Cosmologie Moderne
Cours 11

J.-Ch. Hamilton, APC
hamilton@apc.univ-paris7.fr

Petite Histoire de l'Univers

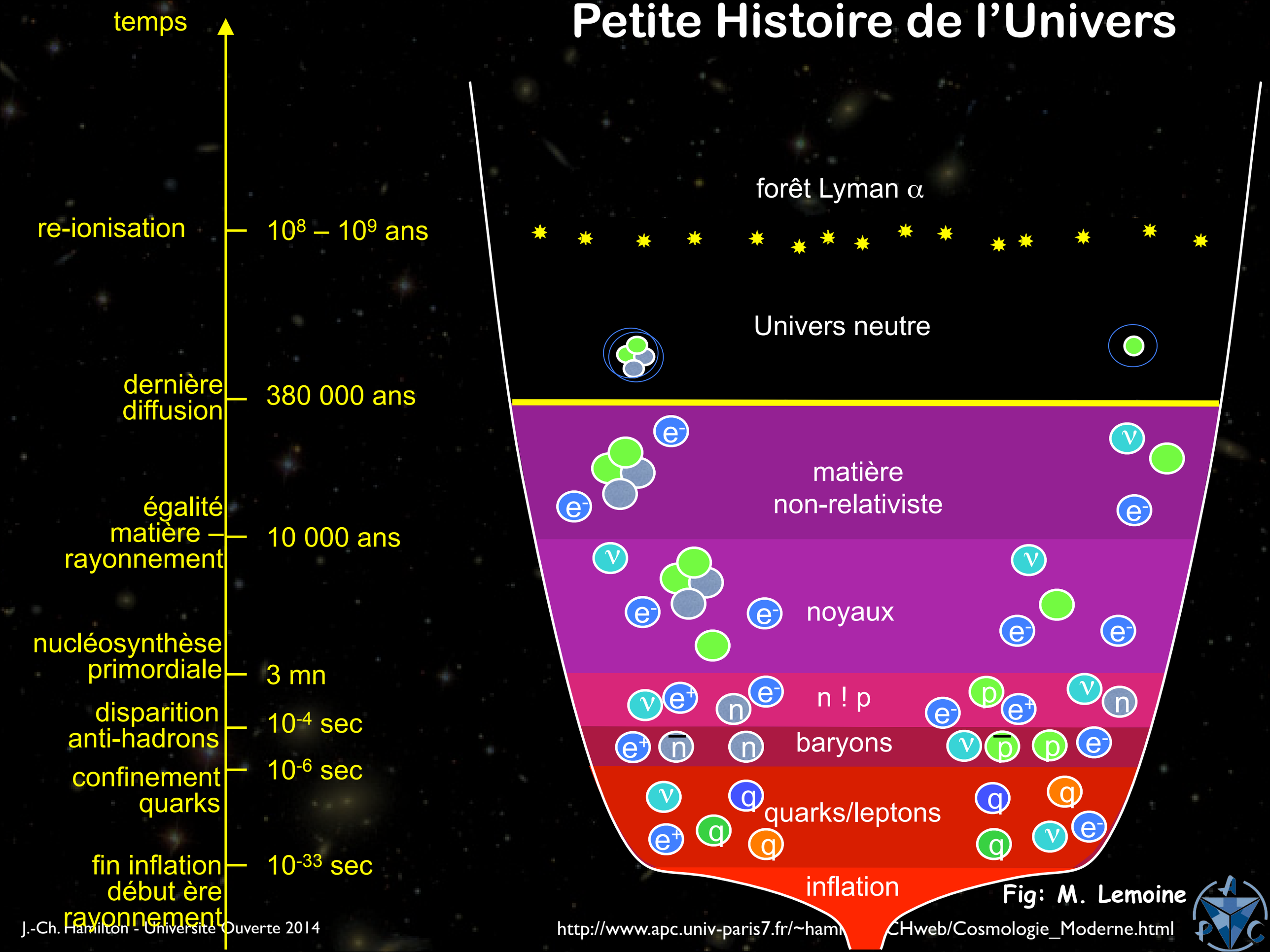
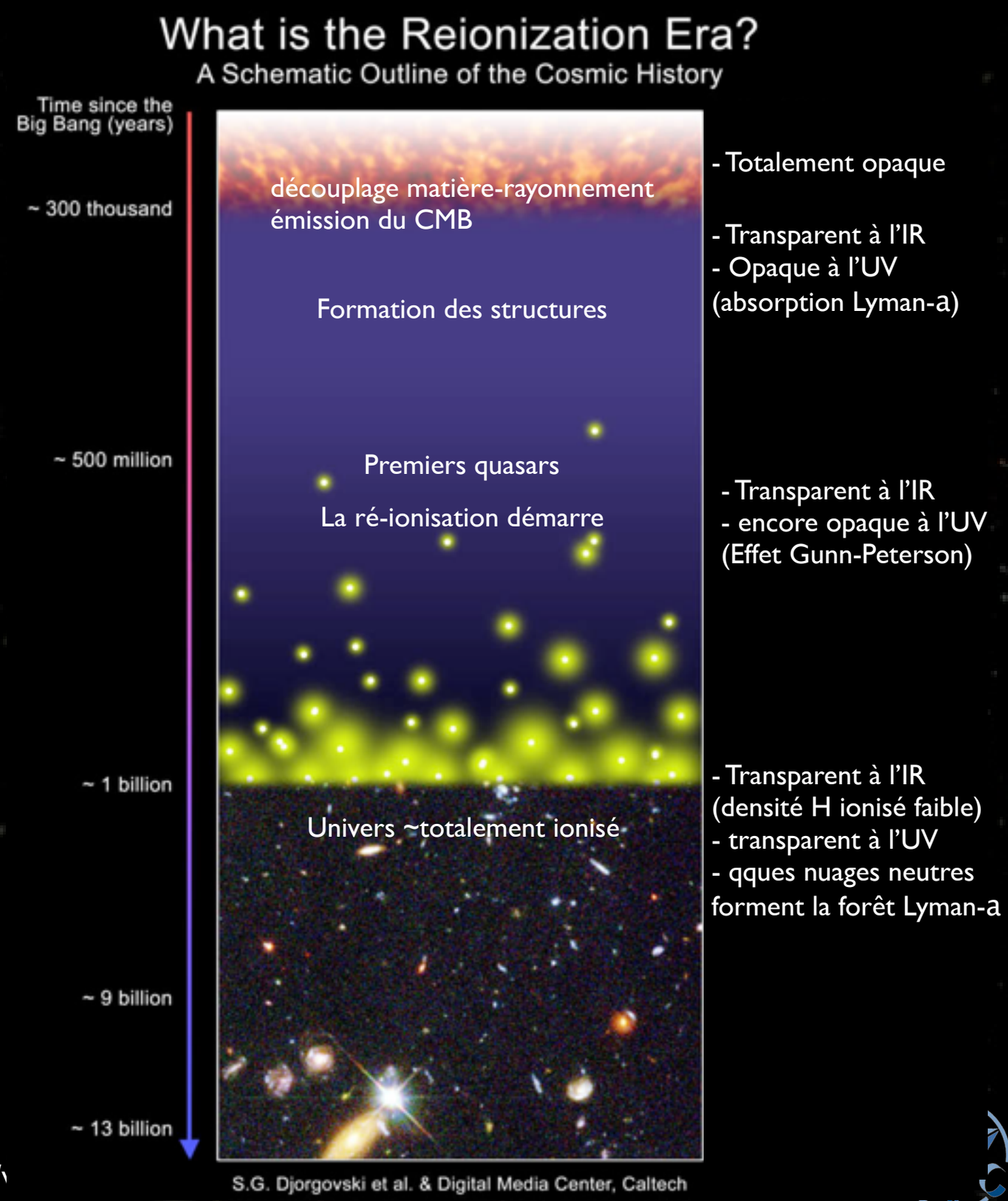


