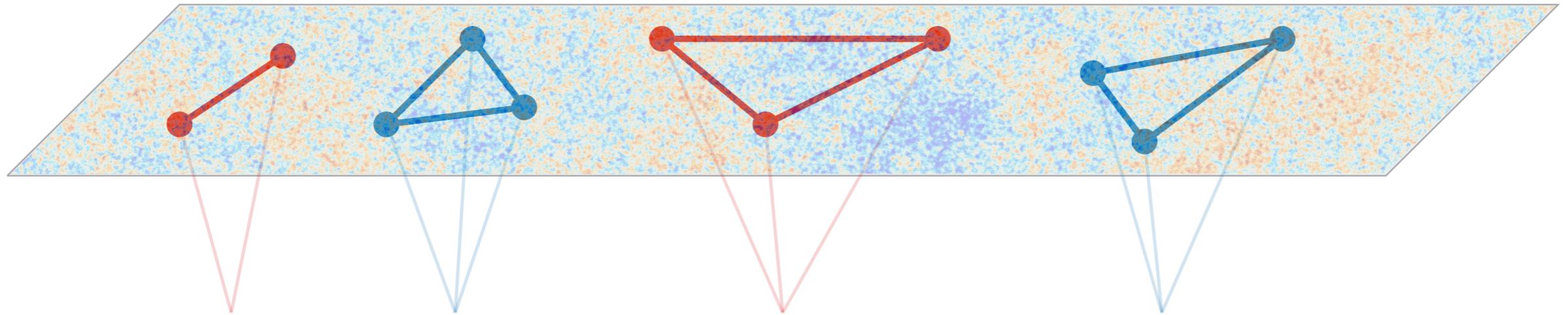


L'Inflation Cosmologique



Sonder la Physique des Hautes Énergies

Denis Werth

Société Astronomique de France

Commission Cosmologie

6 Avril 2024

Invitation à la Cosmologie Primordiale

Inflation Cosmologique

Sonder la Physique des Hautes Énergies

Invitation à la Cosmologie Primordiale

Ciel depuis Paris

Ciel depuis la Normandie



Ciel depuis le désert d'Atacama au Chili

Antennes d'ALMA

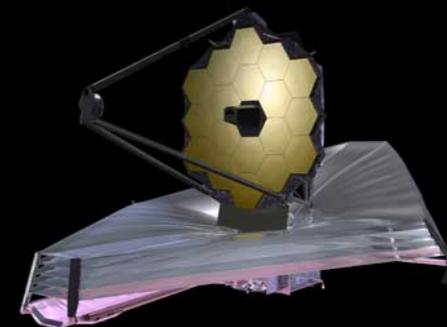


Ciel depuis le désert d'Atacama au Chili



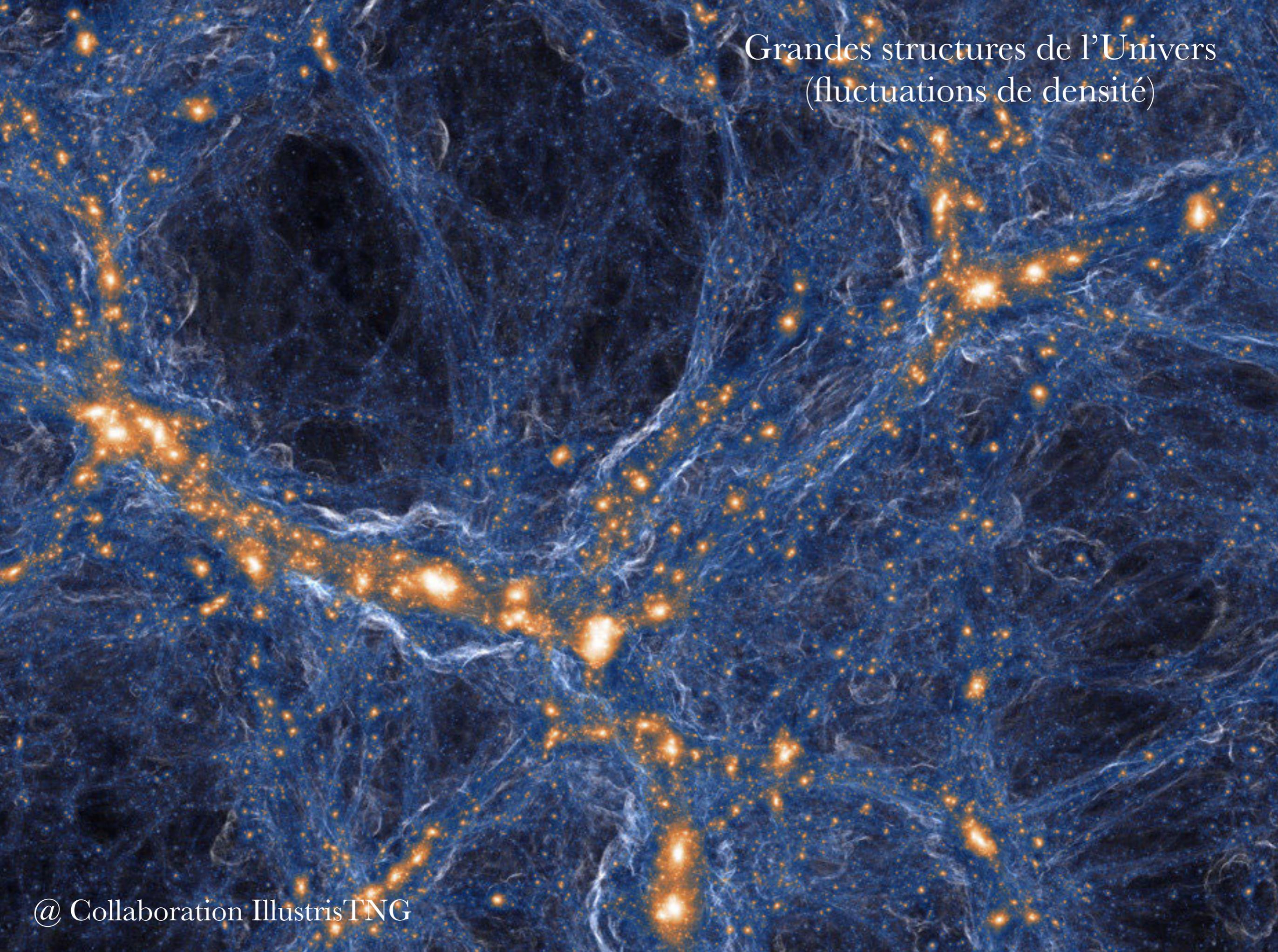
Antennes d'ALMA

Champ profond par le satellite James Webb



