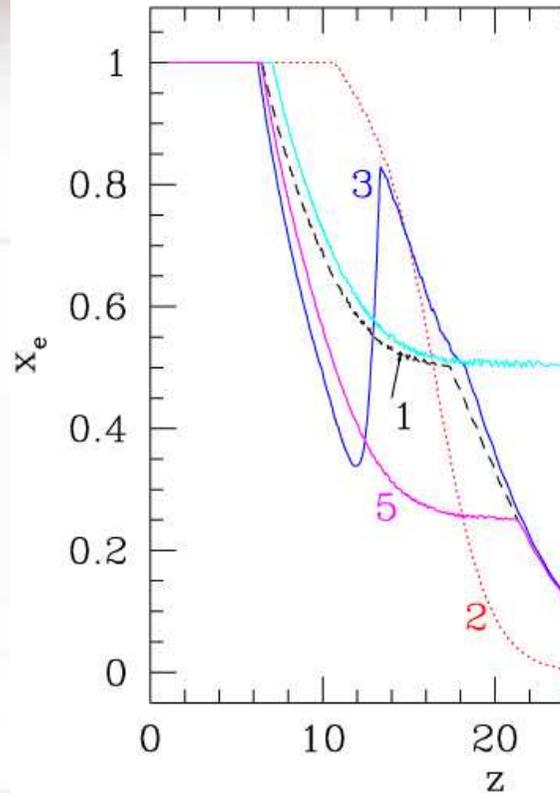
Amortissement des anisotropies de température

Pic dans le spectre polarisé EE à grande échelle

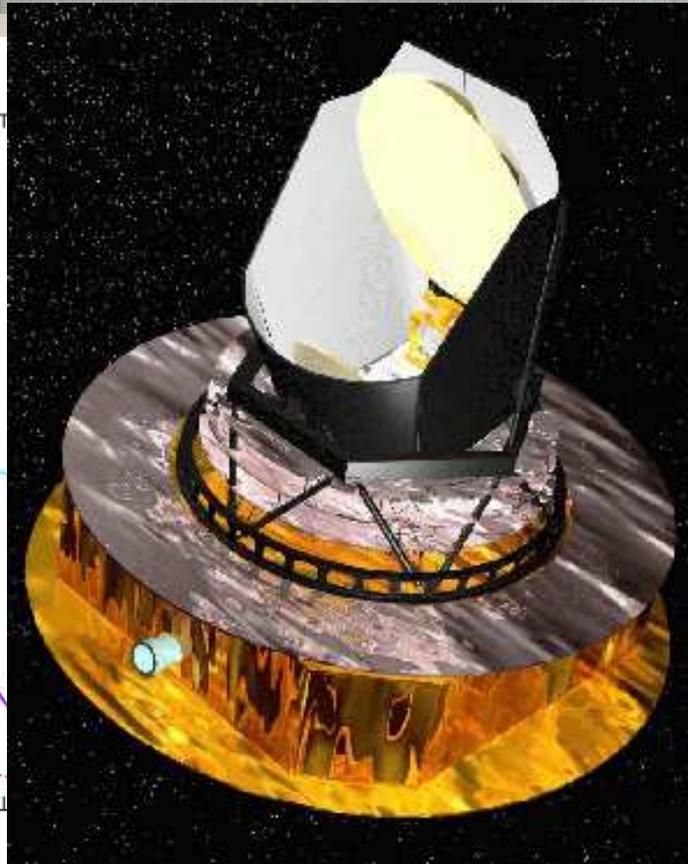




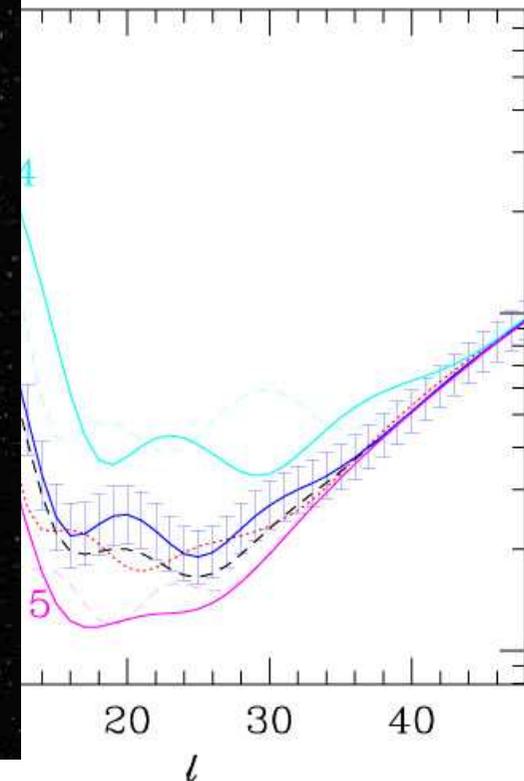
Différentes histoires de la réionisation; Planck