Fig: M. Lemoine

http://www.apc.univ-paris7.fr/~hami CHweb/Cosmologie_Moderne.html

Ré-ionisation

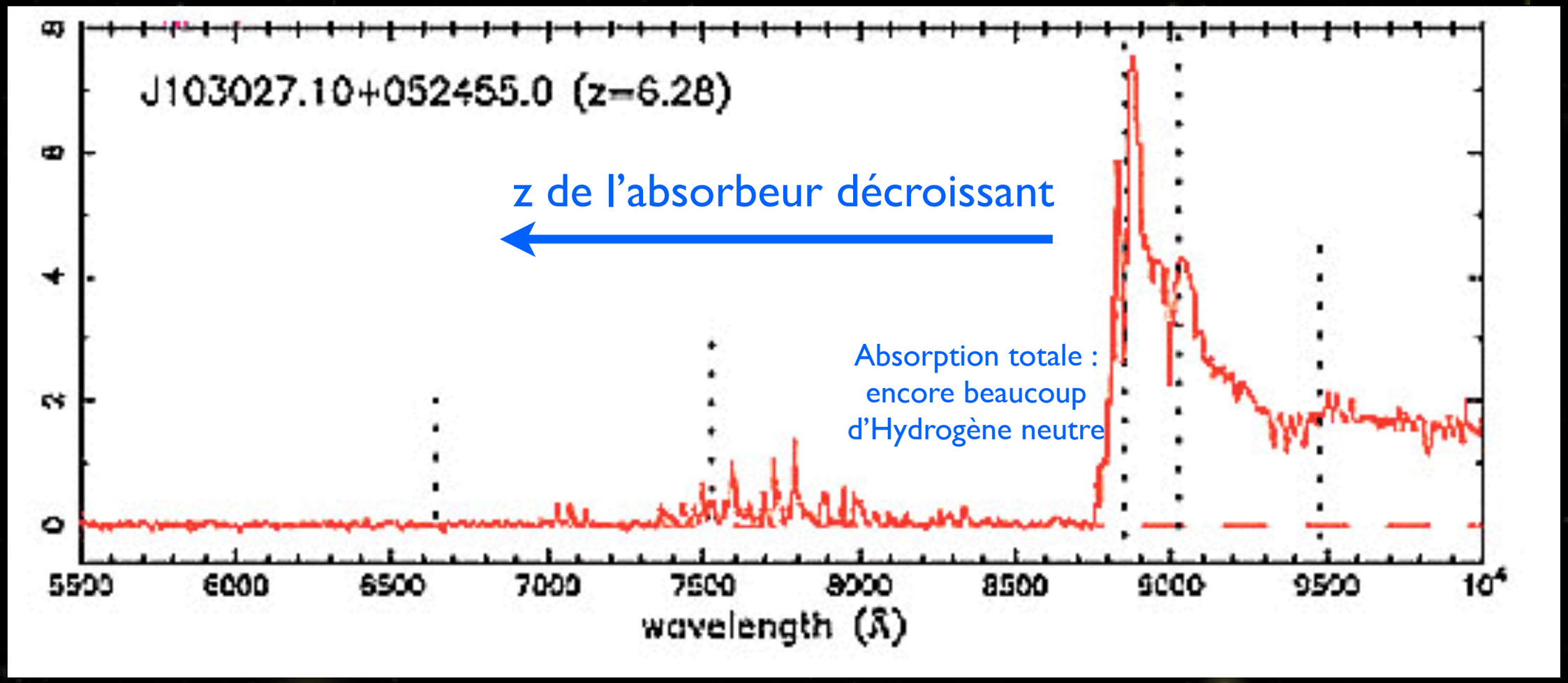
- Ages sombres 1000>z>15:
  - ★ CMB + 21cm (IR et radio)
  - ★ La raie d'absorption de l'hydrogène neutre (1215 Å - Lyman-a) absorbe tout rayonnement UV.
- Vers z~15 : premiers quasars
  - ★ Formés par effondrement
  - ★ Emission intense en UV
    - totalement absorbée par la raie Lyman-a (effet Gunn-Peterson)



http://

Effet Gunn-Peterson

- Spectre de quasar de découverte de l'effet (Becker et al. 2001)



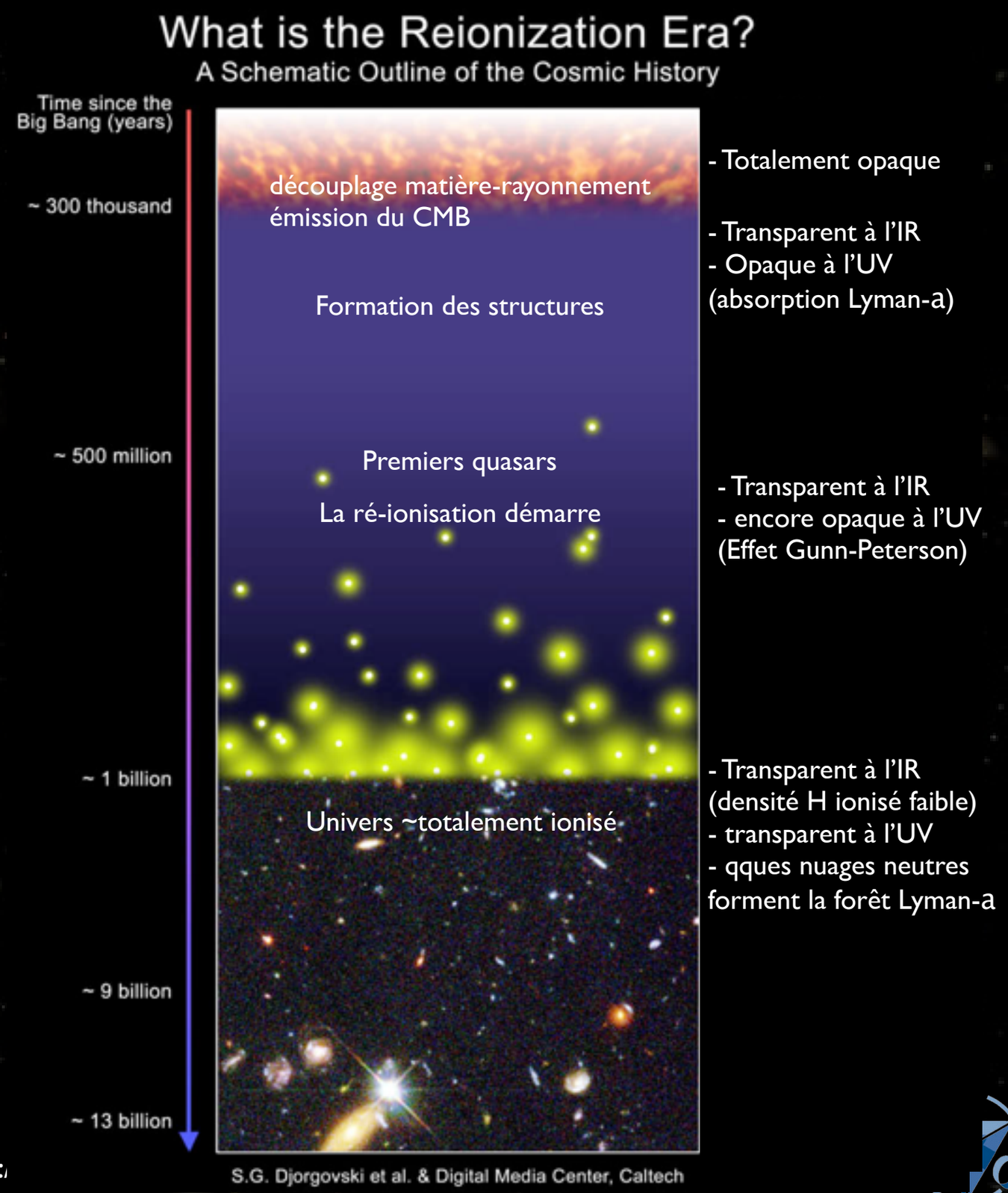
Raie Lyman-a
1215x(1+z)=8820

Intérêt des Quasars :

À part quelques raies en émission, le spectre (UV) est essentiellement continu. Tous les accidents sont donc des raies en absorption de Lyman-a le long du trajet de la lumière.