~ 10 000 galaxies

Grandes structures de l'Univers
(fluctuations de densité)

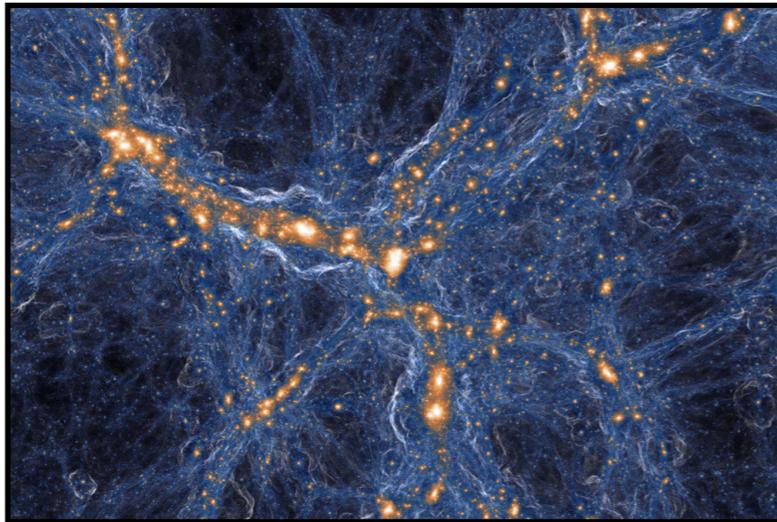


Statistique des Fluctuations de densité

La physique est encodée dans les propriétés statistiques des fluctuations de densité

$$\mathbb{P}[\varphi(\mathbf{x})] \sim \exp \left[-\frac{1}{2} \int_{\mathbf{k}_i} \langle \varphi_{\mathbf{k}_1} \varphi_{\mathbf{k}_2} \rangle \varphi_{\mathbf{k}_1} \varphi_{\mathbf{k}_2} + \frac{1}{3!} \int_{\mathbf{k}_i} \langle \varphi_{\mathbf{k}_1} \varphi_{\mathbf{k}_2} \varphi_{\mathbf{k}_3} \rangle \varphi_{\mathbf{k}_1} \varphi_{\mathbf{k}_2} \varphi_{\mathbf{k}_3} + \dots \right]$$

