

ÉCOLE DOCTORALE 182
Observatoire Astronomique de Strasbourg

THÈSE présentée par :

Nicolas Deparis

soutenue le : XX Décembre 2017

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université de Strasbourg**

Discipline/ Spécialité : Astrophysique

TITRE de la thèse
[Sous titre éventuel]

THÈSE dirigée par :

[Civilité NOM Prénom]

Titre, université de Strasbourg

RAPPORTEURS :

[Civilité NOM Prénom]

Titre, établissement

[Civilité NOM Prénom]

Titre, établissement

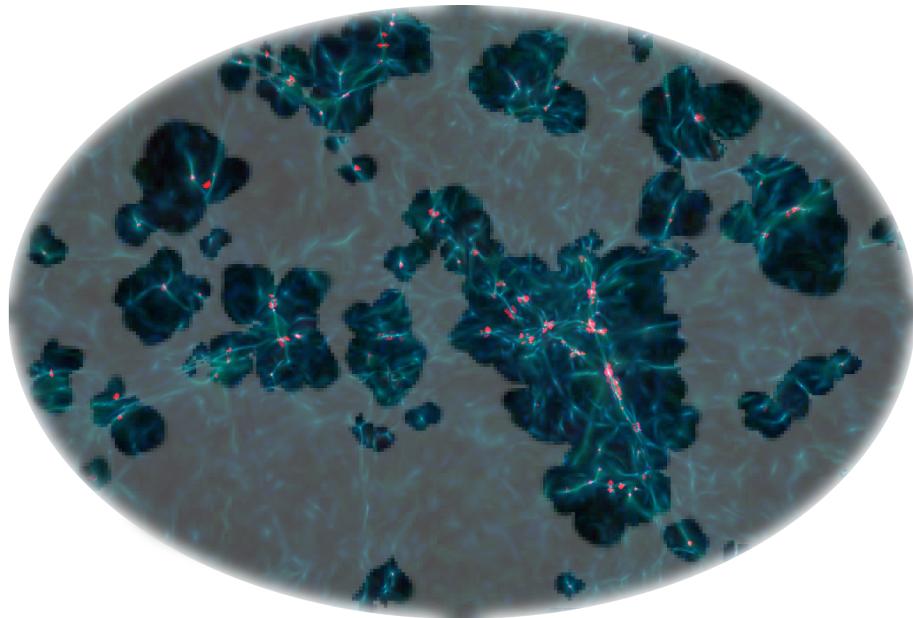
AUTRES MEMBRES DU JURY :

[Civilité NOM Prénom]

Titre, établissement

SIMULER L'ÉPOQUE DE REIONIZATION

NICOLAS DEPARIS



Application au groupe local
Decembre 2017 – version 4.2

Nicolas Deparis : *Simuler l'époque de reionization, Application au groupe local*, © Decembre 2017

Ohana means family.
Family means nobody gets left behind, or forgotten.
— Lilo & Stitch

Dedicated to the loving memory of Rudolf Miede.

1939 – 2005

RÉSUMÉ

C'est ici qu'il va falloir mettre le resumé

ABSTRACT

The abstract goes here

ACKNOWLEDGMENTS

Put your acknowledgments here.

Many thanks to everybody who already sent me a postcard !

Regarding the typography and other help, many thanks go to Marco Kuhlmann, Philipp Lehman, Lothar Schlesier, Jim Young, Lorenzo Pantieri and Enrico Gregorio¹, Jörg Sommer, Joachim Köstler, Daniel Gottschlag, Denis Aydin, Paride Legovini, Steffen Prochnow, Nicolas Repp, Hinrich Harms, Roland Winkler, Jörg Weber, Henri Menke, Claus Lahiri, Clemens Niederberger, Stefano Bragaglia, Jörn Hees, and the whole L^AT_EX-community for support, ideas and some great software.

Regarding LyX : The LyX port was intially done by *Nicholas Mariette* in March 2009 and continued by *Ivo Pletikosić* in 2011. Thank you very much for your work and for the contributions to the original style.

