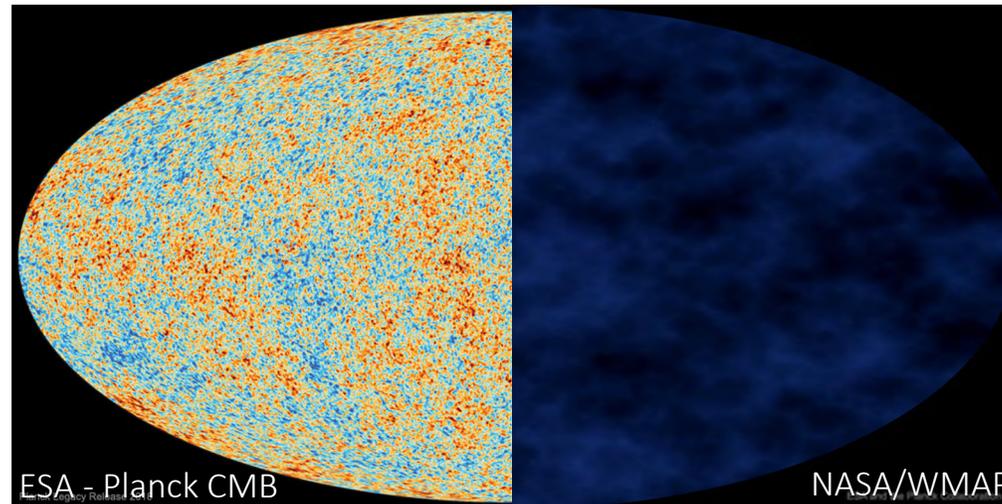


# Corrélation-croisée entre la polarisation du CMB et de la raie 21cm sur les surdensités de matière produites par les cordes cosmiques



Sous la supervision du Pr. Robert H. Brandenberger

---

Mattéo Blamart

Master 2 Physique Subatomique et Astroparticules  
2020 - 2021

# Sommaire

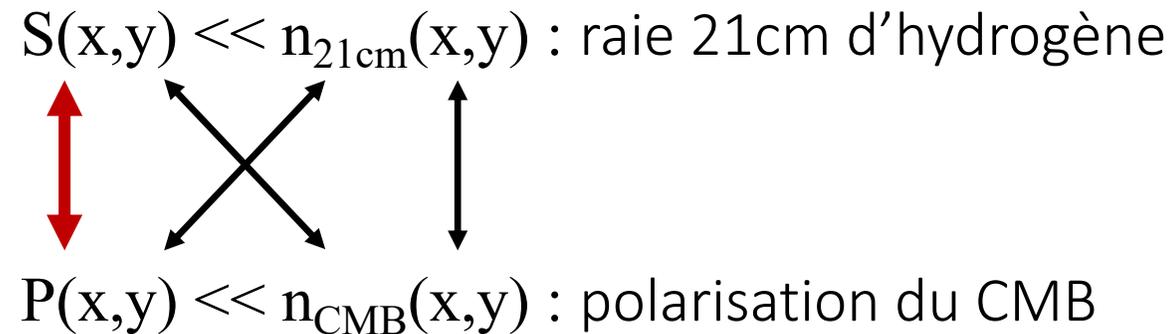
1. Introduction sur les cordes cosmiques et les surdensités produites par ces cordes
2. Description de la signature des surdensités de matière dans la polarisation du CMB
3. Description de la signature des surdensités de matière dans la raie 21cm d'hydrogène
4. Corrélation-croisée entre les surdensités de matière dans la polarisation du CMB et dans la raie 21cm d'hydrogène
5. Discussion et perspectives

# Objectif du projet de recherche

---

Etat de l'art : Surdensités de matière difficilement distinguable des prédictions du modèle standard  $\Lambda$ CDM

Corrélations croisées = mesures de similarités entre 2 signaux



$$CC_{\text{avec corde cosmique}} \gg CC_{\text{sans corde cosmique}}$$

# Sommaire

1. Introduction sur les cordes cosmiques et les surdensités produites par ces cordes
2. Description de la signature des surdensités de matière dans la polarisation du CMB
3. Description de la signature des surdensités de matière dans la raie 21cm d'hydrogène
4. Corrélation-croisée entre les surdensités de matière dans la polarisation du CMB et dans la raie 21cm d'hydrogène
5. Discussion et perspectives

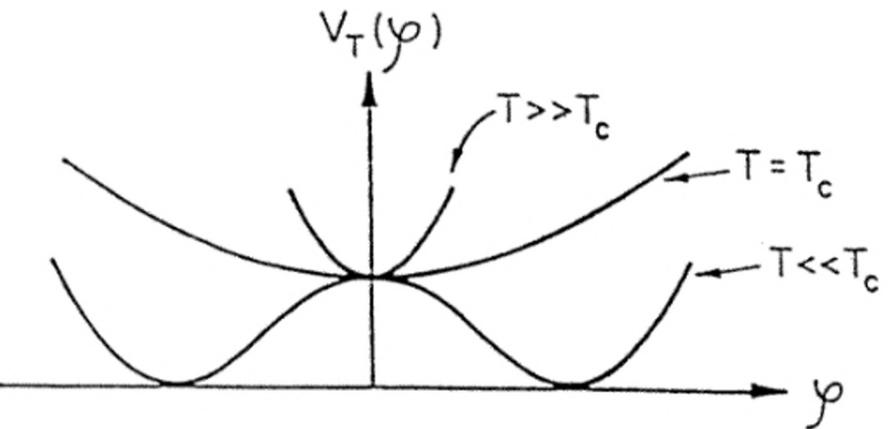
# Contexte de formation des cordes cosmiques