Ré-ionisation

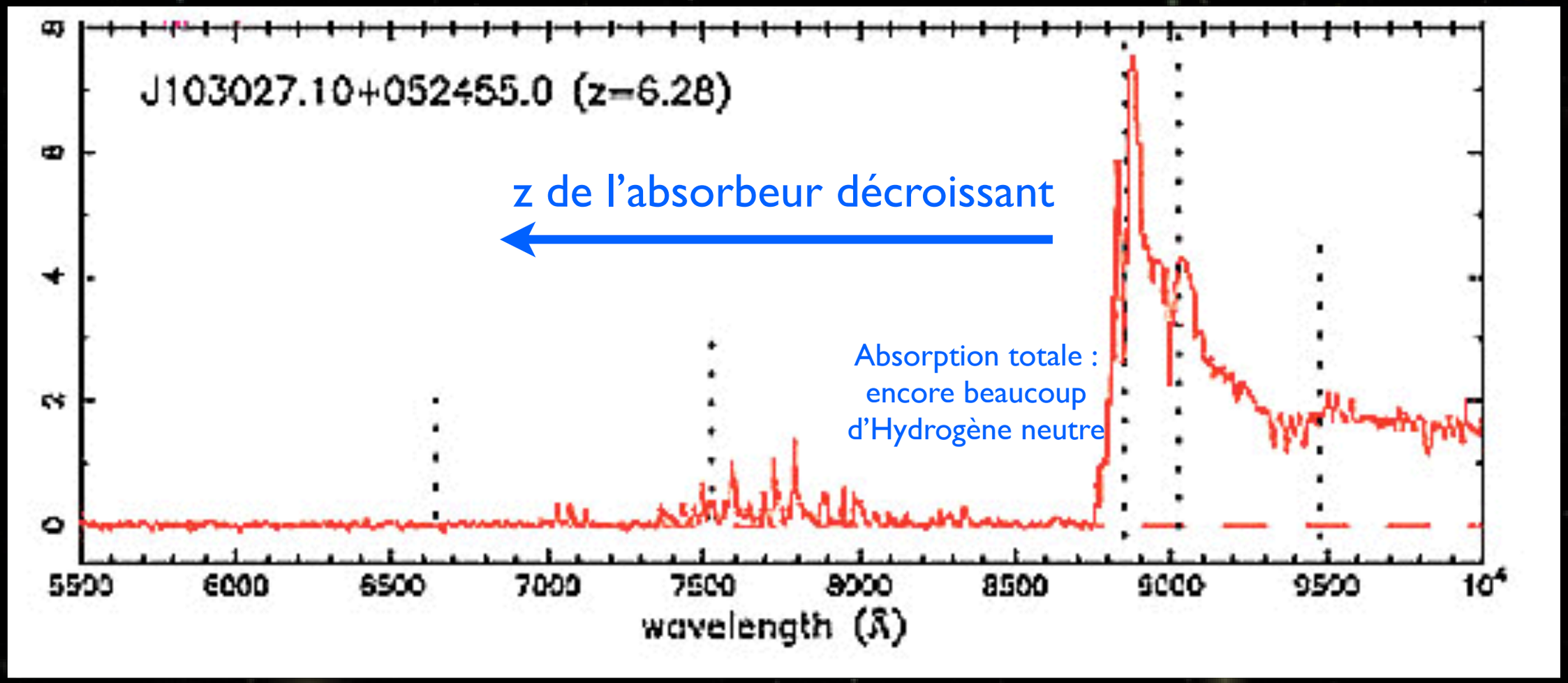
- Ages sombres 1000>z>15:
  - ★ CMB + 21cm (IR et radio)
  - ★ La raie d'absorption de l'hydrogène neutre (1215 Å - Lyman-a) absorberait tout rayonnement UV.
- Vers z~15 : premiers quasars
  - ★ Formés par effondrement
  - ★ Emission intense en UV
    - totalement absorbée par la raie Lyman-a (effet Gunn-Peterson)
  - ★ Ionisation de l'hydrogène neutre environnant
    - l'hydrogène ionisé est devenu peu dense et est transparent à l'IR
    - Plus assez de H neutre: l'UV passe



http:

Effet Gunn-Peterson

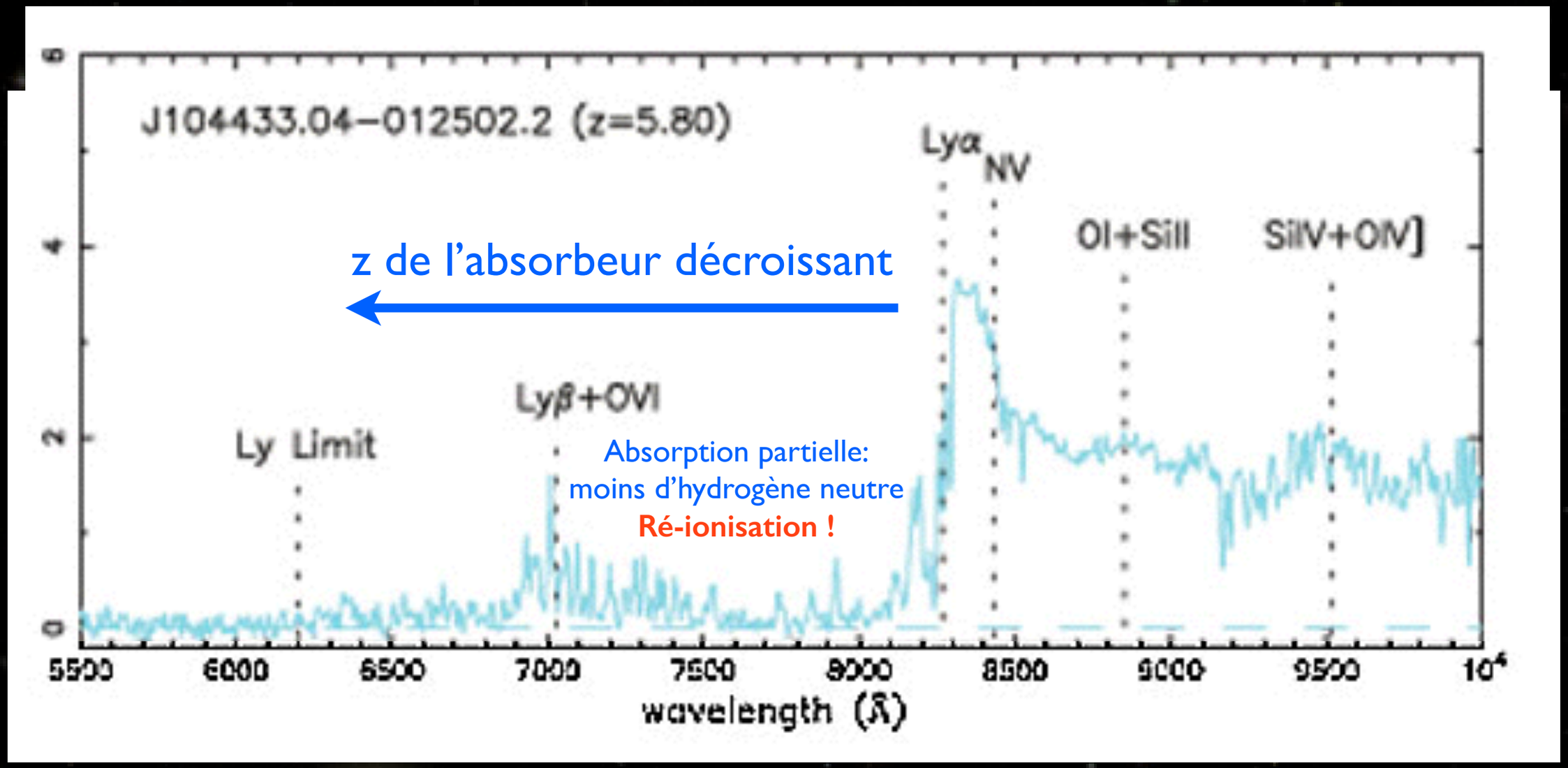
- Spectre de découverte de l'effet (Becker et al. 2001)