¹ Members of GuIT (Gruppo Italiano Utilizzatori di T_EX e L^AT_EX)

TABLE DES MATIÈRES

I CONTEXTE	1
1 INTRODUCTION AU MODÈLE PHYSIQUE	3
1.1 Les piliers	3
1.2 observation -> Hubble	3
1.3 théorie - lCDM	4
1.4 Le CMB	4
1.4.1 Observations	4
1.4.2 Théorie	4
1.4.3 Température	4
1.4.4 Spectre de puissance	5
1.5 Le contenu de l'univers - (Théorie)	6
1.5.1 Energie noire	7
1.5.2 Matière noire	7
1.5.3 Baryon	7
1.5.4 Radiation	7
1.5.5 bilan	7
1.6 Observation -> la reionization	8
1.7 Théorie -> La reionization	8
1.7.1 les principales question en suspend de l'étude de la réionisation	8
2 INTRODUCTION AU MODÈLE NUMÉRIQUE	11
2.1 Les différents types de codes	11
2.2 Gestion de la grille	11
2.3 Energie noire	11
2.3.1 Système d'unités supercomobiles	11
2.4 Matière noire	11
2.4.1 génération des conditions initiales	11
2.4.2 Théorie des perturbation linéaire	12
2.4.3 solveur de gravité	12
2.5 Baryon	12
2.6 La chimie	12
2.7 radiation	12
2.8 gestion du pas de temps	12
2.9 Matériel et parallélisme	12
2.9.1 Les machines utilisées	12
2.9.2 Gestion des entrées sortie	13
2.9.3 Potentiel d'optimisation EMMA	13
II LES ÉTOILES	15
3 LES ETOILES	17
3.1 La formation stellaire	17
3.2 La vie radiative	17

3.3 le problème de la masse des étoiles	17
3.4 Les supernovae	17
III LES CARTES DE REIONIZATIONS	19
BIBLIOGRAPHIE	21

TABLE DES FIGURES

FIGURE 1	Hubble law. Image ESO	4
FIGURE 2	Hubble Ultra Deep Field 2014. Image NASA	5
FIGURE 3	Spectre thermique du CMB vue par le satellite Cosmic Background Explorer (COBE). Image Wikipédia	6
FIGURE 4	Les fluctuation du CMB vues par le satellite Planck. Image ESA	6
FIGURE 5	représentation des $Y(\theta, \phi)_{lm}$ Pierre Brassard, université de Montréal Image Wikipédia	7
FIGURE 6	Spectre de puissance des fluctuation du CMB. Image ESA	8
FIGURE 7	Determination des paramètres cosmologiques par la collaboration Planck.	9
FIGURE 8	Spectre de quasar à différents redshift présentant un tunnel gun peterson. Image fan et al.	10

LISTE DES TABLEAUX

LISTINGS

ACRONYMS

Première partie

CONTEXTE

INTRODUCTION AU MODÈLE PHYSIQUE

LES PILIERS

L'intégralité de l'astrophysique repose sur 3 piliers :

1. L'observation
2. La théorie
3. La simulation

lien avec la méthode scientifique de manière générale. observation, modélisation et test de la théorie or en astro on ne peut pas tester directement donc on simule.

L'observation est le premier de ces pilier. Il est le plus ancien et celui sur lequel repose le plus de poids. L'Homme a toujours regardé le ciel. De plus il est commun a toute les disciplines scientifique. Il n'est pas de science possible sans observation. La principale difficulté ici, est que le point de vue que nous avons sur l'Univers est unique. Il nous est impossible de le regarder sous un autre angle.

Vient ensuite la théorie. Lorsque l'on voit ces lumière sur la voute celeste, nous sommes obligé de nous poser la question essentielle de leur provenance. Cette question mène a l'élaboration de diverse formulation tentant d'expliquer comment (et pourquoi) le ciel s'illumine la nuit. Dans le cadre de l'étude de l'univers dans sont ensemble, cette théorie est nommée cosmologie et repose sur des concept mathématiques complexes Il nous est impossible de d'effectuer des expériences sur l'univers, notre porté d'interaction est bien trop réduite.

Enfin, le dernier pilier : la simulation. Pilier le plus récent il est sensé palier au problème des deux autres : l'impossibilité de changer de point de vue ou de tester les théories élaborées. Ici sous entendue la simulation numérique, il est beaucoup plus récente et dépend grandement de la technologie. C'est celui vers lequel j'ai choisis de me diriger.