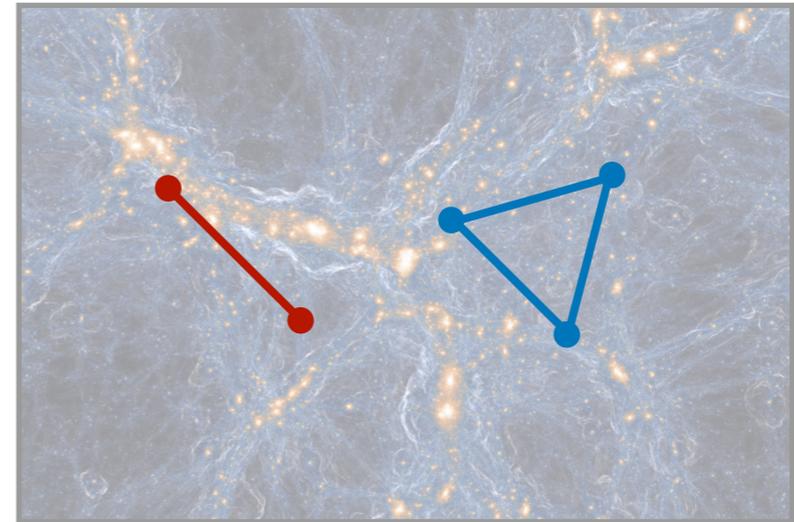
$\mathbb{P}[\varphi(\mathbf{x})]$



Distribution de probabilité
d'une configuration donnée



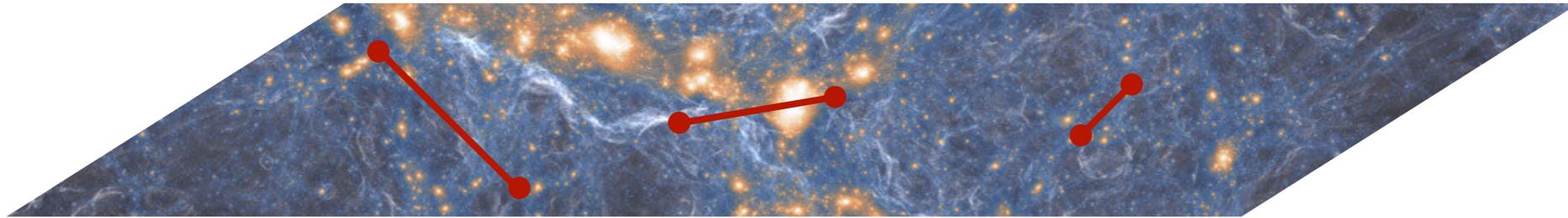
$\langle \varphi_{\mathbf{k}_1} \varphi_{\mathbf{k}_2} \rangle$ $\langle \varphi_{\mathbf{k}_1} \varphi_{\mathbf{k}_2} \varphi_{\mathbf{k}_3} \rangle$