Raie Lyman-a
1215x(1+z)=8820

Effet Gunn-Peterson

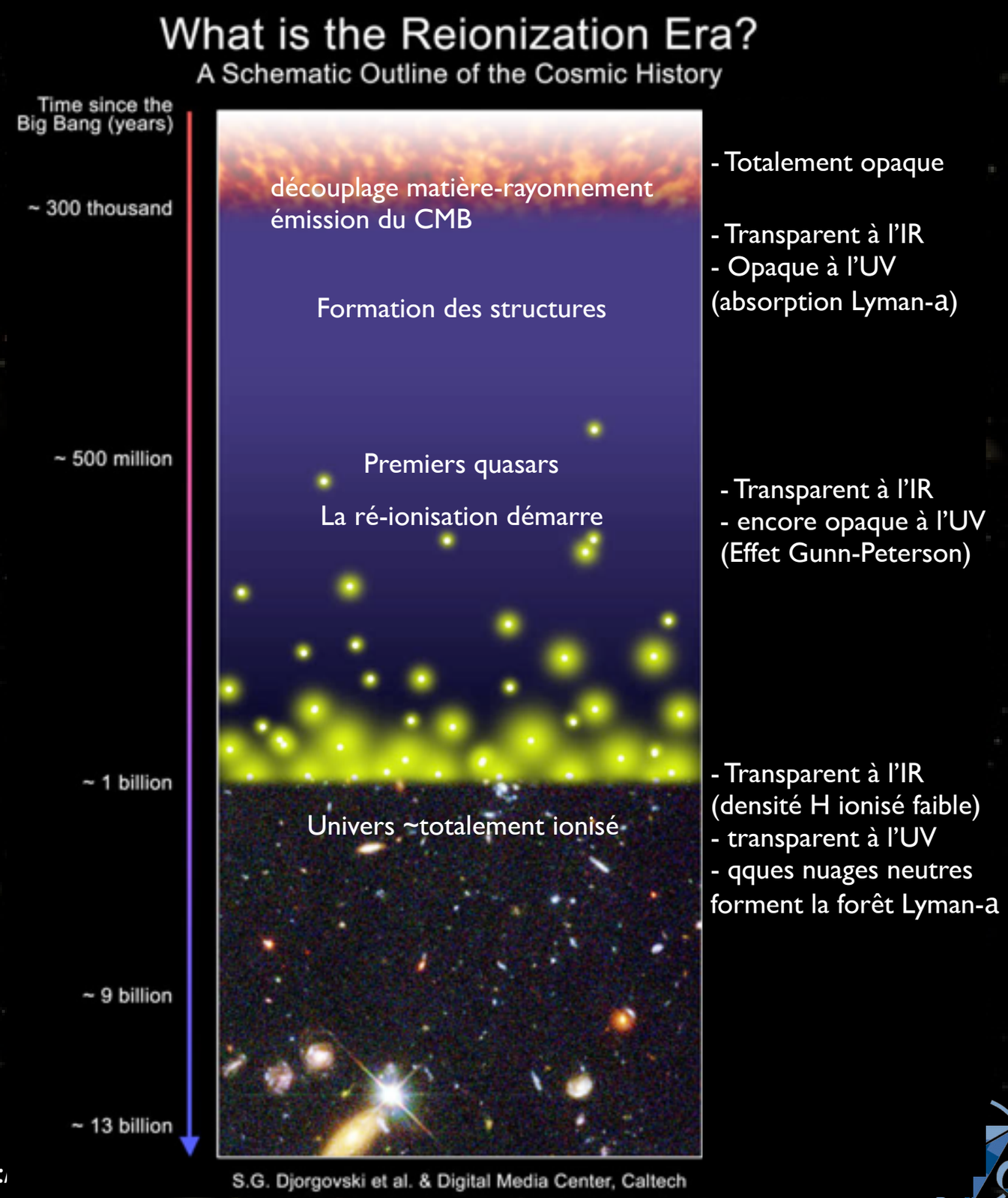
- Absorption partielle dans un quasar plus proche



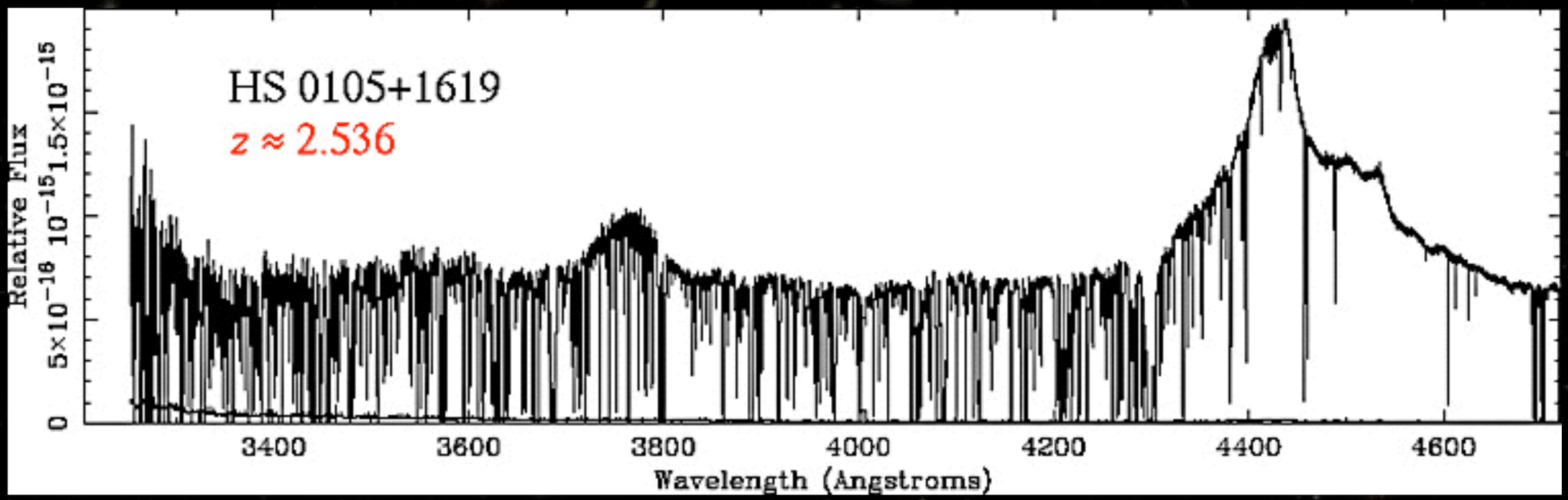
↑
Raie Lyman-a
1215x(1+z)=8260

Ré-ionisation

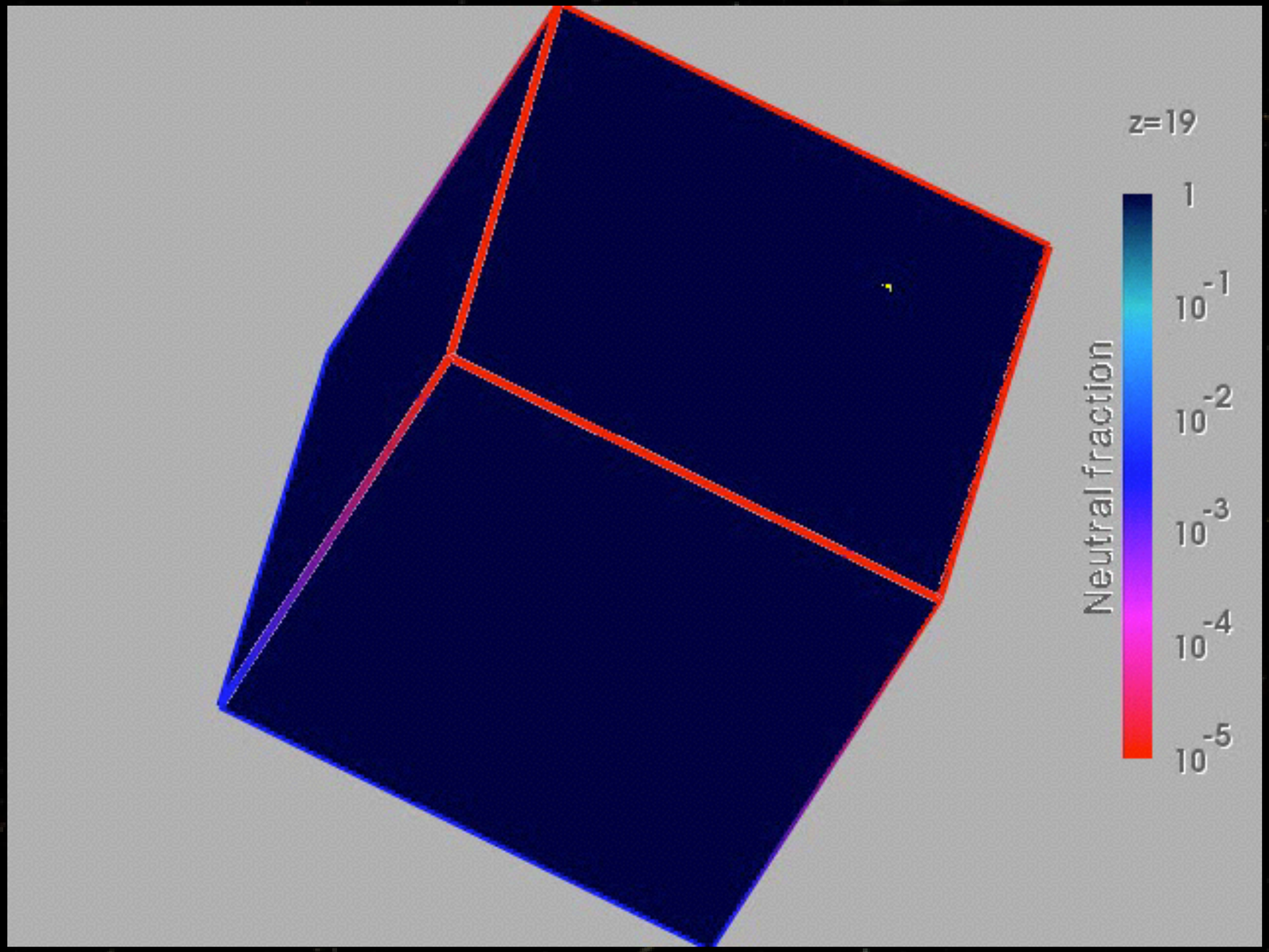
- Ages sombres 1000>z>15:
  - ★ CMB + 21cm (IR et radio)
  - ★ La raie d'absorption de l'hydrogène neutre (1215 Å - Lyman-a) absorberait tout rayonnement UV.
- Vers z~15 : premiers quasars
  - ★ Formés par effondrement
  - ★ Emission intense en UV
    - totalement absorbée par la raie Lyman-a (effet Gunn-Peterson)
  - ★ Ionisation de l'hydrogène neutre environnant
    - l'hydrogène ionisé est devenu peu dense et est transparent à l'IR
    - Plus assez de H neutre: l'UV passe
  - ★ à z=6 la re-ionisation est complète
    - le peu d'hydrogène neutre restant absorbe par raies la lumière des quasars: apparition de la forêt Lyman-a