OBSERVATION -> HUBBLE

découverte des galaxies
découverte de l'expansion de l'univers

$$V = H_0 D \quad (1)$$

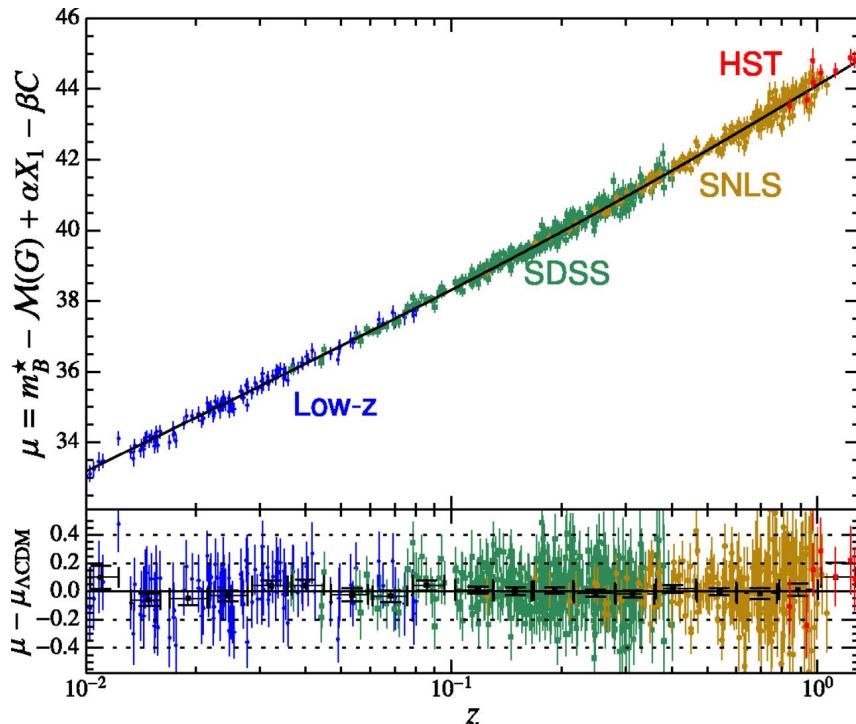


FIGURE 1 : Hubble law. Image ESO

THÉORIE - LCDM

- le big bang
- l'inflation
- la nucléosynthèse
- le CMB
- la reionization

LE CMB

Observations

Penzias et Willson

Théorie

surface de dernière diffusion

Température

Le cosmic Microwawe background se présente sous la forme du corps noir le plus parfait connus. Fig. 3 T=2.73K

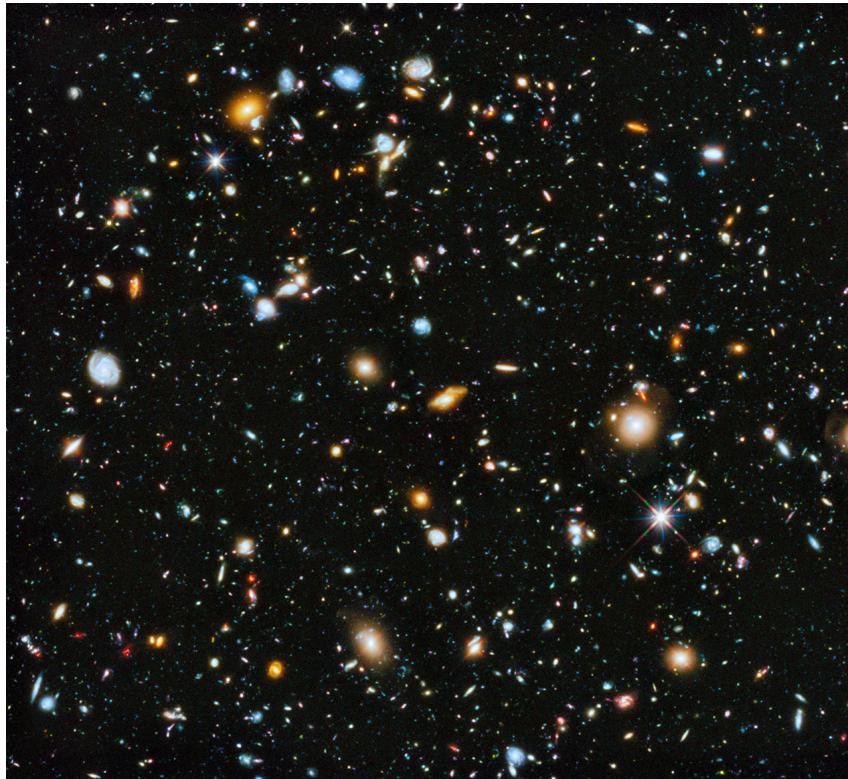


FIGURE 2 : Hubble Ultra Deep Field 2014. Image NASA

Spectre de puissance

Le CMB n'est pas uniforme, il présente de très faibles fluctuations (10^{-5}) qui nous renseigne sur l'état de l'univers au moment de son émission. Fig. 6