Idée d'une théorie de grande unification : groupe de grande unification

$$G \rightarrow H \rightarrow \dots \rightarrow SU(3) \times SU(2) \times U(1)$$

Cordes cosmiques : défauts topologiques formés dans une transition de phase et une brisure spontanée de la symétrie

Exemple d'une transition de phase :



Variété du vide :  $M \cong G/H$

Critère pour créer des cordes :  $\Pi_1(M) \neq 1$

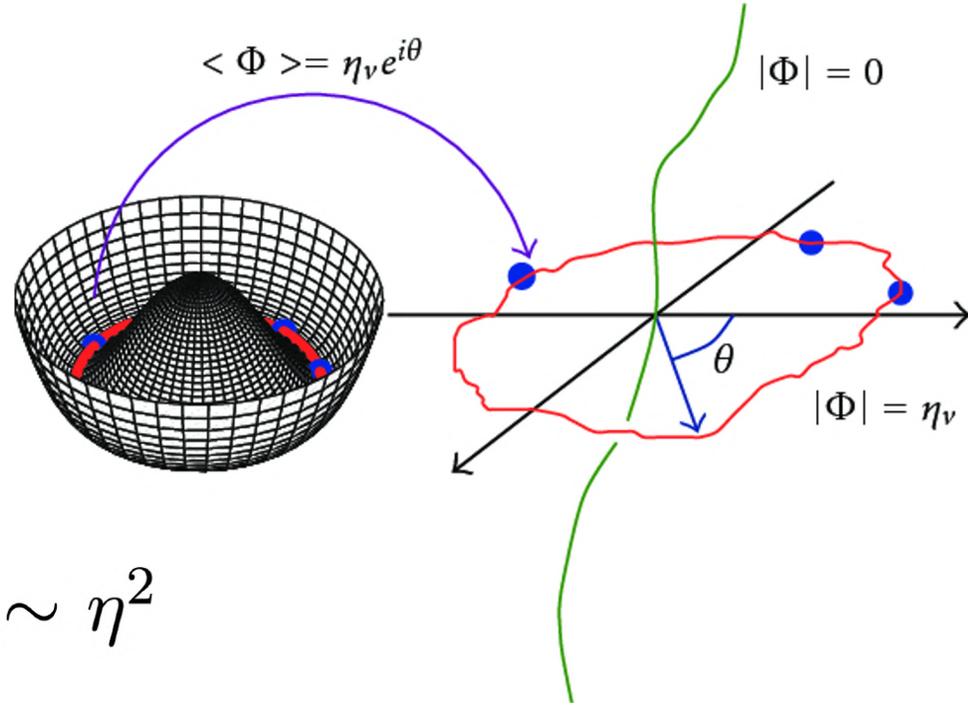
# Création d'une corde cosmique

Cas du potentiel en chapeau mexicain :

$$V(\phi) = \frac{1}{4}\lambda(|\phi|^2 - \eta^2)^2$$

Propriétés importantes de la corde :

- Épaisseur
- Masse par unité de longueur ou tension  $\mu \sim \eta^2$



# Intérêts de l'étude des cordes cosmiques

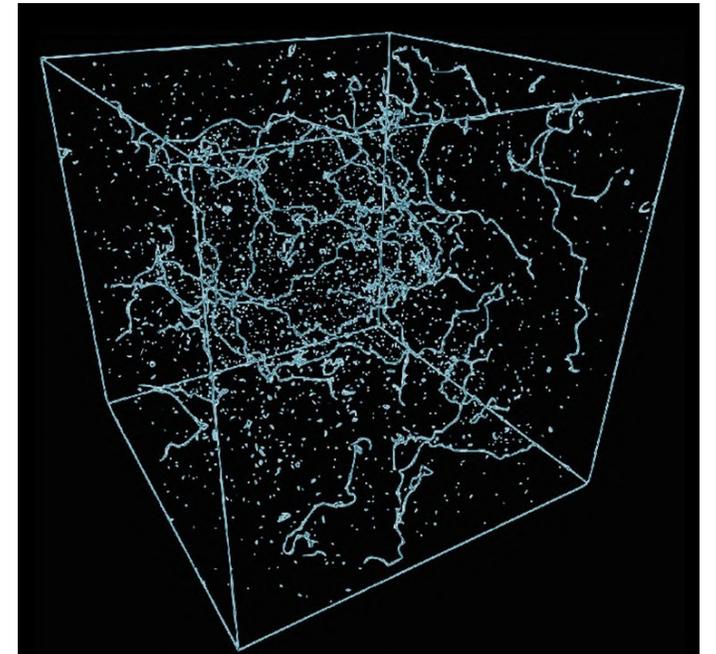
---

Par causalité, présence d'un réseau de cordes cosmiques qui persiste au cours du temps

Piégeage d'énergie  $\rightarrow$  effets gravitationnels

Limite actuelle de la tension :  $G\mu < 3.0 \times 10^{-7}$

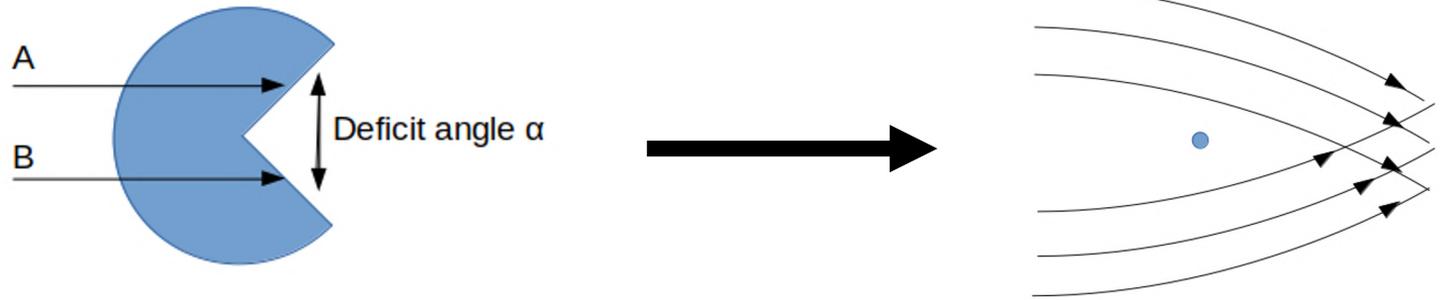
Information sur des échelles d'énergie très haute par rapport au LHC