Forêt Lyman-a



Simulation de percolation de la réionisation



N. Gnedin

Petite Histoire de l'Univers

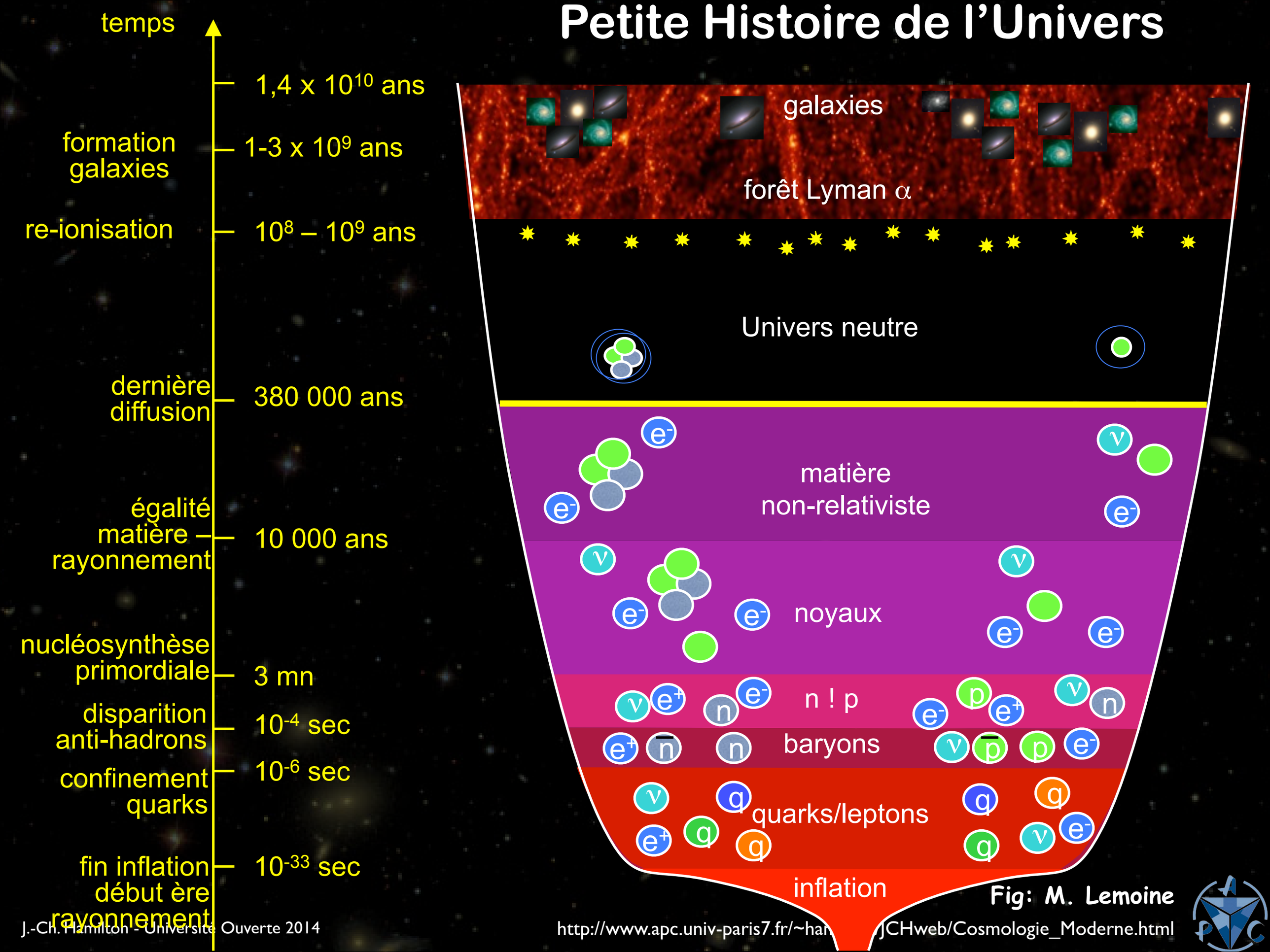
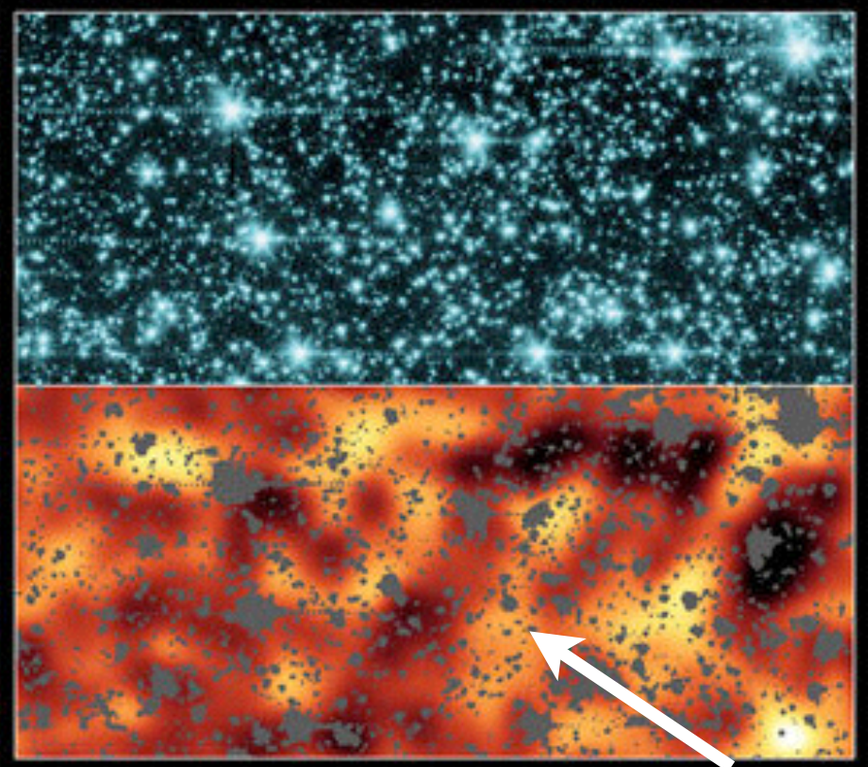


Fig: M. Lemoine

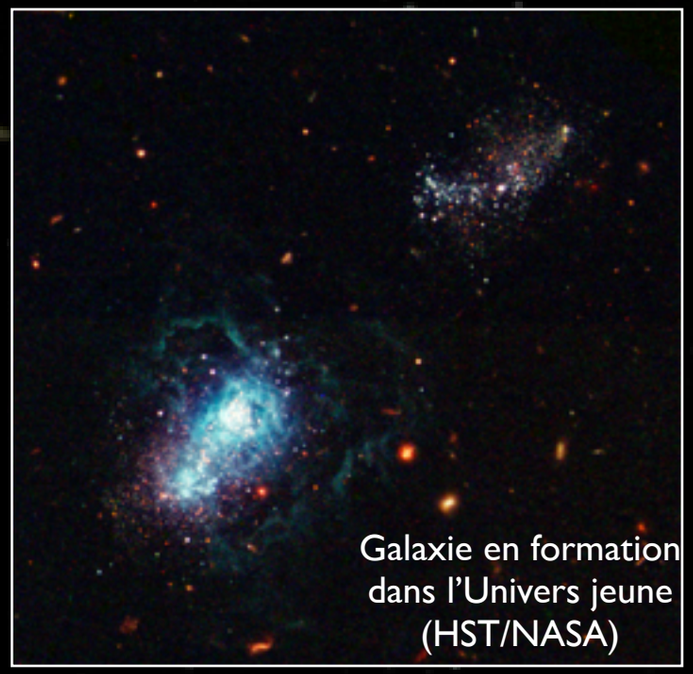
Étoiles, galaxies, supernovae ... nous ...

- Étoiles de population III
  - ★ Sans éléments lourds (uniquement ce qu'a produit BBN)
  - ★ Très massives ~ 100 $M_\odot$?
  - ★ Encore très mal comprises ...
    - le fonctionnement des étoiles nécessite le cycle CNO, impossible avec les pop. III
  - ★ Traces ?
    - galaxies faibles bleues ?
    - Fond diffus IR de Spitzer ?



Spitzer (NASA) Pop. III ?