En décomposant ces fluctuations en harmoniques sphériques : Fig 5
décomposition en multipoles

$$\frac{\Delta T(\theta, \phi)}{T} = \sum_{l>0} \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_l^m(\theta, \phi) \quad (2)$$

avec :

$$a_{lm} = \int d\Omega(\theta, \phi) \Delta T(\theta, \phi) Y_l^m(\theta, \phi) \quad (3)$$

$$C_l = \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^l a_{lm} a_{lm}^* \quad (4)$$

Et finalement, on obtient le spectre de puissance :

$$D_l = \frac{l(l+1)C_l}{2\pi} \quad (5)$$

représenté Fig. 6

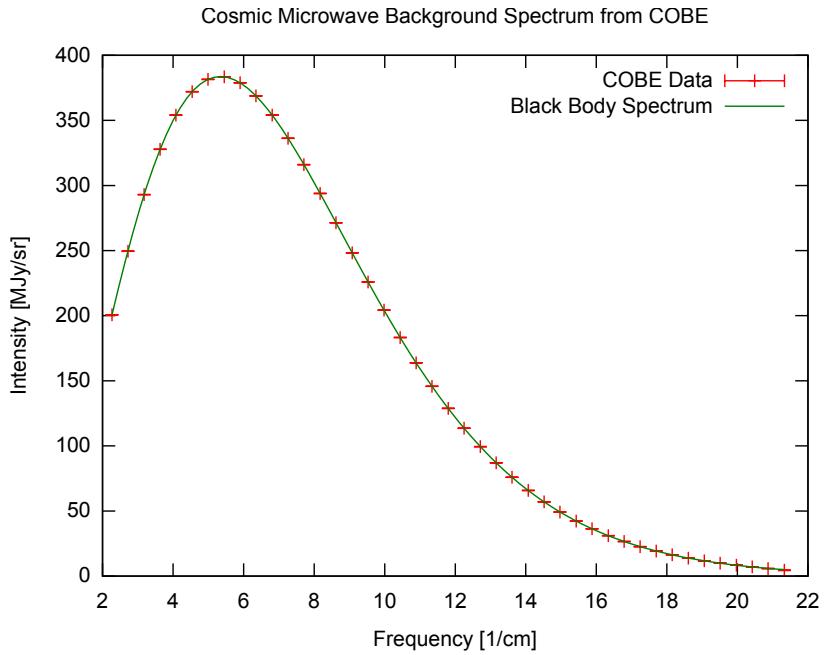


FIGURE 3 : Spectre thermique du CMB vue par le satellite Cosmic Background Explorer (COBE). Image Wikipédia

LE CONTENU DE L'UNIVERS - (THÉORIE)

Pour simuler l'univers, on a besoin de savoir ce qu'il contient. À partir du spectre de puissance, on peut déterminer les différentes composantes de l'univers (paramètres cosmologique).

univers infini, homogène, isotrope

(COLLABORATION et al., 2016)