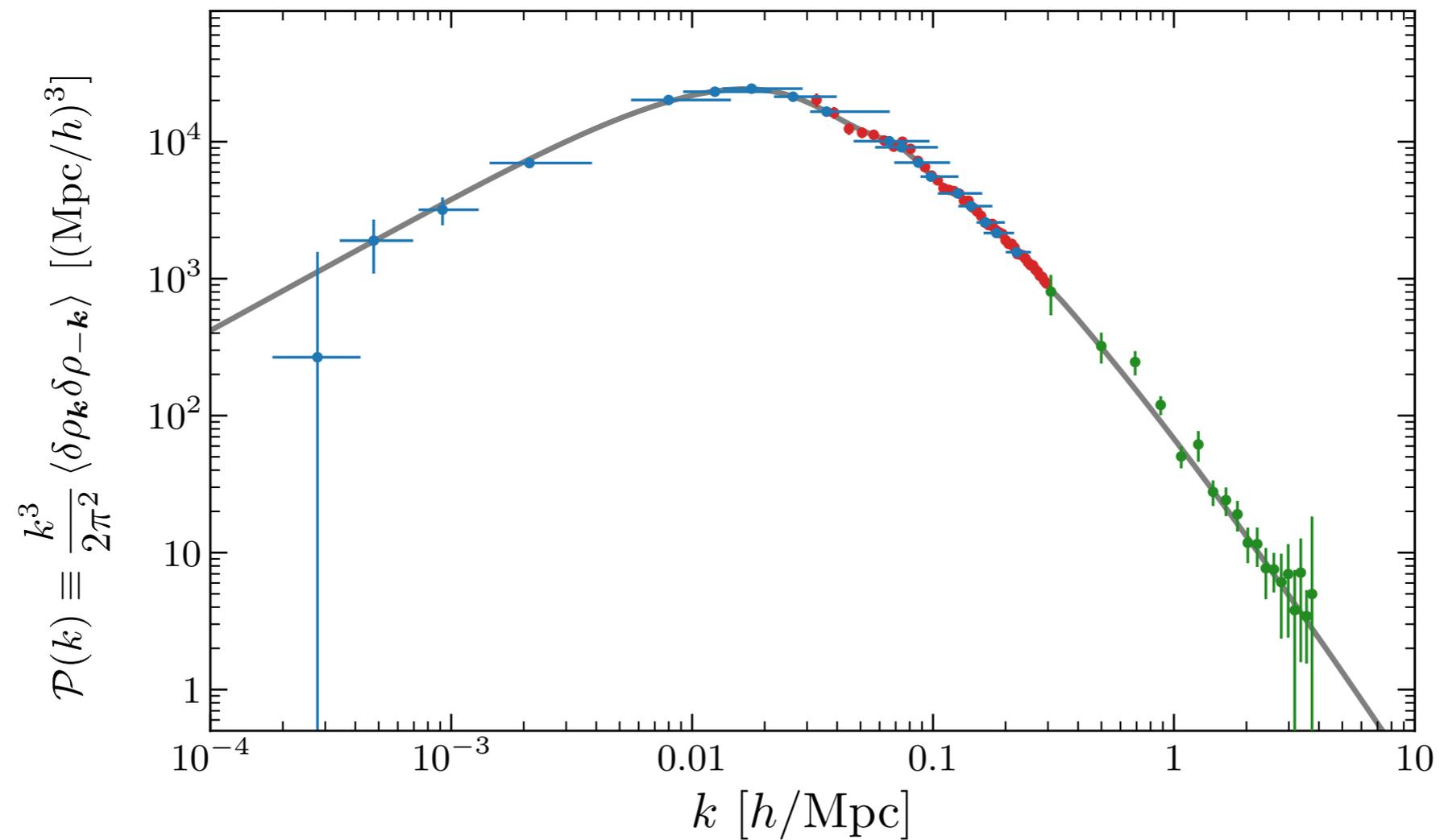
Fonctions de corrélation

Spectre de Puissance de la Matière

Les structures cosmologiques sont corrélées aux grandes échelles



Grandes structures de l'Univers



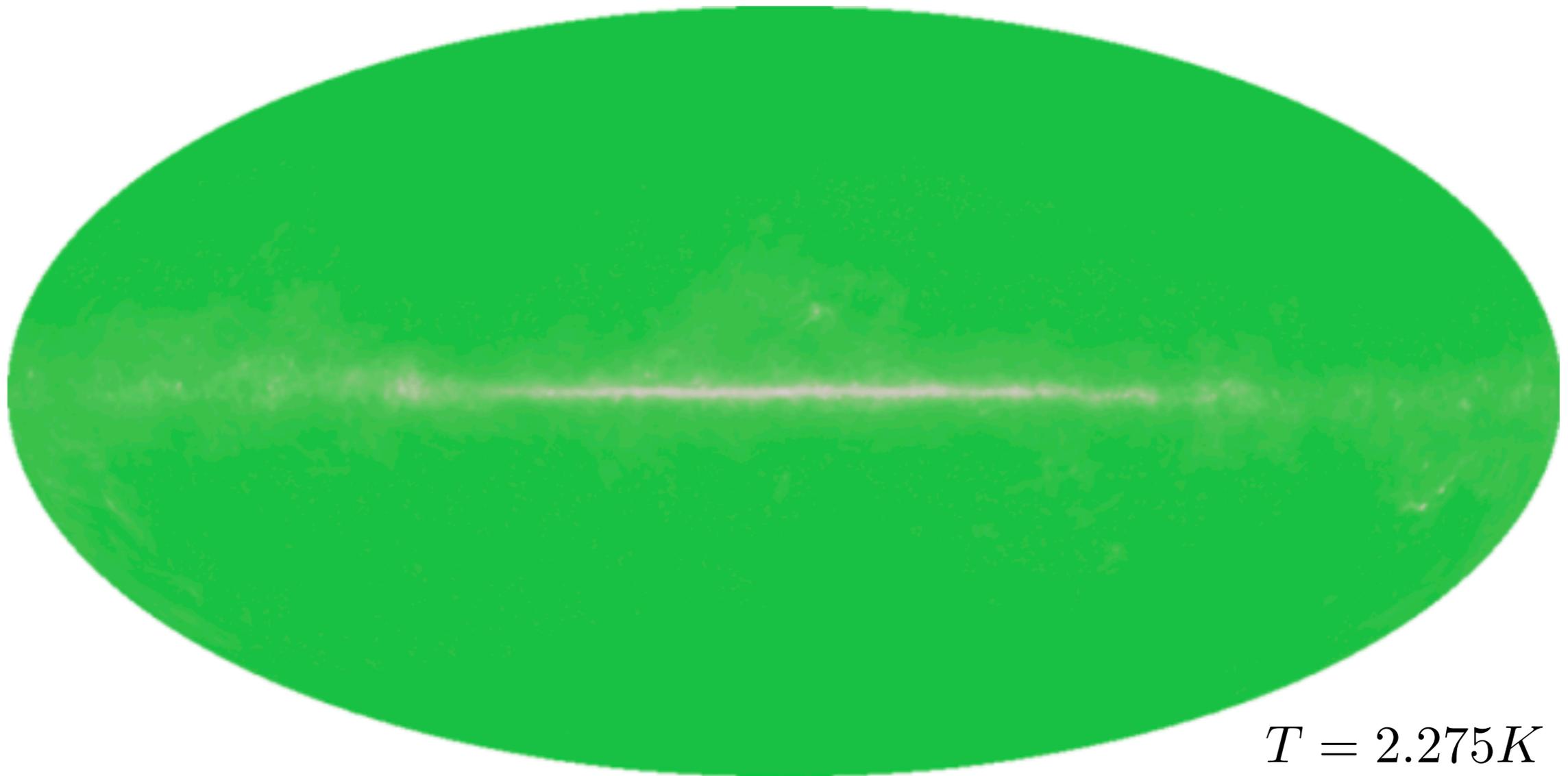
A visualization of the cosmic web, showing a complex network of blue filaments and nodes against a dark background. Numerous bright yellow and orange spots, representing galaxies, are scattered throughout the structure, with some concentrated in clusters and others along the filaments.