Fraction d'ionisation



Holder et al. 2003

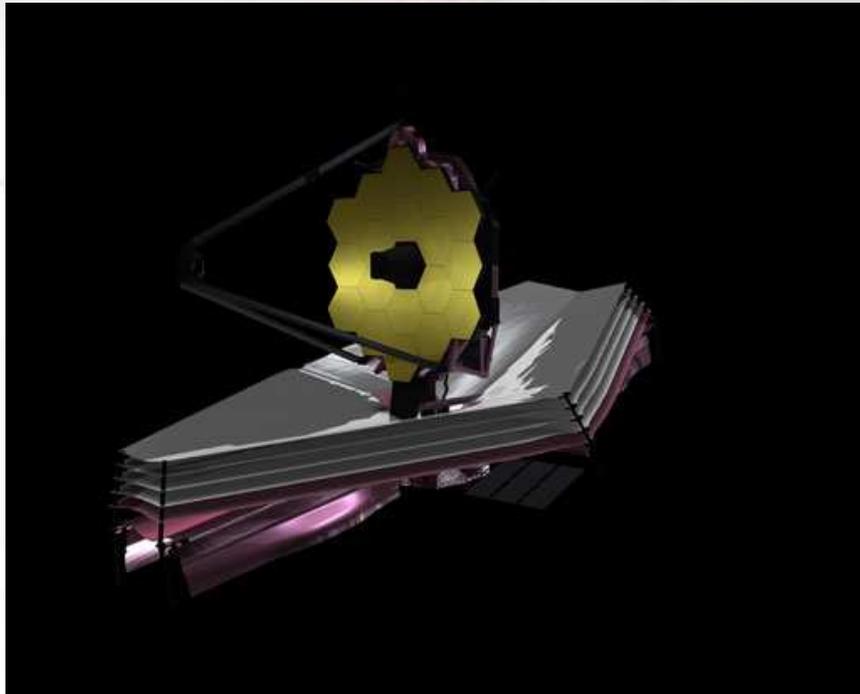


Spectre de puissance EE

Planck sera capable de distinguer différentes histoires de la réionisation

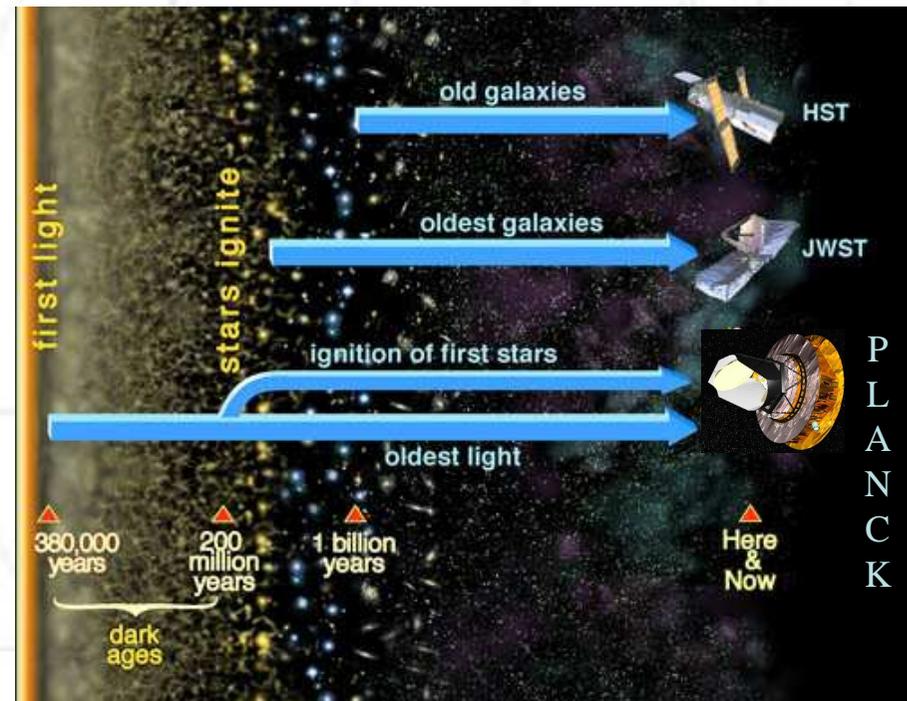


Observation des premières galaxies : JWST



Vue d'artiste (NASA)
Lancement prévu : 2013

- Survey ultra-profond proche infrarouge
- Suivi spectroscopique basse résolution
- Photométrie infrarouge moyen
- Réionisation :
spectro. infrarouge haute résolution





**Voile sur les Ages Sombres
en passe d'être levé!**