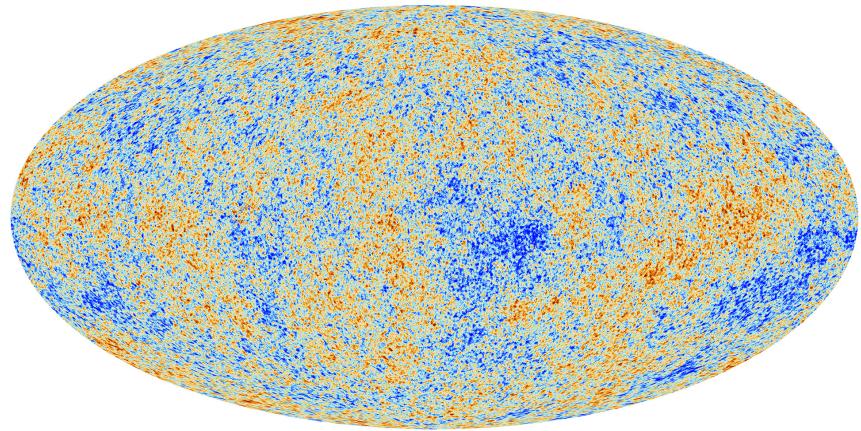


FIGURE 4 : Les fluctuations du CMB vues par le satellite Planck. Image ESA

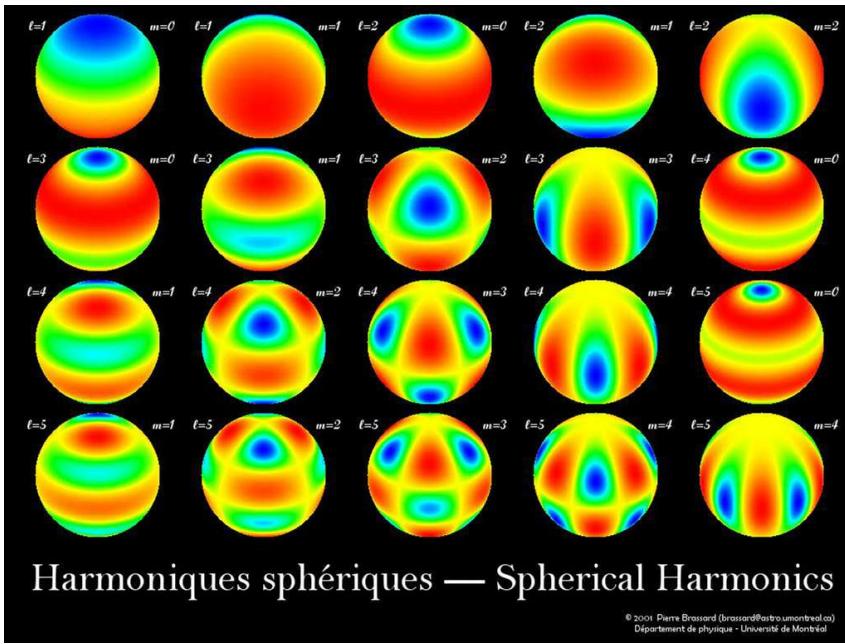


FIGURE 5 : représentation des $Y(\theta, \phi)_{lm}$ Pierre Brassard, université de Montréal Image Wikipédia

Energie noire

echelle gigaparsec Facteur d'expansion

Matière noire

echelle mega parsec gouverne la gravité non collisionnelle

Baryon

echelle kilo parsec collisionnelle interagit avec la radiation La matière visible

Radiation

quasiment notre seul source d'information sur l'univers (plus vrai depuis les ondes gravitationnelles) essentielle pour la reionization seulement $E > 13.6$ eV

bilan

plot en camembert avec les différents constituants

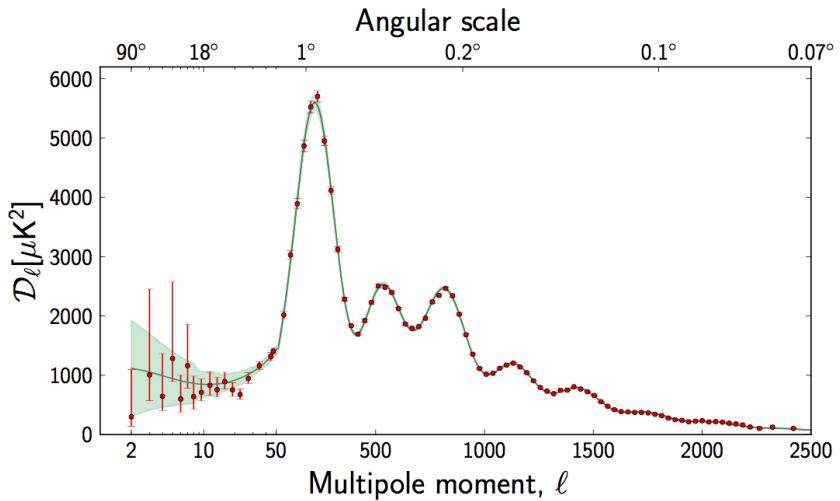


FIGURE 6 : Spectre de puissance des fluctuation du CMB. Image ESA

OBSERVATION -> LA REIONIZATION

le manque d'observations
 la difficulté des observations
 les futures observations
 Quelles sont les preuves de la réionisation ?
 spectre de quasar
 tunnel gun peterson
 polarisation du CMB
 ligne 21 cm
 fonction de luminosité UV
 Epaisseur optique lyman alpha
 Epaisseur optique Thomson

THÉORIE -> LA REIONIZATION

réionisation et non rayonnisation !
 Qu'est ce que c'est ?
 fin des âges sombres apparition des première sources de rayonnement
 Pourquoi étudier la réionisation
 Dernier processus impactant l'ensemble de l'univers. Importance pour le "missing satellite problem"

les principales question en suspend de l'étude de la réionisation

quand est ce arrivé ? quelles sont les sources ? -> débat galaxies vs quasars outlier dans l'épaisseur optique des quasars Le groupe local ?