D'où viennent ces fluctuations de densité ?

Pour le savoir, il faut remonter le temps...

Fond Diffus Cosmologique : Monopole

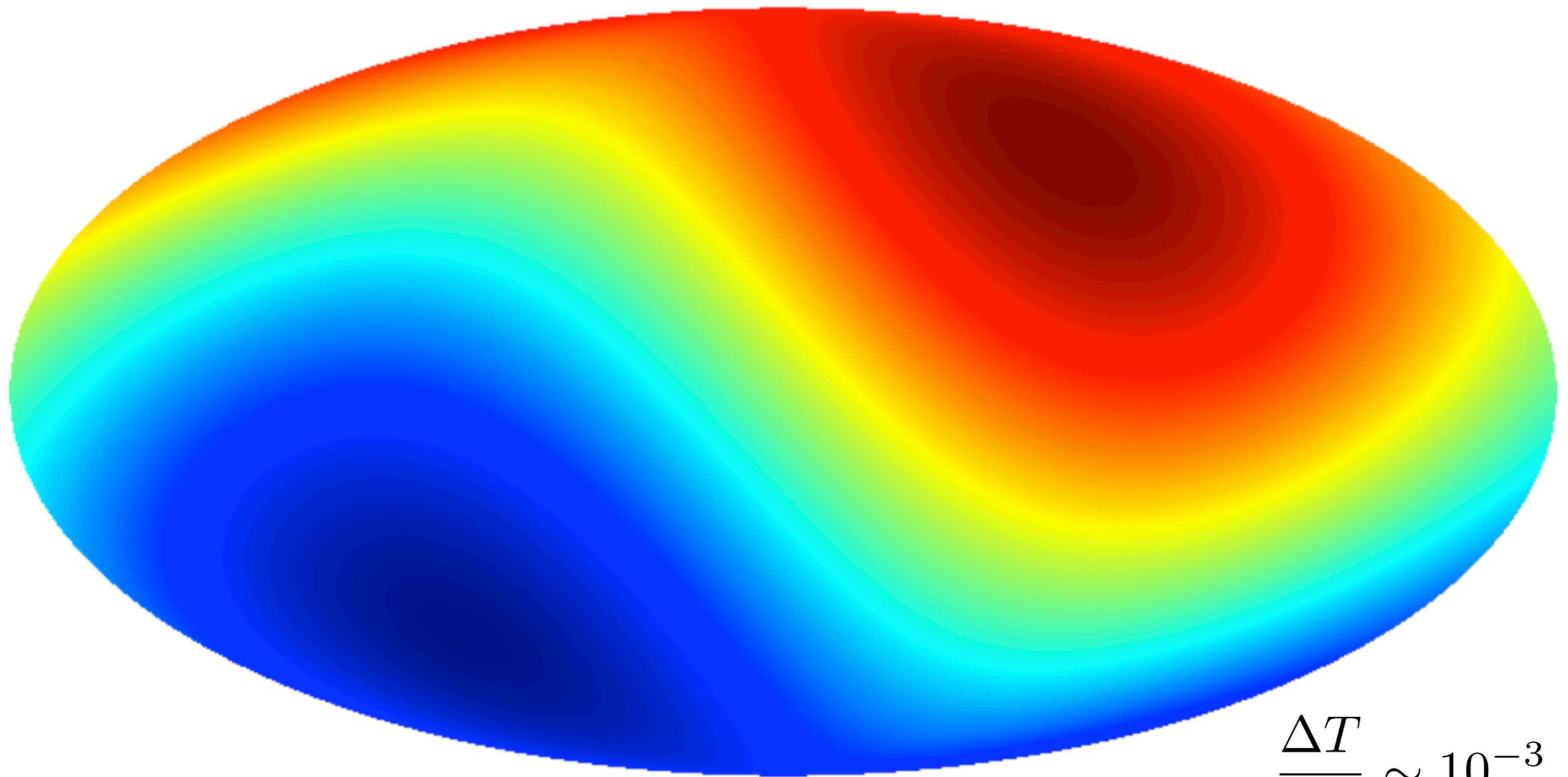
380 000 ans après le “Big Bang”, les atomes se forment et la première lumière est émise