- Galaxies
  - ★ Formation des galaxies ~ entre 10 Gyr et aujourd'hui (pas encore terminée)
- Supernovae, étoiles de population II et I
  - ★ Enrichissement en éléments lourds
  - ★ Formation du système solaire ~ 8 Gyr



Galaxie en formation dans l'Univers jeune (HST/NASA)

Plan du cours

- Vue d'ensemble de la cosmologie
  - ★ Échelles
  - ★ Les pilliers de la cosmologie
  - ★ L'Univers de Friedman-Lemaître
  - ★ Histoire thermique de l'Univers
- La cosmologie observationnelle aujourd'hui
  - ★ Distances en cosmologie
  - ★ La formation des structures
  - ★ Tests cosmologiques (SNIa, CMB et les autres...)
  - ★ Arguments pour la matière et l'énergie noires
- Le futur de la cosmologie
  - ★ L'inflation
  - ★ Univers primordial
  - ★ Multivers ?

Plan du cours

- Vue d'ensemble de la cosmologie
  - ★ Échelles
  - ★ Les pilliers de la cosmologie
  - ★ L'Univers de Friedman-Lemaître
  - ★ Histoire thermique de l'Univers

- La cosmologie observationnelle aujourd'hui
  - ★ Distances en cosmologie
  - ★ La formation des structures
  - ★ Tests cosmologiques (SNIa, CMB et les autres...)
  - ★ Arguments pour la matière et l'énergie noires

- Le futur de la cosmologie
  - ★ L'inflation
  - ★ Univers primordial
  - ★ Multivers ?

Rappels sur le taux d'expansion

- Équation de Friedman: $$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H_0^2\left(\frac{\rho}{\rho_c} + \frac{k}{a^2 H_0^2} + \frac{\Lambda}{3H^2}\right) = H_0^2\left(\Omega_m + \Omega_k + \Omega_\Lambda\right)$$

  - ★ Rayonnement: $\Longrightarrow \Omega_{\rm R} = \Omega_{\rm R}^0 (1+z)^4$
  - ★ Matière: $\Longrightarrow \Omega_{\rm NR} = \Omega_{\rm NR}^0 (1+z)^3$
  - ★ Énergie sombre: $\Omega_X(z) = \Omega_X \times \exp\left(3\int_0^z \frac{1+w(z')}{1+z'}\mathrm{d}z'\right)$
  - ★ Courbure: $\Longrightarrow \Omega_k = \Omega_k^0 (1+z)^2$

$$H(z) = H_0\sqrt{\Omega_k^0 \times (1+z)^2 + \Omega_m^0 \times (1+z)^3 + \Omega_X(z)}$$

$$\Omega_k^0 = 1 - \Omega_m^0 - \Omega_X^0$$

Distances(s)

- «Distance» est un terme vague en cosmologie
  - ★ L'Univers est en expansion **pendant** le trajet des photons

$$\mathrm{d}s^2 = 0 = \mathrm{d}t^2 - a^2 \frac{\mathrm{d}r^2}{1 - kr^2}$$

  - Différence de coordonnées:

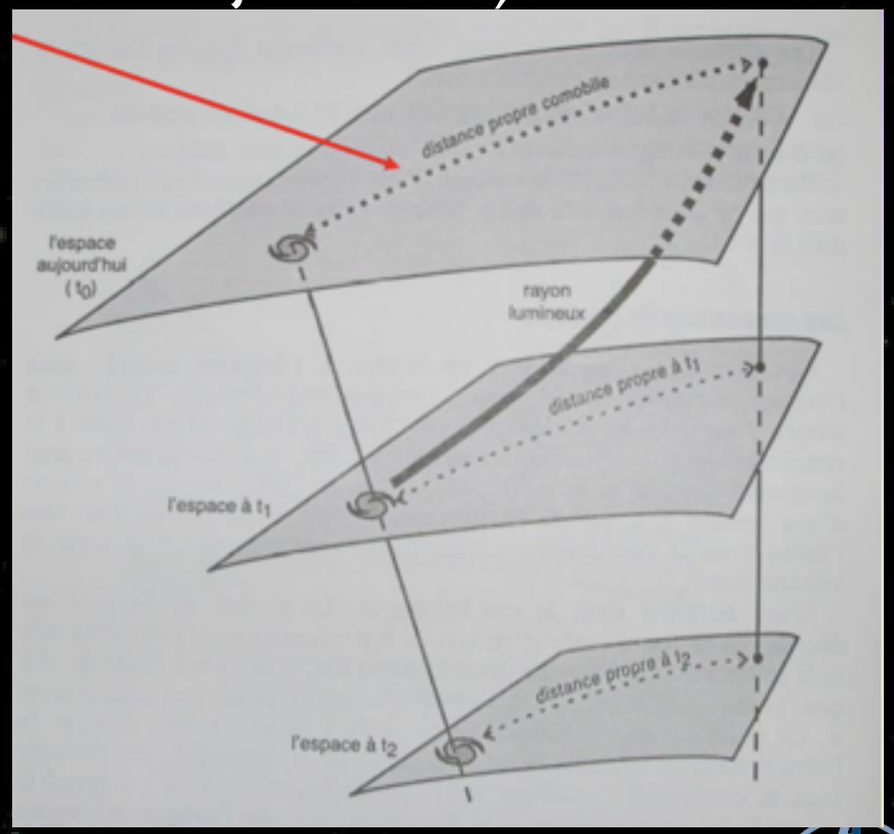
$$r(z) = \int_0^r \frac{\mathrm{d}r}{\sqrt{1 - kr'^2}} \quad = \int_t^{t_0} \frac{\mathrm{d}t'}{a(t')} \quad = \frac{1}{a_0} \int \frac{\mathrm{d}z'}{H(z')}$$

  - ★ **Distance propre ou comobile** (en unité de distance aujourd'hui):

$$D_p(z) = a_0 r(z) = \int_0^z \frac{\mathrm{d}z'}{H(z')}$$

➡ Distance «instantanée» d'un objet au redshift z

➡ Notion abstraite, *non observationnelle*



Tiré du cours de M2 de Y. Mellier

  - ★ **Distance de temps de vol**

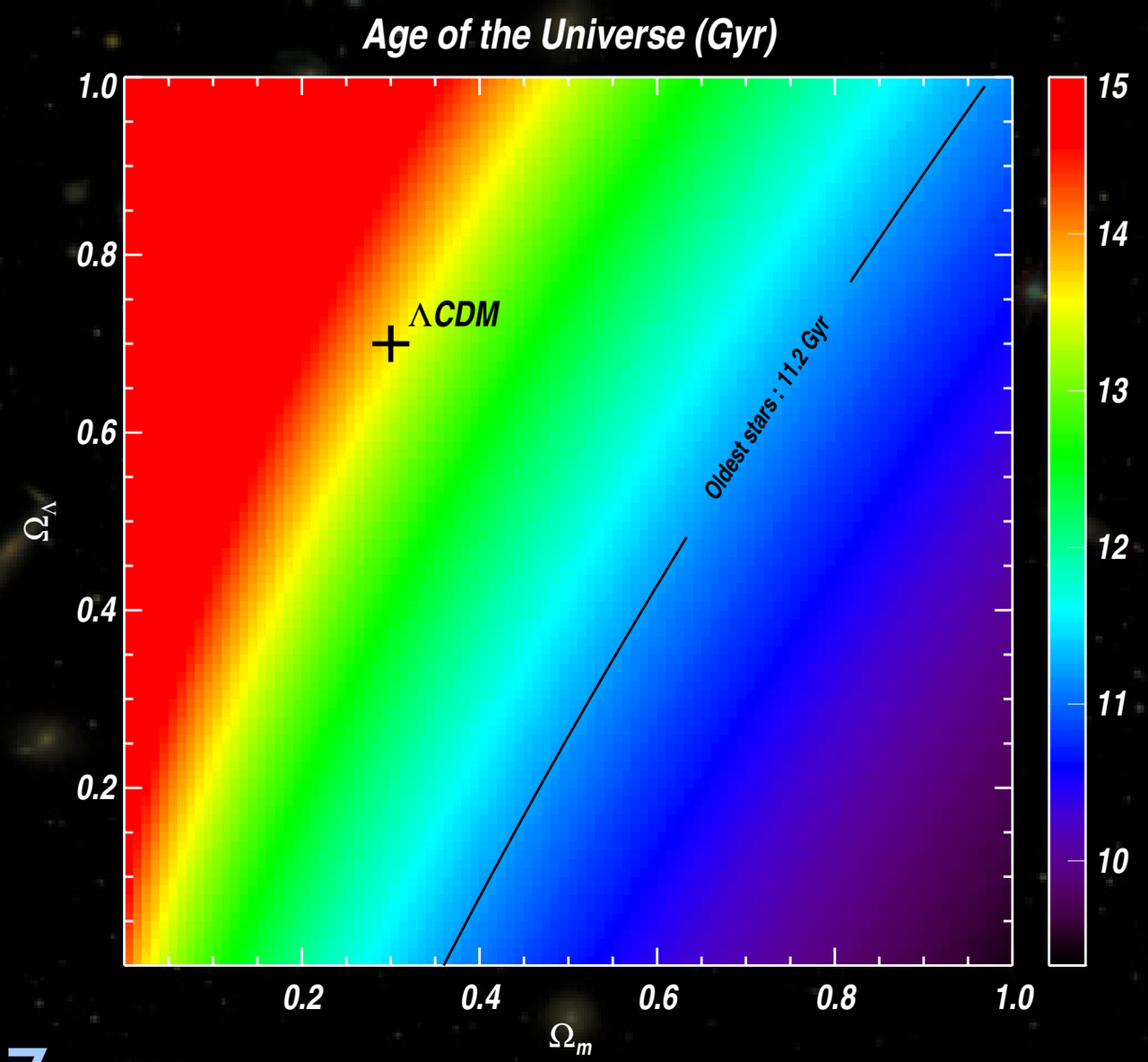
$$t(z) = \int_t^{t_0} \mathrm{d}t' \quad = \int \frac{\mathrm{d}z'}{(1 + z')H(z')}$$