Parameter	TT+lowP 68 % limits	TT+lowP+lensing 68 % limits	TT+lowP+lensing+ext 68 % limits	TT,TE,EE+lowP 68 % limits	TT,TE,EE+lowP+lensing 68 % limits	TT,TE,EE+lowP+lensing+ext 68 % limits
$\Omega_b h^2$	0.02222 ± 0.00023	0.02226 ± 0.00023	0.02227 ± 0.00020	0.02225 ± 0.00016	0.02226 ± 0.00016	0.02230 ± 0.00014
$\Omega_c h^2$	0.1197 ± 0.0022	0.1186 ± 0.0020	0.1184 ± 0.0012	0.1198 ± 0.0015	0.1193 ± 0.0014	0.1188 ± 0.0010
$100\theta_{MC}$	1.04085 ± 0.00047	1.04103 ± 0.00046	1.04106 ± 0.00041	1.04077 ± 0.00032	1.04087 ± 0.00032	1.04093 ± 0.00030
τ	0.078 ± 0.019	0.066 ± 0.016	0.067 ± 0.013	0.079 ± 0.017	0.063 ± 0.014	0.066 ± 0.012
$\ln(10^{10} A_s)$	3.089 ± 0.036	3.062 ± 0.029	3.064 ± 0.024	3.094 ± 0.034	3.059 ± 0.025	3.064 ± 0.023
n_s	0.9655 ± 0.0062	0.9677 ± 0.0060	0.9681 ± 0.0044	0.9645 ± 0.0049	0.9653 ± 0.0048	0.9667 ± 0.0040
H_0	67.31 ± 0.96	67.81 ± 0.92	67.90 ± 0.55	67.27 ± 0.66	67.51 ± 0.64	67.74 ± 0.46
Ω_Λ	0.685 ± 0.013	0.692 ± 0.012	0.6935 ± 0.0072	0.6844 ± 0.0091	0.6879 ± 0.0087	0.6911 ± 0.0062
Ω_m	0.315 ± 0.013	0.308 ± 0.012	0.3065 ± 0.0072	0.3156 ± 0.0091	0.3121 ± 0.0087	0.3089 ± 0.0062
$\Omega_m h^2$	0.1426 ± 0.0020	0.1415 ± 0.0019	0.1413 ± 0.0011	0.1427 ± 0.0014	0.1422 ± 0.0013	0.14170 ± 0.00097
$\Omega_m h^3$	0.09597 ± 0.00045	0.09591 ± 0.00045	0.09593 ± 0.00045	0.09601 ± 0.00029	0.09596 ± 0.00030	0.09598 ± 0.00029
σ_8	0.829 ± 0.014	0.8149 ± 0.0093	0.8154 ± 0.0090	0.831 ± 0.013	0.8150 ± 0.0087	0.8159 ± 0.0086
$\sigma_8 \Omega_m^{0.5}$	0.466 ± 0.013	0.4521 ± 0.0088	0.4514 ± 0.0066	0.4668 ± 0.0098	0.4553 ± 0.0068	0.4535 ± 0.0059
$\sigma_8 \Omega_m^{0.25}$	0.621 ± 0.013	0.6069 ± 0.0076	0.6066 ± 0.0070	0.623 ± 0.011	0.6091 ± 0.0067	0.6083 ± 0.0066
z_{re}	9.9 ^{+1.8} _{-1.6}	8.8 ^{+1.7} _{-1.4}	8.9 ^{+1.3} _{-1.2}	10.0 ^{+1.7} _{-1.5}	8.5 ^{+1.4} _{-1.2}	8.8 ^{+1.2} _{-1.1}
$10^9 A_s$	2.198 ^{+0.076} _{-0.083}	2.139 ± 0.063	2.143 ± 0.051	2.207 ± 0.074	2.130 ± 0.053	2.142 ± 0.049
$10^9 A_s e^{-2r}$	1.880 ± 0.014	1.874 ± 0.013	1.873 ± 0.011	1.882 ± 0.012	1.878 ± 0.011	1.876 ± 0.011
Age/Gyr	13.813 ± 0.038	13.799 ± 0.038	13.796 ± 0.029	13.813 ± 0.026	13.807 ± 0.026	13.799 ± 0.021
z_s	1090.09 ± 0.42	1089.94 ± 0.42	1089.90 ± 0.30	1090.06 ± 0.30	1090.00 ± 0.29	1089.90 ± 0.23
r_s	144.61 ± 0.49	144.89 ± 0.44	144.93 ± 0.30	144.57 ± 0.32	144.71 ± 0.31	144.81 ± 0.24
$1000 r_s$	1.04105 ± 0.00046	1.04122 ± 0.00045	1.04126 ± 0.00041	1.04096 ± 0.00032	1.04106 ± 0.00031	1.04112 ± 0.00029
z_{drag}	1059.57 ± 0.46	1059.57 ± 0.47	1059.60 ± 0.44	1059.65 ± 0.31	1059.62 ± 0.31	1059.68 ± 0.29
r_{drag}	147.33 ± 0.49	147.60 ± 0.43	147.63 ± 0.32	147.27 ± 0.31	147.41 ± 0.30	147.50 ± 0.24
k_D	0.14050 ± 0.00052	0.14024 ± 0.00047	0.14022 ± 0.00042	0.14059 ± 0.00032	0.14044 ± 0.00032	0.14038 ± 0.00029
z_{eq}	3393 ± 49	3365 ± 44	3361 ± 27	3395 ± 33	3382 ± 32	3371 ± 23
k_{eq}	0.01035 ± 0.00015	0.01027 ± 0.00014	0.010258 ± 0.000083	0.01036 ± 0.00010	0.010322 ± 0.000096	0.010288 ± 0.000071
$1000 k_{eq}$	0.4502 ± 0.0047	0.4529 ± 0.0044	0.4533 ± 0.0026	0.4499 ± 0.0032	0.4512 ± 0.0031	0.4523 ± 0.0023
f_{2000}^{143}	29.9 ± 2.9	30.4 ± 2.9	30.3 ± 2.8	29.5 ± 2.7	30.2 ± 2.7	30.0 ± 2.7
$f_{2000}^{143+217}$	32.4 ± 2.1	32.8 ± 2.1	32.7 ± 2.0	32.2 ± 1.9	32.8 ± 1.9	32.6 ± 1.9
f_{2000}^{217}	106.0 ± 2.0	106.3 ± 2.0	106.2 ± 2.0	105.8 ± 1.9	106.2 ± 1.9	106.1 ± 1.8