E. Allys, *Dossier pour la science*, 97, (2017).

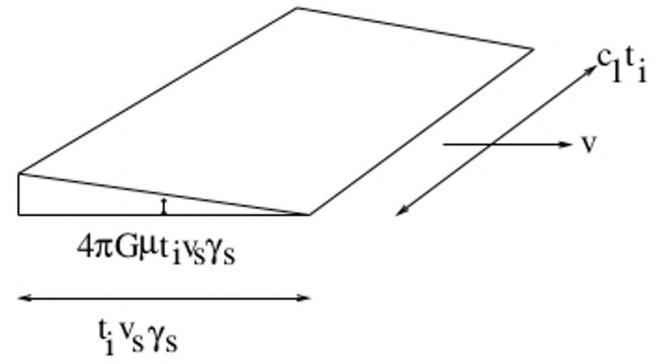
# Effet gravitationnel des cordes cosmiques

Les cordes cosmiques forment des surdensités de matière appelées **Cosmic String Wakes**



Surdensité de matière = un prisme de dimension :  $c_1 t_i \times t_i \gamma_s v_s \times 4\pi G \mu t_i \gamma_s v_s$

Une fois créée, accrétion de matière lié à la gravité



Surdensité → effets dans la polarisation du CMB et la raie 21cm d'hydrogène

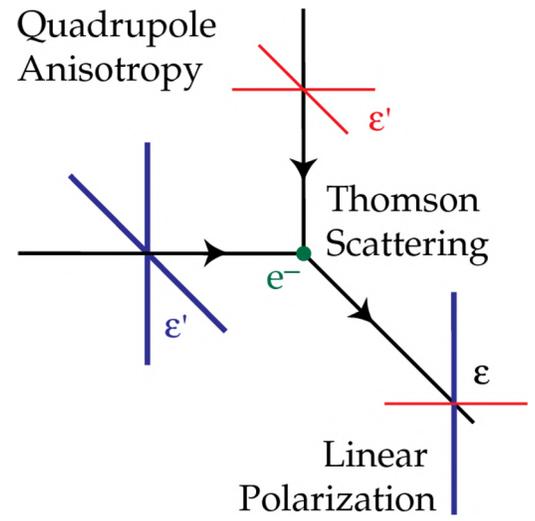
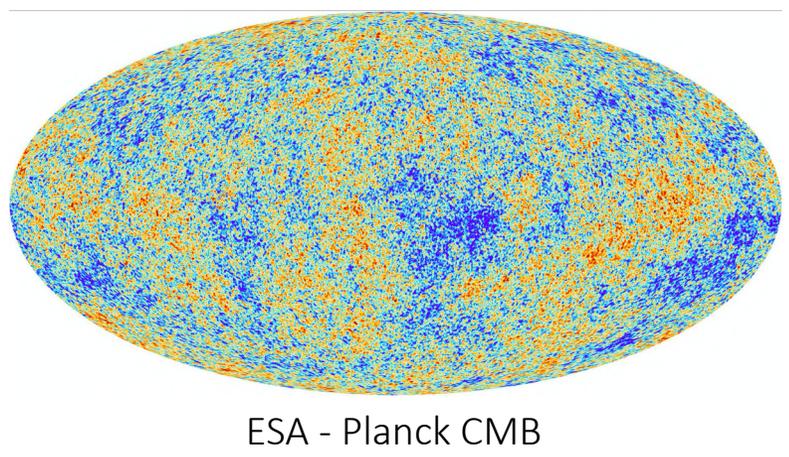
# Sommaire

1. Introduction sur les cordes cosmiques et les surdensités produites par ces cordes
2. Description de la signature des surdensités de matière dans la polarisation du CMB
3. Description de la signature des surdensités de matière dans la raie 21cm d'hydrogène
4. Corrélation-croisée entre les surdensités de matière dans la polarisation du CMB et dans la raie 21cm d'hydrogène
5. Discussion et perspectives

# Polarisation du fond diffus cosmologique

Polarisation : effet de la rencontre entre un électron et une onde électromagnétique

Polarisation du CMB : résulte d'un fond anisotrope de photons qui rencontre la fluctuation de la matière à la dernière surface de diffusion