Signal micro-onde uniforme dans toutes les directions (monopole)

Fond Diffus Cosmologique : Dipole

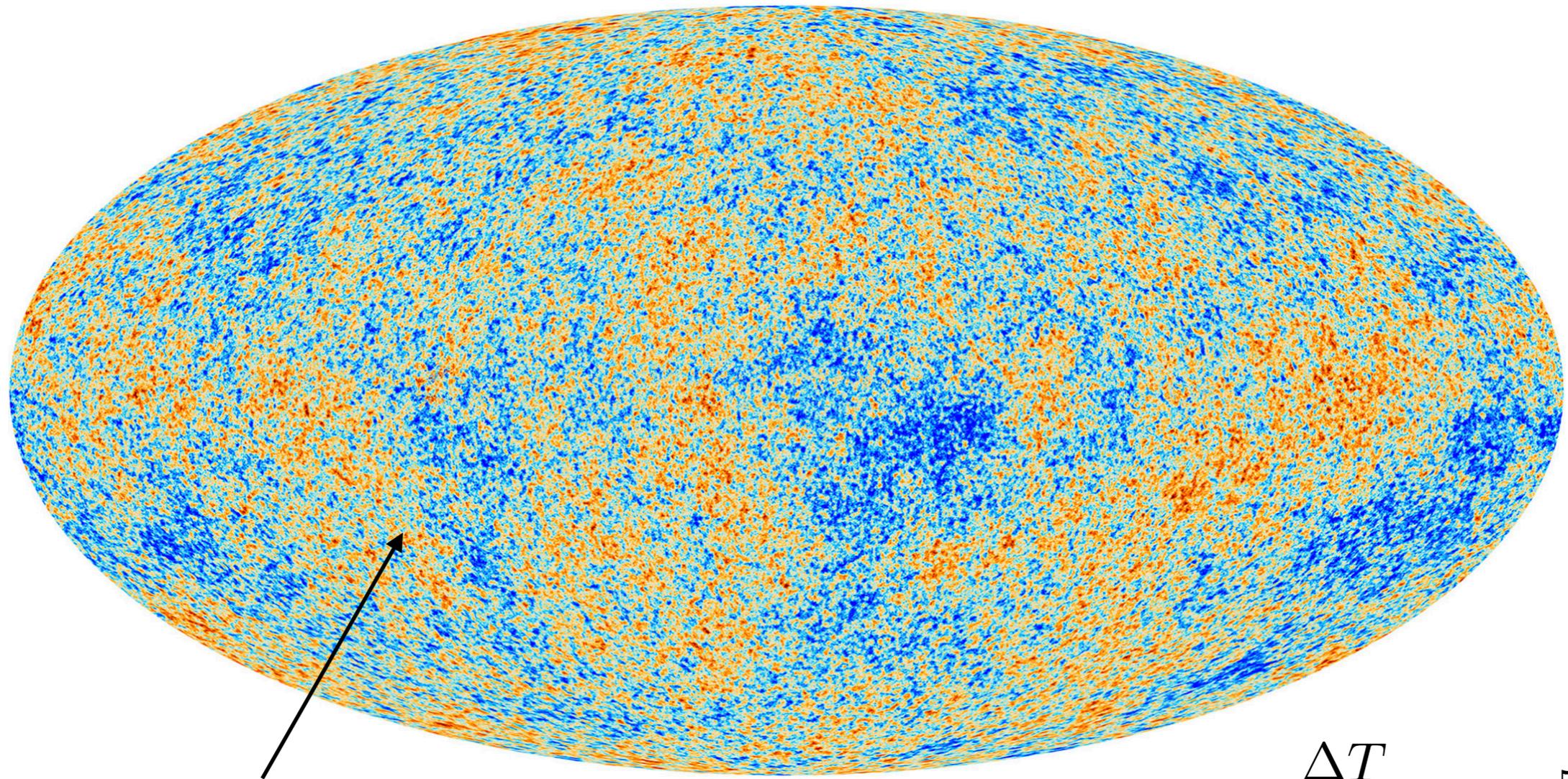
Le signal contient un dipole dû à l'effet Doppler