FIGURE 7 : Determination des paramètres cosmologiques par la collaboration Planck.

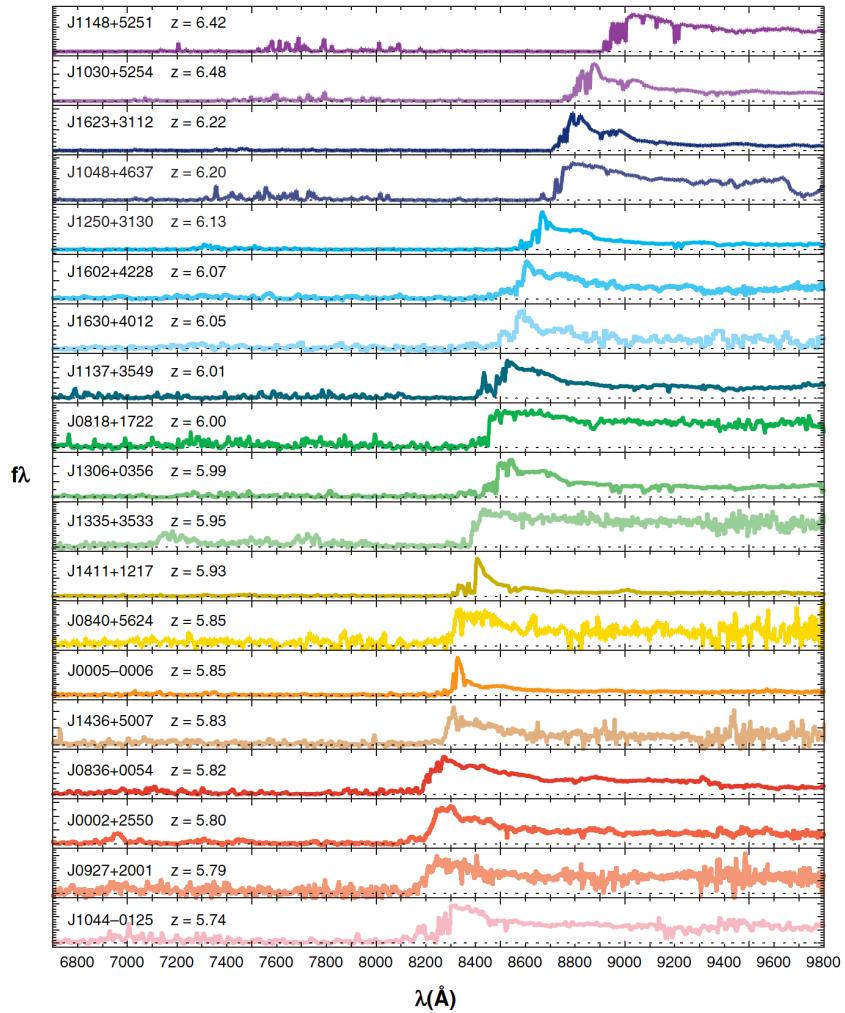


FIGURE 8 : Spectre de quasar à différents redshift présentant un tunnel gun peterson. Image fan et al.