# Signature de la surdensité dans la polarisation du CMB

---

Cosmic String Wakes  $\sim$  surdensités d'électrons libres

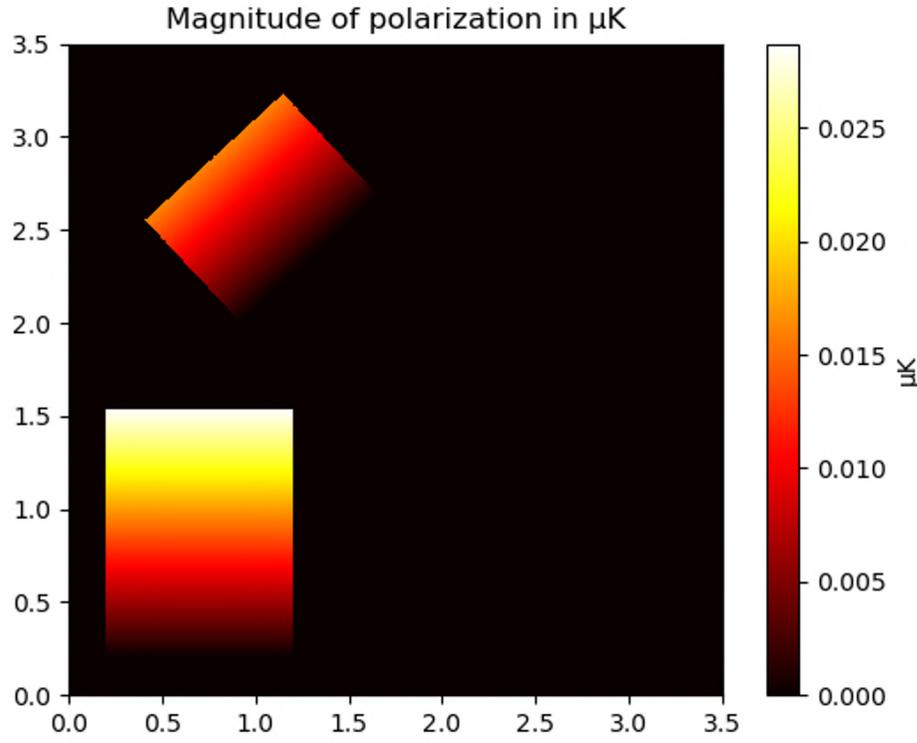
→ Photons du CMB acquièrent une extra-polarisation lorsqu'ils passent à travers la surdensité

Intensité de polarisation : 
$$P \simeq \frac{1}{5} \left( \frac{3}{4\pi} \right)^{0.5} f \rho_B(t_i) m_p^{-1} \frac{(z(t) + 1)^2}{(z(t_i) + 1)^2} \psi_0(t_i) \sigma_T Q$$

- $\sigma_T$  : Section efficace de Thomson
- $\psi_0$  : Densité d'électrons, épaisseur et tension de la corde

# Signature des Cosmic String Wakes dans la polarisation du CMB dans l'espace position

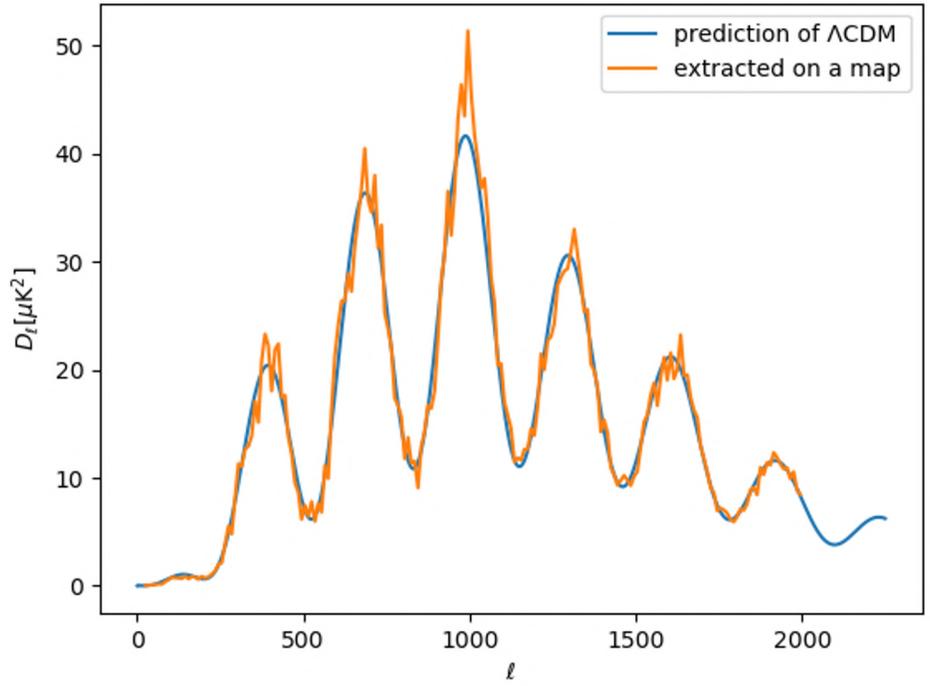
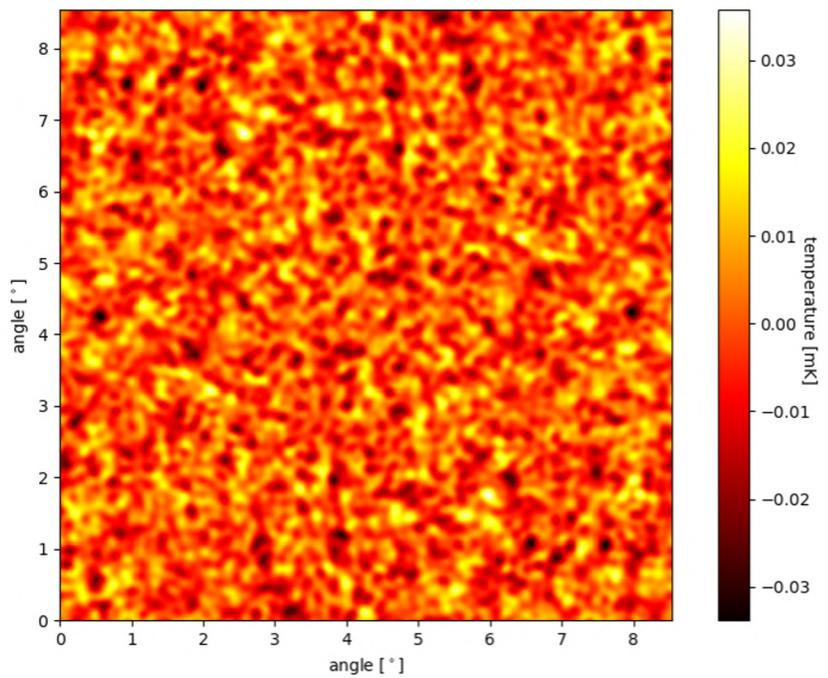
Forme géométrique très spécifique :