$$\frac{\Delta T}{T} \sim 10^{-3}$$

Fond Diffus Cosmologique : Anisotropies

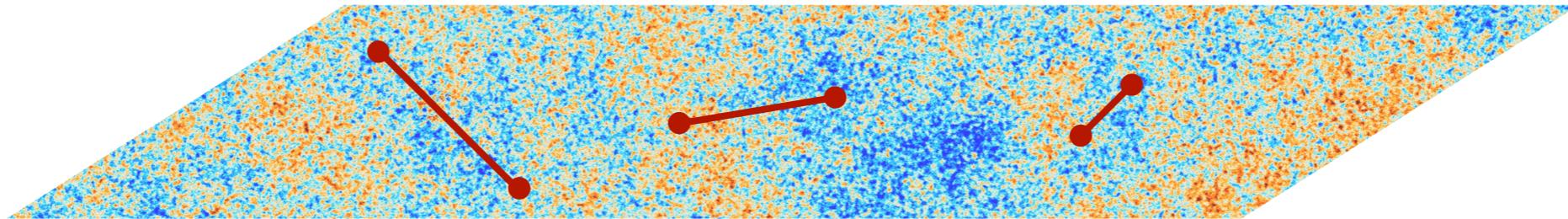
En soustrayant le dipole, nous voyons des anisotropies de température