2

INTRODUCTION AU MODÈLE NUMÉRIQUE

Les échelles de temps sont radicalement opposées entre la cosmologie qui considère les temps les plus longs de l'univers et les progrès informatiques qui vont à une vitesse exponentielle. Il faut considérer les simulations comme éphémères.

Comment modéliser la réionisation ?

LES DIFFÉRENTS TYPES DE CODES

(introduction aux différentes représentations (particules/grille) nécessaire pour la suite)

historique avantage inconvénient AMR vs SPH introduction de la grille et de la méthode AMR

GESTION DE LA GRILLE

(nécessaire d'être positionné ici car la structure en arbre conditionne plusieurs choix par la suite)

Oct tree gestion du raffinement cell linked list

ÉNERGIE NOIRE

Système d'unités supercomobiles

le pas de temps

MATIÈRE NOIRE

génération des conditions initiales

méthode gaussian random noise théorie des perturbations linéaires lien avec le spectre de puissance MUSIC et GRAPHIC limite la résolution min et max (min en masse et max en espace)

une simulation est limitée par sa taille et sa résolution -> ceci définit la plage d'échelle que l'on peut simuler

principes de bases annoncés dans Pen (1997) and Bertschinger (2001).

discrétisation de l'espace placement des particules sur la grille génération d'un bruit blanc convolution avec un spectre de puissance connu (celui du CMB)

Théorie des perturbation linéaire

approximation de zeldovich perte de linéarité a un certain moment
-> nécessité des simulation numériques

solveur de gravité

l'équation de Poisson
les différentes méthodes pour la résoudre
CIC
Méthode jacobi
méthode multi grille
le pas de temps

BARYON

système d'équations à résoudre solveur hydro partie la plus intensive en calcul le pas de temps

LA CHIMIE

gestion du refroidissement

RADIATION

système d'équations à résoudre la méthode M1 aton le cooling le pas de temps la mise en place du multi longueur d'onde

GESTION DU PAS DE TEMPS

condition de courant cosmo part freefall hydro radiatif

MATÉRIEL ET PARALLÉLISME

l'évolution du matériel MPI et courbe de hilbert CUDA et GPU

Les machines utilisées

le meso centre de l'UDS Curie Titan Occigen

Gestion des entrées sortie

le feedback CODA grosse quantité de données analyse a distance conception d'une organisation des données séparation des champs structure imposé par la gestion de l'AMR utilisation de hdf5 écriture parallèle

Potentiel d'optimisation EMMA

la forme des gathers/scatter optimisation matérielle -> les prochaines générations de GPU Opérations coarse sur grille non AMR. reformage de l'arbre et découplage de la physique

Deuxième partie

LES ÉTOILES

3

LES ETOILES

lien entre les différents solveurs en fonction du stade évolutif

LA FORMATION STELLAIRE

loi de schmidt-kennicut tirage aléatoire

LA VIE RADIATIVE

injection d'énergie dans le solveur radiatif, ok mais combien ? calibration energetique et Starburst99

LE PROBLÈME DE LA MASSE DES ÉTOILES

le paramètre de masse des étoiles change la reionization effet numérique le rayonnement est piégé dans les cellules

LES SUPERNOVAE

Implémentation Test numérique (Sedov) Papier Feedback

Troisième partie
LES CARTES DE REIONIZATIONS

BIBLIOGRAPHIE

COLLABORATION, Planck et al. (2016). "Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters". In : *Astronomy & Astrophysics* 594. arXiv : 1502.01589, A13. ISSN : 0004-6361, 1432-0746. DOI : [10.1051/0004-6361/201525830](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525830). URL : <http://arxiv.org/abs/1502.01589> (visité le 05/10/2016).

DECLARATION

Put your declaration here.

Strasbourg, Décembre 2017

Nicolas Deparis

COLOPHON

This document was typeset using the typographical look-and-feel `classicthesis` developed by André Miede. The style was inspired by Robert Bringhurst's seminal book on typography "*The Elements of Typographic Style*". `classicthesis` is available for both L^AT_EX and LyX :

<https://bitbucket.org/amiede/classicthesis/>

Happy users of `classicthesis` usually send a real postcard to the author, a collection of postcards received so far is featured here :

<http://postcards.miede.de/>

Résumé

Insérer votre résumé en français suivi des mots-clés

1000 caractères maximum

Résumé en anglais

Insérer votre résumé en anglais suivi des mots-clés