

UNIVERSITÉ PARIS DIDEROT

LABORATOIRE ASTROPARTICULES & COSMOLOGIE

DOCTORAL THESIS

---

Corrélations entre lentillage  
gravitationnel du fonds diffus  
cosmologique et traceurs de matière

---

*Author :*

Julien TRÉGUER

*Supervisor :*

Dr. Eric AUBOURG

*A thesis submitted in fulfilment of the requirements  
for the degree of Doctor of Philosophy*

*in the*

Research Group Name

Department or School Name

22 juillet 2015

# Declaration of Authorship

I, Julien TRÉGUER, declare that this thesis titled, 'Corrélations entre lentillage gravitationnel du fonds diffus cosmologique et traceurs de matière' and the work presented in it are my own. I confirm that :

- This work was done wholly or mainly while in candidature for a research degree at this University.
- Where any part of this thesis has previously been submitted for a degree or any other qualification at this University or any other institution, this has been clearly stated.
- Where I have consulted the published work of others, this is always clearly attributed.
- Where I have quoted from the work of others, the source is always given. With the exception of such quotations, this thesis is entirely my own work.
- I have acknowledged all main sources of help.
- Where the thesis is based on work done by myself jointly with others, I have made clear exactly what was done by others and what I have contributed myself.

Signed :

---

Date :

---

*“Thanks to my solid academic training, today I can write hundreds of words on virtually any topic without possessing a shred of information, which is how I got a good job in journalism.”*

Dave Barry

UNIVERSITY NAME (IN BLOCK CAPITALS)

# *Abstract*

Faculty Name

Department or School Name

Doctor of Philosophy

**Corrélations entre lentillage gravitationnel du fonds diffus cosmologique et  
traceurs de matière**

by Julien TRÉGUER

The Thesis Abstract is written here (and usually kept to just this page). The page is kept centered vertically so can expand into the blank space above the title too...

# *Acknowledgements*

The acknowledgements and the people to thank go here, don't forget to include your project advisor...

# Table des matières

<b>Declaration of Authorship</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Acknowledgements</b>	<b>iv</b>
<b>Contents</b>	<b>v</b>
<b>List of Figures</b>	<b>ix</b>
<b>List of Tables</b>	<b>x</b>
<b>Abbreviations</b>	<b>xi</b>
<b>Physical Constants</b>	<b>xii</b>
<b>Symbols</b>	<b>xiii</b>
<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 Cosmologie moderne</b>	<b>2</b>
1.1 Historique . . . . .	2
1.1.1 Relativité générale . . . . .	2
1.1.2 Principe cosmologique . . . . .	2
1.1.3 Métrique FLRW . . . . .	2
1.1.4 Hubble et la récession des galaxies . . . . .	2
1.1.5 L’abondance des éléments . . . . .	2
1.1.6 Le fond diffus cosmologique . . . . .	2
1.1.7 Matière noire . . . . .	3
1.1.8 Energie noire . . . . .	3
1.2 Théorie du Big Bang et modèle $\Lambda$ -CDM . . . . .	3
1.2.1 Chronologie . . . . .	3
1.2.2 Contenu énergétique de l’univers . . . . .	3
1.2.2.1 Baryons . . . . .	3
1.2.2.2 Photons . . . . .	3

1.2.2.3	Matière noire . . . . .	3
1.2.2.4	Energie noire . . . . .	3
1.2.2.5	Neutrinos . . . . .	3
1.2.3	Limites du modèle $\Lambda$ -CDM . . . . .	3
1.2.3.1	Problème de l'horizon . . . . .	3
1.2.3.2	Problème de la courbure . . . . .	3
1.2.3.3	Problème des monopôles . . . . .	3
1.2.4	Paradigme de l'inflation . . . . .	3
1.2.4.1	Postulats . . . . .	3
1.2.4.2	Apports au modèle $\Lambda$ -CDM . . . . .	3
1.2.4.3	Conséquences observationnelles . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Lentillage gravitationnel du fonds diffus cosmologique</b>	<b>5</b>
2.1	Fond diffus cosmologique . . . . .	5
2.1.1	Spectre de puissance angulaire . . . . .	5
2.2	Lentillage gravitationnel . . . . .	5
2.2.1	Origine physique . . . . .	5
2.2.2	Théorie . . . . .	5
2.2.3	Applications . . . . .	5
2.3	Lentillage du CMB . . . . .	6
2.3.1	Théorie . . . . .	6
2.3.2	Effets observationnels . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Traceurs de matière</b>	<b>7</b>
3.1	Formation des structures . . . . .	7
3.2	Galaxies . . . . .	7
3.3	Quasars . . . . .	7
3.4	Amas de galaxies . . . . .	7
3.5	Nuages d'hydrogène neutre . . . . .	7
3.5.1	Forêt Lyman- $\alpha$ . . . . .	7
3.5.2	Raie à 21 cm . . . . .	7
	Emissions à hautes énergies . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Corrélations en cosmologie</b>	<b>8</b>
4.1	Définition . . . . .	8
4.1.1	Auto-corrélation . . . . .	8
4.1.2	Corrélation croisée . . . . .	8
4.2	Les mesures de corrélations en cosmologie . . . . .	8
4.2.1	Fonction à deux points . . . . .	8
4.2.2	Spectre de puissance . . . . .	8
4.2.3	Fonction de corrélation angulaire . . . . .	8
4.2.4	Spectre de puissance angulaire . . . . .	8
4.3	Calcul théorique . . . . .	8
4.3.1	Approximation de Limber . . . . .	8
4.3.2	Exemples de noyaux . . . . .	8
4.4	Avantages de la corrélation croisée . . . . .	9
4.4.1	Exemple théorique . . . . .	9