Intensité de polarisation prédite de l'ordre de 0,02 μK pour  $G\mu = 3 \times 10^{-7}$

# Carte des perturbations gaussiennes de la polarisation du CMB

Obtention des perturbations prédites par le modèle  $\Lambda$ CDM



Carte de polarisation dans l'espace position

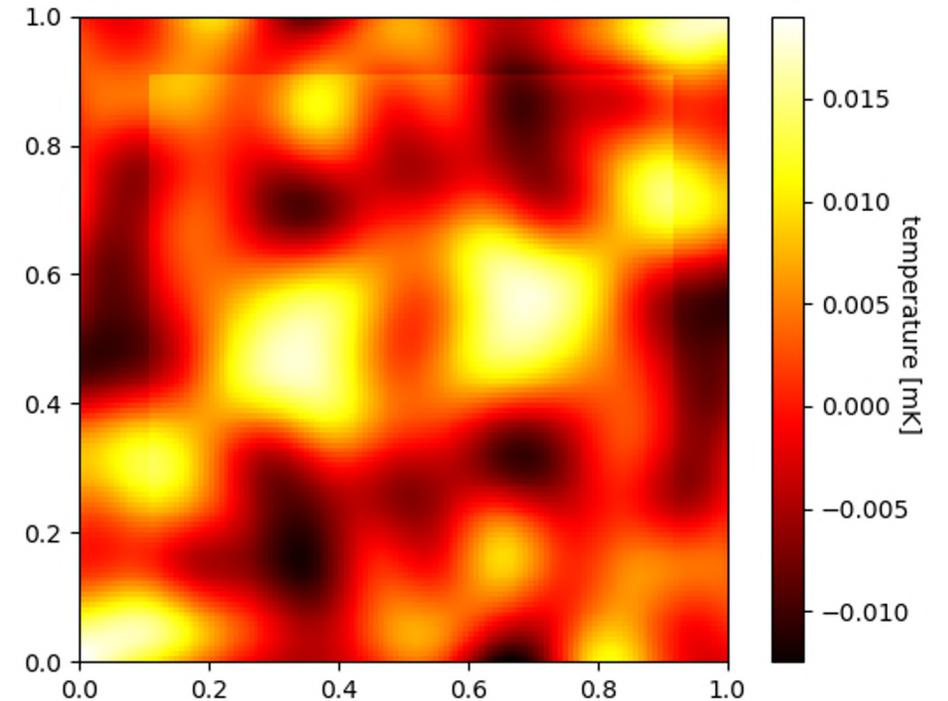
Spectre de puissance angulaire dans l'espace de Fourier

# Comparaison entre le signal des cordes et les fluctuations du modèle standard

---

Rapport 1/100 entre le signal et les perturbations gaussiennes

Surdensités de cordes cosmiques  $\rightarrow$  difficiles à détecter dans la carte de polarisation



Carte de polarisation avec le signal des cordes boosté par 100 avec fluctuations

# Sommaire

1. Introduction sur les cordes cosmiques et les surdensités produites par ces cordes
2. Description de la signature des surdensités de matière dans la polarisation du CMB
3. Description de la signature des surdensités de matière dans la raie 21cm d'hydrogène
4. Corrélation-croisée entre les surdensités de matière dans la polarisation du CMB et dans la raie 21cm d'hydrogène
5. Discussion et perspectives

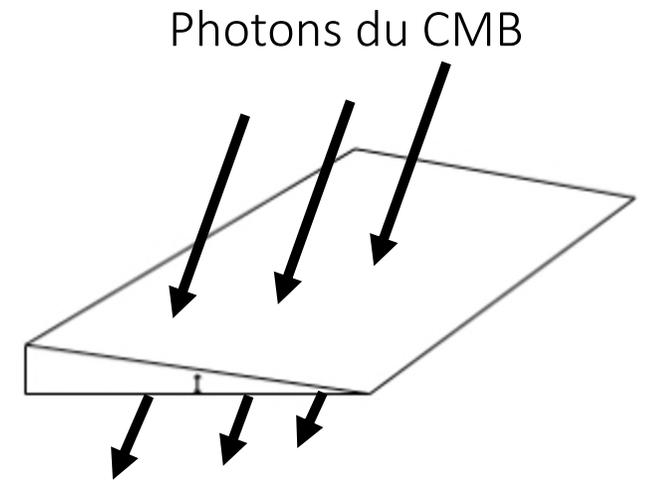
# Émission et absorption à 21 cm

Basé sur la transition hyperfine des atomes d'hydrogène

Température de luminosité :  $T_b(\nu) = T_S(1 - e^{-\tau_\nu}) + T_\gamma(\nu)e^{-\tau_\nu}$

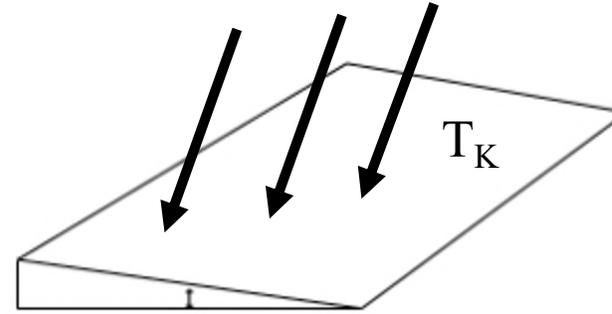
Température de spin :  $T_S = \frac{1 + x_c}{1 + x_c T_\gamma / T_K} T_\gamma$