➡ donnée par le temps écoulé depuis l'émission

➡ âge de l'Univers pour z infini

Âge de l'Univers

- les plus anciennes étoiles (dans les amas globulaires)
  - ★ age > 11.2 Gyr (95% C.L.) [Krauss & Chaboyer, 2003]
- Temps depuis le Big-Bang fonction des paramètres cosmologique en LCDM
  - ★ in open W_m=0.3 : 11.3 Gyr
  - ★ in flat W_m=1 : 9.2 Gyr
  - ★ in LCDM : 13.7 Gyr

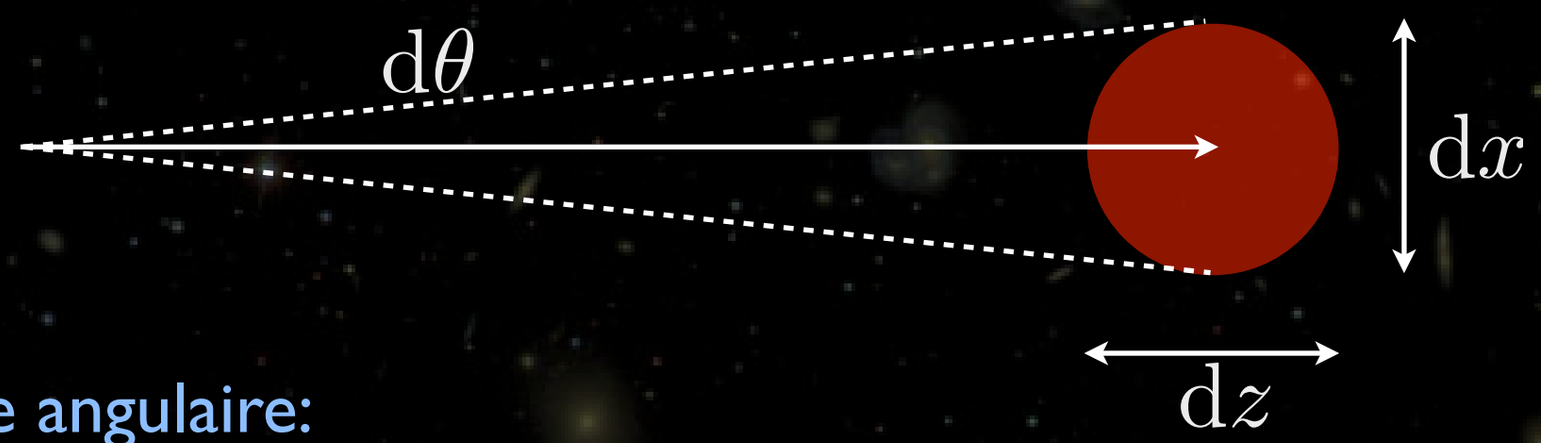


- Mais: SDSS J102915+172927
  - ★ Ridiculement peu de métaux, pas de Li, age~13 Gyr?

$$t(z) = \int_t^{t_0} \mathrm{d}t' \quad = \int \frac{\mathrm{d}z'}{(1+z')H(z')}$$

Distance(s)

- Supposons une sphère de diamètre dx au redshift z



★ Distance angulaire:

$$\mathrm{FLRW} \rightarrow \mathrm{d}s^2 = a^2(t) r^2 \mathrm{d}\theta^2 \qquad \Rightarrow \mathrm{d}x = a(t) r \mathrm{d}\theta = \frac{a_0 r}{1+z}\mathrm{d}\theta$$

$$D_a(z) = D_p(z)/(1+z)$$

➡ lorsqu'un objet distant a émis son rayonnement il était beaucoup plus proche de nous. Il apparaît donc avec un diamètre angulaire plus important que ce que sa distance propre laisserait croire, donc semble plus proche.

★ Épaisseur en redshift:

$$\mathrm{d}z = a_0 \frac{\mathrm{d}a}{a^2} = \frac{a_0 \dot{a}}{a^2}\mathrm{d}t = (1+z)H(z)\mathrm{d}x$$

Distance(s)

★ Comptage en redshift:

$$\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}V} = n(z) = n_0(1+z)^3$$

or $$\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}z} = \frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}V}\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}z}$$ et $$\mathrm{d}V = D_a(z)^2 \mathrm{d}\Omega \mathrm{d}x$$

donc $$\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}z\mathrm{d}\Omega} = n_0 \frac{D_p(z)^2}{H(z)}$$

Tangentiel (2D)

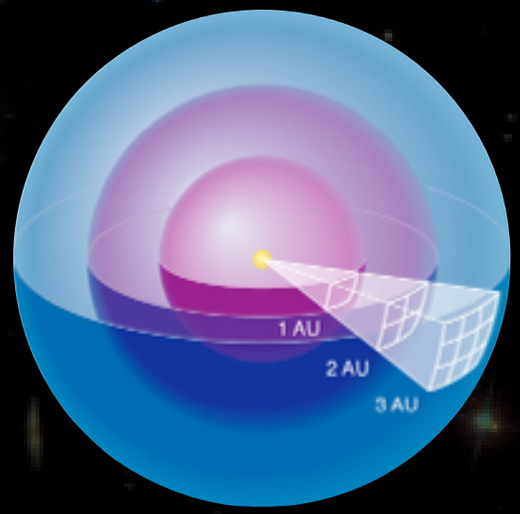
Radial

★ Important : comportement différent vis à vis des paramètres cosmologiques de :

$$H(z)$$ et $$D_p(z) = \int_0^z \frac{\mathrm{d}z'}{H(z')}$$

Distance(s)

- Supposons une source au redshift z



★ Flux observé:

$$\phi_{\rm obs} = \frac{\left.\frac{\delta E}{\delta t}\right|_{\rm obs}}{4\pi D_p^2(z)} = \frac{\frac{\delta E_{\rm em}/(1+z)}{\delta t_{\rm em}\times(1+z)}}{4\pi D_p^2(z)} = \frac{L_{\rm em}}{4\pi D_p^2(z)(1+z)^2}$$