4.4.2	Quelques résultats récents en cosmologie . . . . .	9
<b>5</b>	<b>Collaborations Planck et SDSS-III</b>	<b>10</b>
5.1	Mission Planck . . . . .	10
5.1.1	Technologies et déroulement de la mission . . . . .	10
5.1.2	Objectifs scientifiques . . . . .	10
5.1.3	Principaux résultats . . . . .	10
5.2	Collaboration SDSS-III . . . . .	10
5.2.1	BOSS . . . . .	10
5.2.2	Autres relevés . . . . .	10
<b>6</b>	<b>Données utilisées</b>	<b>11</b>
6.1	Carte de convergence $\kappa$ . . . . .	11
6.2	Relevés de galaxies . . . . .	11
6.2.1	NVSS . . . . .	11
6.2.2	Lowz et CMASS . . . . .	11
6.3	Quasars de BOSS . . . . .	11
6.4	Forêts Lyman- $\alpha$ . . . . .	11
6.5	(Sources X) . . . . .	11
<b>7</b>	<b>Méthodologie</b>	<b>12</b>
7.1	Analyses . . . . .	12
7.1.1	Rotations de ciel . . . . .	12
7.1.1.1	Relevés de galaxies . . . . .	12
7.1.2	Stacking . . . . .	12
7.1.2.1	Relevés de galaxies . . . . .	12
7.1.2.2	Forêt Lyman- $\alpha$ . . . . .	12
7.1.3	Spectres croisés de puissance angulaire . . . . .	12
7.2	Validations . . . . .	12
7.2.1	Simulations . . . . .	12
7.2.2	Hypothèse nulle . . . . .	12
<b>8</b>	<b>Résultats</b>	<b>13</b>
8.1	Détection de signal . . . . .	13
8.1.1	Lensing et relevés . . . . .	13
8.1.2	Lensing et QSO . . . . .	13
8.1.3	Lensing et forêts Lyman- $\alpha$ . . . . .	13
8.2	Estimation de paramètres . . . . .	13
8.2.1	Fit de spectres théoriques . . . . .	13
8.2.2	Estimation de biais de galaxies . . . . .	13
<b>9</b>	<b>Conclusions</b>	<b>14</b>
9.1	Récapitulatif . . . . .	14
9.2	Prospective . . . . .	14
9.2.1	LSS . . . . .	14
9.2.2	Euclid . . . . .	14
9.2.3	SKA . . . . .	14
9.2.4	WEAVE . . . . .	14



9.2.5	Statistiques d'ordre supérieur . . . . .	14
-------	--	----

<b>A</b>	<b>Appendix Title Here</b>	<b>15</b>
----------	----------------------------	-----------

# Table des figures

# Liste des tableaux

# Abbreviations

**LAH** List Abbreviations **H**ere

**GR** General **R**elativity

# Physical Constants

$$\text{Speed of Light } c = 2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ ms}^{-\text{s}} \text{ (exact)}$$

# Symbols

$a$	distance	m
$P$	power	W ( $\text{Js}^{-1}$ )
$\omega$	angular frequency	$\text{rads}^{-1}$

*For/Dedicated to/To my...*

# Introduction

History of religions, myths, works of arts offer countless examples of Humanity interrogations about the origin of the Universe.



# Chapitre 1

## Cosmologie moderne

*"Use the Force, Luke"*

— Master Yoda, *Star Wars*

### 1.1 Historique

#### 1.1.1 Relativité générale

#### 1.1.2 Principe cosmologique

#### 1.1.3 Métrique FLRW

#### 1.1.4 Hubble et la récession des galaxies

#### 1.1.5 L'abondance des éléments

Alpher et Gamow 1948

#### 1.1.6 Le fond diffus cosmologique

Harmoniques sphériques et SdPA

### 1.1.7 Matière noire

### 1.1.8 Energie noire

## 1.2 Théorie du Big Bang et modèle $\Lambda$ -CDM

### 1.2.1 Chronologie

Histoire de l'univers depuis le Big Bang, les différentes phases : Inflation Nucléosynthèse Baryosynthèse Ère de la radiation - $\gamma$  matière Recombinaison Âges sombres Réionisation Expansion