Quantité mesurée :  $\delta T_b(\nu) = \frac{T_b(\nu) - T_\gamma(\nu)}{1 + z} \simeq \frac{T_S(\nu) - T_\gamma(\nu)}{1 + z} \tau_\nu$



# Signature des surdensités de cordes cosmiques

Température cinétique de la surdensité  $\rightarrow$  Accrétion de matière à  $T_g$



$$\delta T_b(\nu) = [0.017K] \frac{x_c}{1+x_c} \left(1 - \frac{T_\gamma}{T_{K/g}}\right) (2 \sin^2(\theta))^{-1} (1+z)^{0.5} \frac{n_{HI}^{wake}}{n_{HI}^{bg}}$$

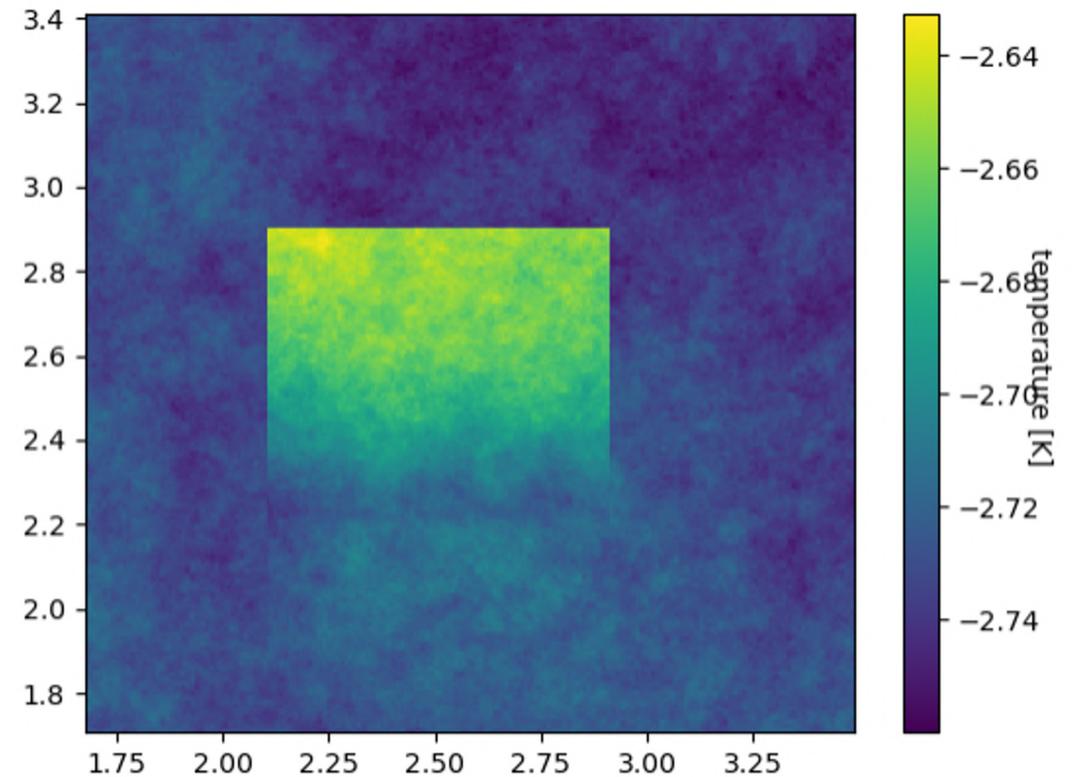
$$T_{K/g} = \begin{cases} T_K & T_K > 3T_g \\ 3T_g & T_K \leq 3T_g \end{cases} \quad \frac{n_{HI}^{wake}}{n_{HI}^{bg}} = \begin{cases} 4 & T_K > 3T_g \\ \left(1 + \frac{T_K}{T_g}\right) & T_K \leq 3T_g \end{cases}$$

3.

# Comparaison entre le signal des cordes et les fluctuations du modèle standard dans la raie 21cm

Fluctuations gaussiennes basées sur le spectre de puissance de matière

Distinction claire entre la surdensité et fluctuations gaussiennes



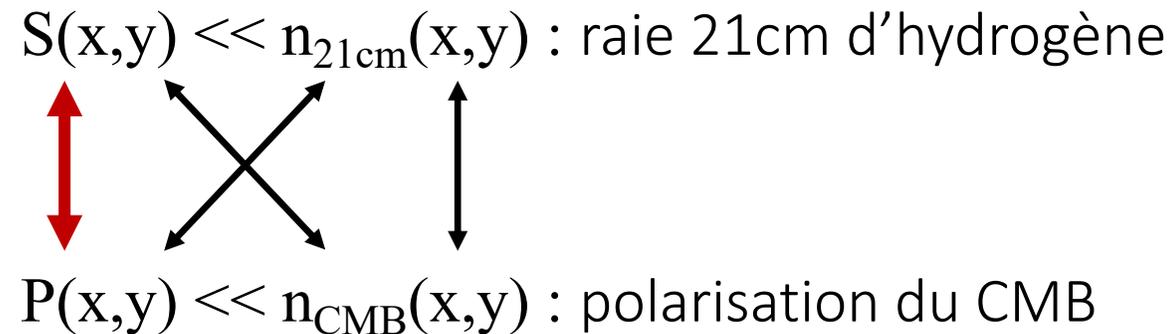
# Sommaire

1. Introduction sur les cordes cosmiques et les surdensités produites par ces cordes
2. Description de la signature des surdensités de matière dans la polarisation du CMB
3. Description de la signature des surdensités de matière dans la raie 21cm d'hydrogène
4. Corrélation-croisée entre les surdensités de matière dans la polarisation du CMB et dans la raie 21cm d'hydrogène
5. Discussion et perspectives