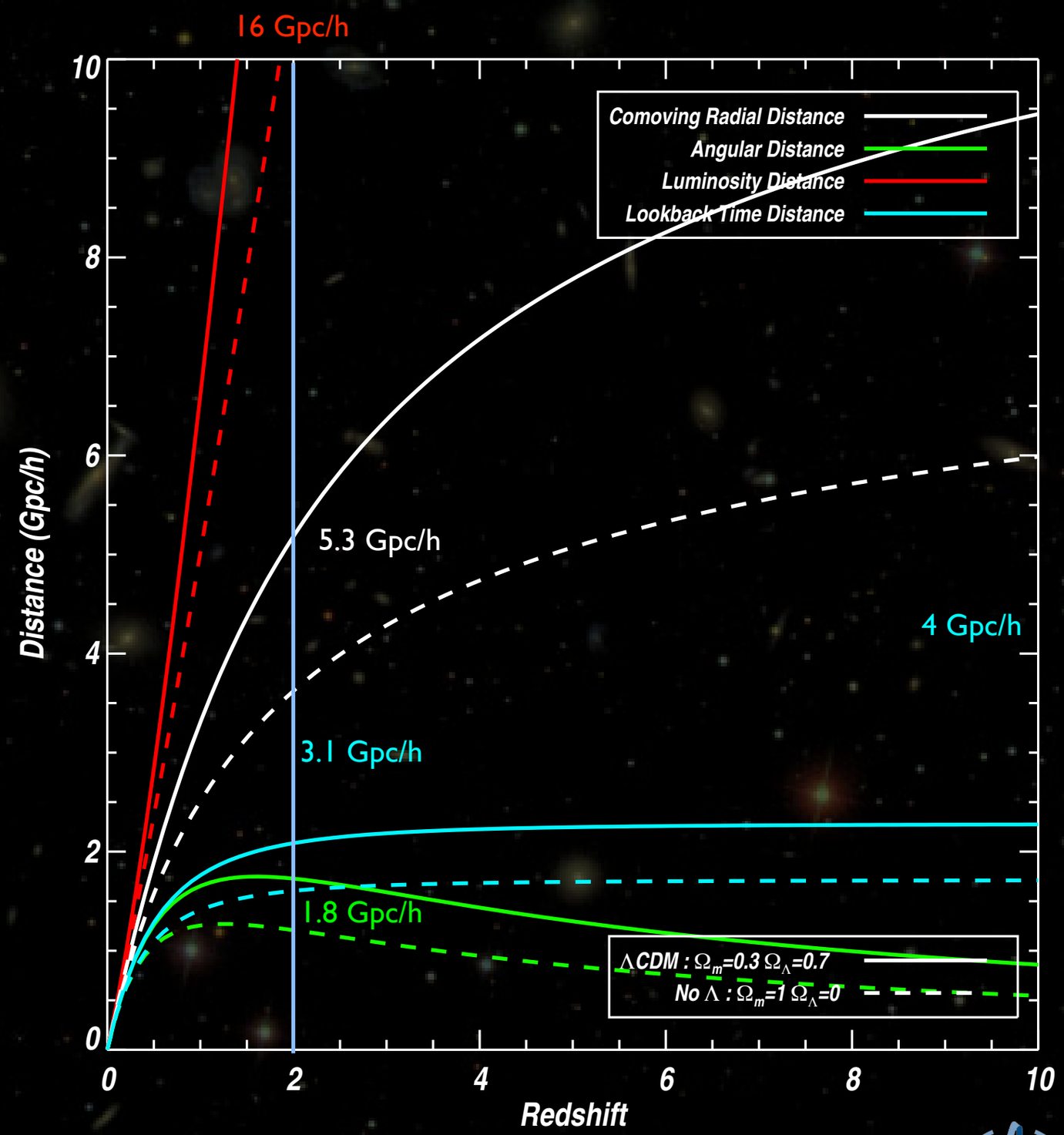
★ Distance de luminosité:

$$D_l(z) = D_p(z) \times (1+z)$$

➡ La luminosité apparente des objets distants est amoindrie par le décalage vers le rouge des photons et le ralentissement des horloges. Ils semblent donc plus lointains que ce que la distance propre laisse croire.

Distance(s) : fct de la cosmologie

- Comme prévu:
  - ★ Da = Dp = Dl = Dt pour z petit
  - ★ Da < Dp < Dl
- Une galaxie à z=2:
  - ★ est à une **distance comobile** de **5.3 Gpc/h**
  - ★ a le **diamètre angulaire** de la même galaxie située à **1.8 Gpc/h**
  - ★ a la **luminosité apparente** de la même galaxie située à **16 Gpc**
  - ★ a **émis ses photons il y a** 3.1 Gpc x 3.26 ~ **10.1 Gyr**
- Âge de l'Univers:
  - ★ **total**: 4 Gpc x 3.26 ~ **13 Gyr**
- Énergie noire:
  - ★ dans un Univers avec énergie noire, tout semble plus lointain à cause de l'accélération de l'expansion



Brillance de surface

- Comment évolue la brillance de surface en fct de z?

★ diamètre angulaire: $\theta \propto D_a(z)^{-1}$
★ Surface angulaire (angle solide): $\theta^2 \propto D_a(z)^{-2}$

★ Flux de photons: $\phi \propto D_L(z)^2$

★ Brillance de surface:

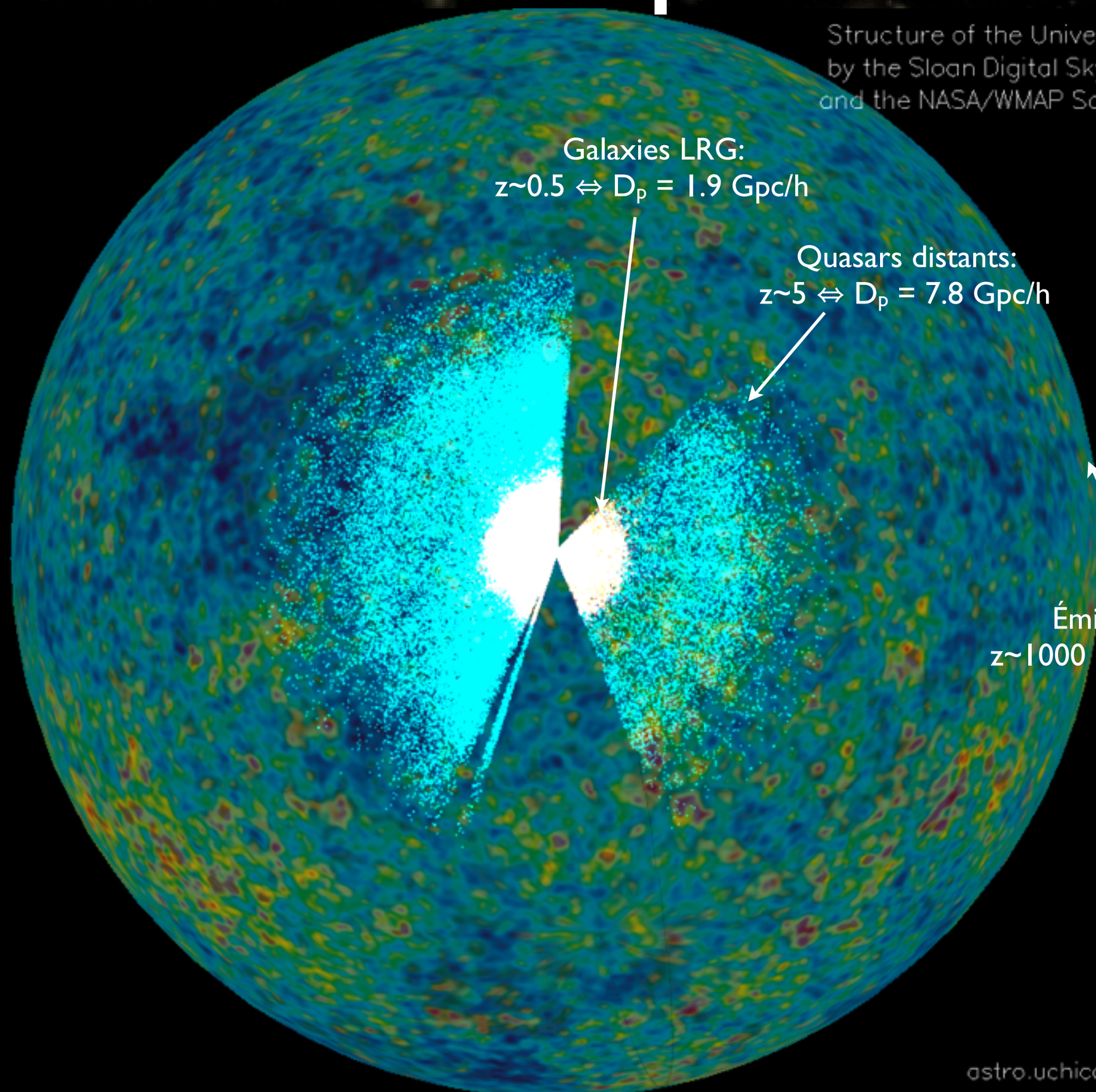
$$\begin{aligned} B &\propto \phi/\theta^2 \\ &\propto D_a(z)^2/D_l(z)^2 \end{aligned}$$

$$\text{or } D_l(z) = (1+z) \times D_a(z)$$

$$\text{donc } B \propto (1+z)^{-4}$$

★ Les galaxies à grand redshift sont donc très difficiles à détecter
★ En plus, nous avons considéré ici des quantités «bolométriques» (intégrées sur tout le spectre EM). En pratique les bandes d'observation sont décalées (K-Corrections)

Exemple


Structure of the Universe as found
by the Sloan Digital Sky Survey
and the NASA/WMAP Science Team
Galaxies LRG:
z~0.5 ⇔ D_p = 1.9 Gpc/h
Quasars distants:
z~5 ⇔ D_p = 7.8 Gpc/h
Émission du CMB:
z~1000 ⇔ D_p = 13.6 Gpc/h
astro.uchicago.edu/cosmus