### 1.2.2 Contenu énergétique de l'univers

#### 1.2.2.1 Baryons

#### 1.2.2.2 Photons

#### 1.2.2.3 Matière noire

#### 1.2.2.4 Energie noire

#### 1.2.2.5 Neutrinos

### 1.2.3 Limites du modèle $\Lambda$ -CDM

#### 1.2.3.1 Problème de l'horizon

#### 1.2.3.2 Problème de la courbure

#### 1.2.3.3 Problème des monopôles

### 1.2.4 Paradigme de l'inflation

#### 1.2.4.1 Postulats

#### 1.2.4.2 Apports au modèle $\Lambda$ -CDM

Résolution des problèmes Fluctuations qui deviennent des anisotropies

#### **1.2.4.3 Conséquences observationnelles**

## Chapitre 2

# Lentillage gravitationnel du fonds diffus cosmologique

### 2.1 Fond diffus cosmologique

#### 2.1.1 Spectre de puissance angulaire

### 2.2 Lentillage gravitationnel

Définition, observations astrophysiques

#### 2.2.1 Origine physique

#### 2.2.2 Théorie

Cisaillement et magnification

#### 2.2.3 Applications

Eddington et relativité générale Détermination de masses Détection de planètes

## 2.3 Lentillage du CMB

### 2.3.1 Théorie

Champ de déflexion Convergence  $\kappa$

### 2.3.2 Effets observationnels

Effet sur la carte du CMB Effet sur le spectre angulaire de température Effet sur la polarisation du CMB

## Chapitre 3

# Traceurs de matière

### 3.1 Formation des structures

### 3.2 Galaxies

### 3.3 Quasars

### 3.4 Amas de galaxies

### 3.5 Nuages d'hydrogène neutre

#### 3.5.1 Forêt Lyman- $\alpha$

#### 3.5.2 Raie à 21 cm

Emissions à hautes énergies    Gamma, X

## Chapitre 4

# Corrélations en cosmologie

### 4.1 Définition

#### 4.1.1 Auto-corrélation

#### 4.1.2 Corrélation croisée

### 4.2 Les mesures de corrélations en cosmologie

#### 4.2.1 Fonction à deux points

#### 4.2.2 Spectre de puissance

#### 4.2.3 Fonction de corrélation angulaire

#### 4.2.4 Spectre de puissance angulaire

### 4.3 Calcul théorique

#### 4.3.1 Approximation de Limber

#### 4.3.2 Exemples de noyaux

QSO-kappa QSO-Lyman QSO-kappa

## **4.4 Avantages de la corrélation croisée**

Elimination des bruits non corrélés Amplification du signal

### **4.4.1 Exemple théorique**

### **4.4.2 Quelques résultats récents en cosmologie**



## Chapitre 5

# Collaborations Planck et SDSS-III

### 5.1 Mission Planck

#### 5.1.1 Technologies et déroulement de la mission

#### 5.1.2 Objectifs scientifiques

#### 5.1.3 Principaux résultats

### 5.2 Collaboration SDSS-III

#### 5.2.1 BOSS

#### 5.2.2 Autres relevés

## Chapitre 6

# Données utilisées

### 6.1 Carte de convergence $\kappa$

### 6.2 Relevés de galaxies

#### 6.2.1 NVSS

#### 6.2.2 Lowz et CMASS

### 6.3 Quasars de BOSS

### 6.4 Forêts Lyman- $\alpha$

### 6.5 (Sources X)

# Chapitre 7

## Méthodologie

### 7.1 Analyses

#### 7.1.1 Rotations de ciel

Fonction à un point

##### 7.1.1.1 Relevés de galaxies

#### 7.1.2 Stacking

##### 7.1.2.1 Relevés de galaxies

##### 7.1.2.2 Forêt Lyman- $\alpha$

#### 7.1.3 Spectres croisés de puissance angulaire

### 7.2 Validations

#### 7.2.1 Simulations

Valide le pipeline

#### 7.2.2 Hypothèse nulle

## Chapitre 8

# Résultats

### 8.1 Détection de signal

#### 8.1.1 Lensing et relevés

#### 8.1.2 Lensing et QSO

#### 8.1.3 Lensing et forêts Lyman- $\alpha$

### 8.2 Estimation de paramètres

#### 8.2.1 Fit de spectres théoriques

#### 8.2.2 Estimation de biais de galaxies

## Chapitre 9

# Conclusions

### 9.1 Récapitulatif

### 9.2 Prospective

#### 9.2.1 LSS

#### 9.2.2 Euclid

#### 9.2.3 SKA

#### 9.2.4 WEAVE

#### 9.2.5 Statistiques d'ordre supérieur

## **Annexe A**

# **Appendix Title Here**

Write your Appendix content here.