# Objectif du projet de recherche

---

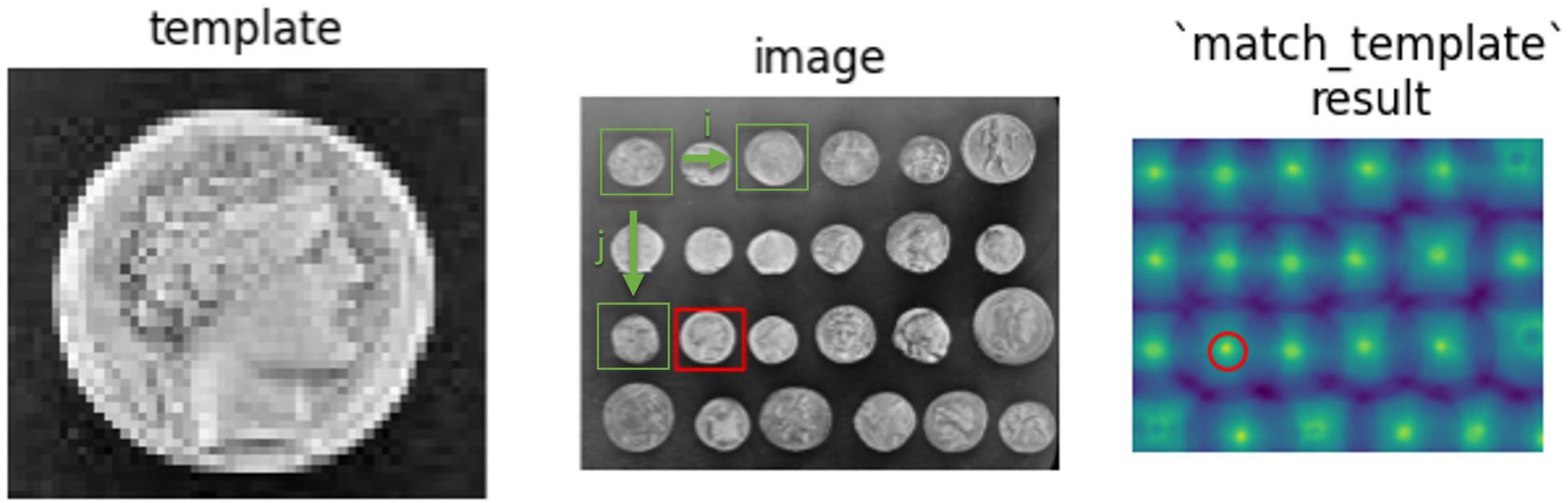
Corrélations croisées = mesures de similarités entre 2 signaux



$$CC_{\text{avec corde cosmique}} \gg CC_{\text{sans corde cosmique}}$$

# Corrélation croisée en 2D

Très utilisé dans le cas de reconnaissance d'image :

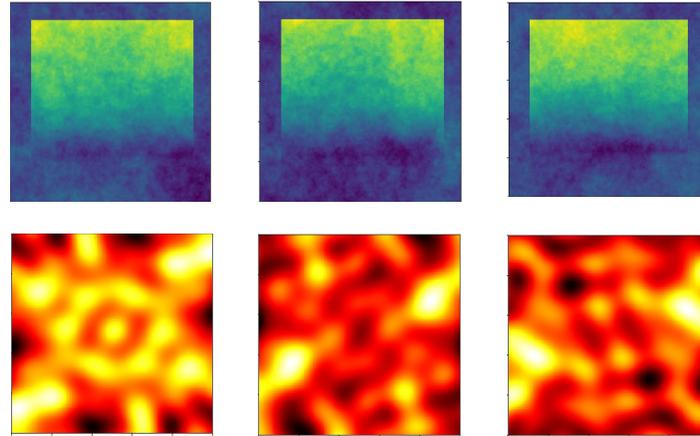


$$C(i, j) = \sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^n (f(x, y) - \langle f \rangle)(g(x + i, y + j) - \langle g \rangle)$$

# Corrélations-croisées des données

---

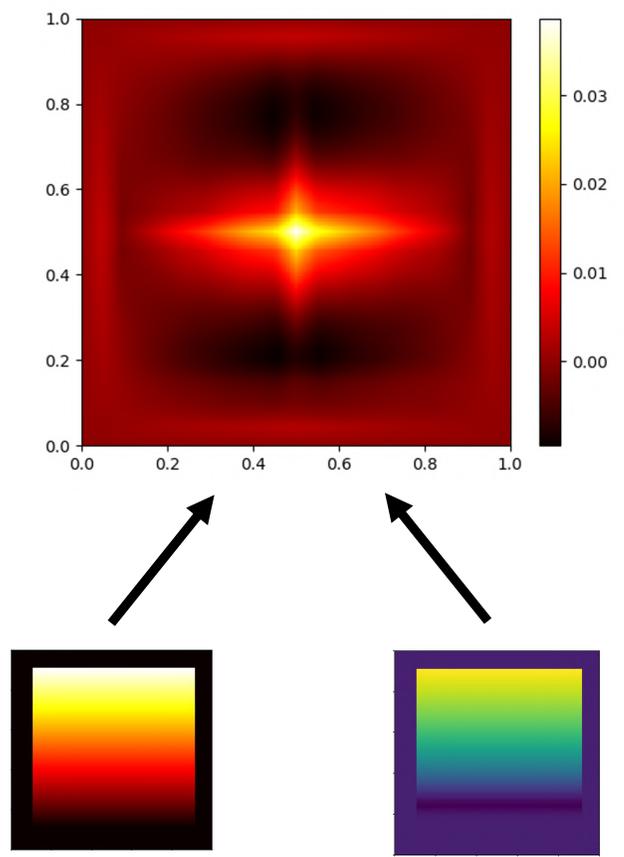
- Générer aléatoirement des cartes de 1\*1 degré du modèle standard
- Ajout d'une surdensité dans chaque carte



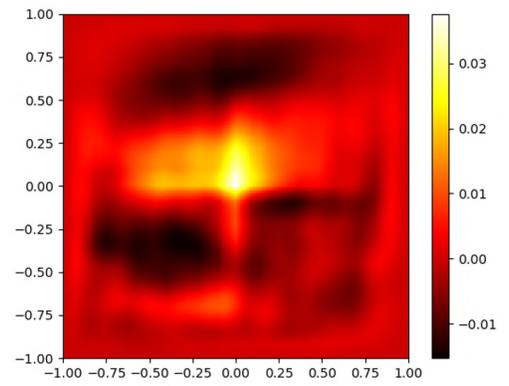
- Corrélation-croisée les unes avec les autres
  - Obtention de la valeur moyenne des  $C(i, j)$ 
    - Comparaison avec des cartes sans surdensité

# Résultats des corrélations croisées

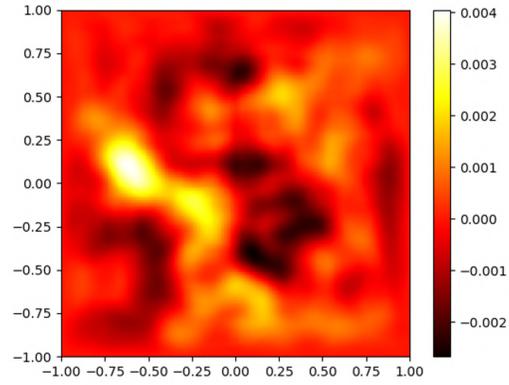
Prédiction sans les fluctuations gaussiennes :



- Résultats en présence de surdensité :



- Résultats sans surdensité :



Résultats 10 fois inférieur

# Sommaire

1. Introduction sur les cordes cosmiques et les surdensités produites par ces cordes
2. Description de la signature des surdensités de matière dans la polarisation du CMB
3. Description de la signature des surdensités de matière dans la raie 21cm d'hydrogène
4. Corrélation-croisée entre les surdensités de matière dans la polarisation du CMB et dans la raie 21cm d'hydrogène
5. Discussion et perspectives

# Discussion et perspectives

---

Traitement idéalisé de la position des surdensités de matière : effets de bords et variation légère d'intensité

Signature indirecte : problème inverse

→ Suite du projet :

Tension de la corde cosmique	Nombre de cartes	avec matched filter	avec un modèle de bruit
$G\mu=3.0\times 10^{-7}$	entre 10000 et 100000	entre 5000 et 50000	?
$G\mu=1.0\times 10^{-8}$	?	?	?
$G\mu=1.0\times 10^{-9}$	?	?	?

# Conclusion du projet

---

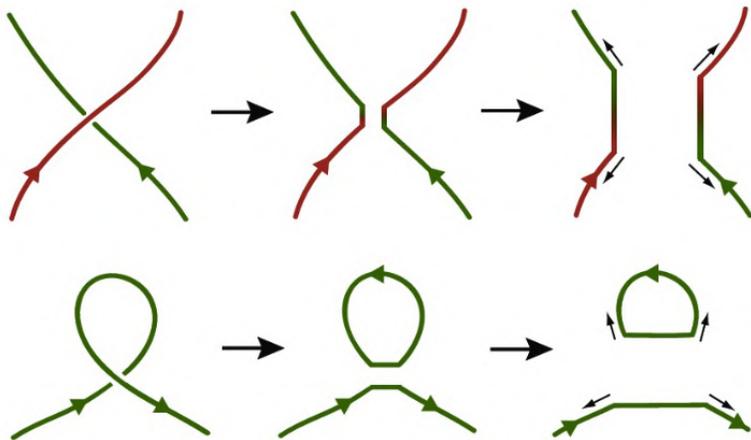
- Utilisation des corrélations-croisées très pertinente à condition d'avoir beaucoup de cartes de polarisation et de température de luminosité
- Permet de mieux distinguer les surdensités par rapport aux prédictions du modèle standard
- Permet de mieux distinguer les surdensités avec du bruit expérimental
- Permet d'obtenir les mêmes résultats avec un modèle approximé

---

Merci de votre attention

Remerciements: Robert H. Brandenberger, Hannah Fronenberg et tout le groupe McGill Early Universe

# Mécanisme de Kibble et solution d'échelle



- $\xi(t) \gg t$  : production rapide de boucle  $\xi(t)/t$  croît

- $\xi(t) \ll t$  : pas de production rapide de boucle  $\xi(t)/t$  décroît

# Notion de spectre de puissance de matière

---

Définition de la variation de densité :  $\delta(\mathbf{x}) = \frac{\rho(\mathbf{x}) - \bar{\rho}}{\bar{\rho}}$

Fonction de corrélation :  $\xi(r) = \langle \delta(\mathbf{x})\delta(\mathbf{x}') \rangle$

Lien avec le spectre de puissance :  $\xi(r) = \int \frac{d^3 k}{(2\pi)^3} P(k) e^{i\mathbf{k}\cdot(\mathbf{x}-\mathbf{x}')}$

# Groupe d'homotopie

---

Basée sur la notion de classe d'homotopie :