Zones chaudes correspondent
à des régions denses

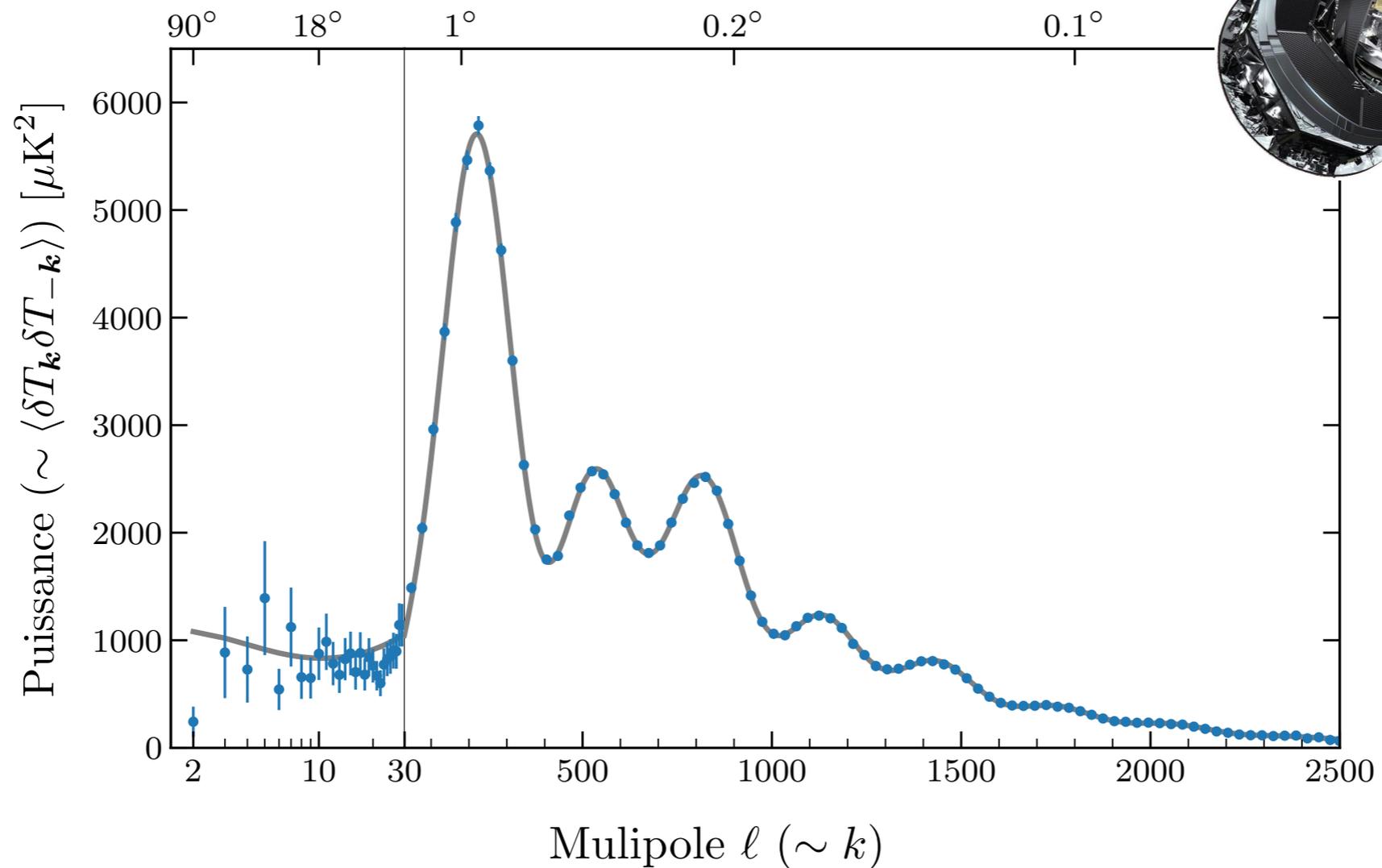
$$\frac{\Delta T}{T} \sim 10^{-5}$$

Spectre de Puissance du Fond Diffus Cosmologique



Fond diffus cosmologique

Satellite Planck



Le Modèle Cosmologique Λ CDM

Matière ordinaire

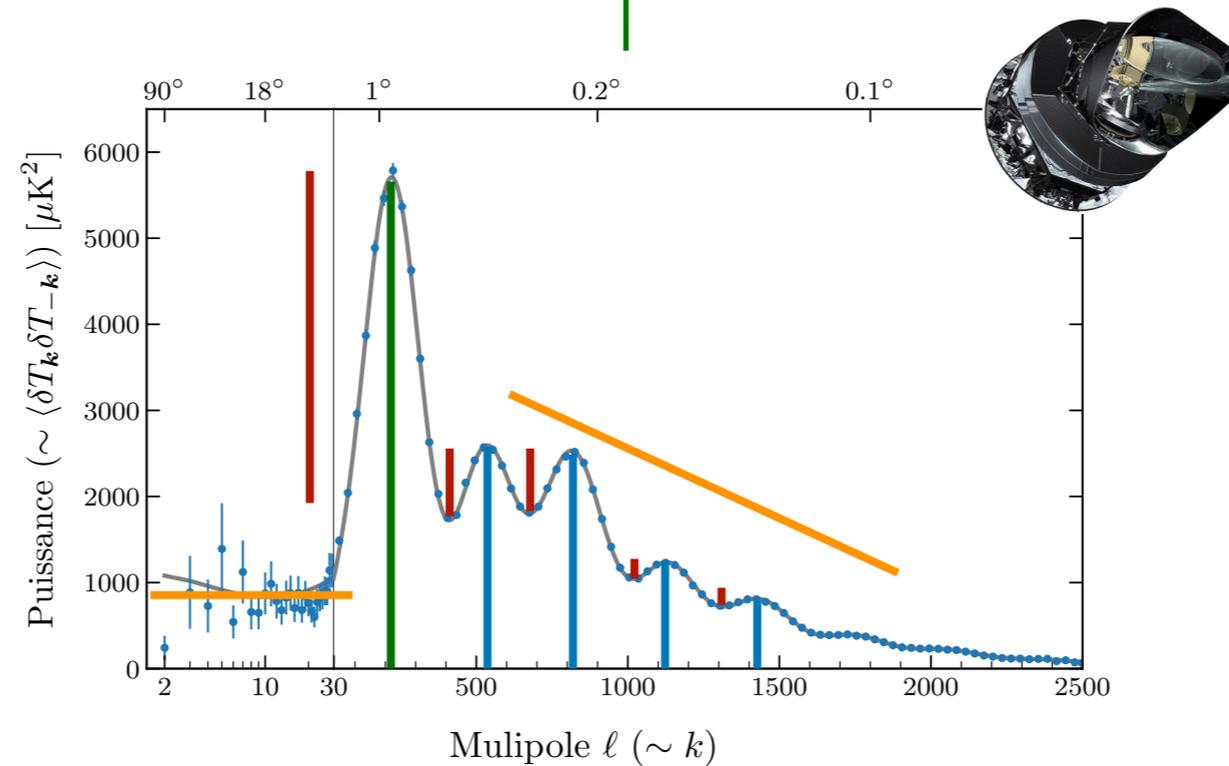
Ω_b

Énergie noire

Ω_Λ

Matière noire

Ω_m



Amplitude et dépendance d'échelle
des fluctuations de densité

A_s, n_s

Le Modèle Cosmologique Λ CDM (en crise ?)

Pourquoi plus de matière
que d'anti-matière ?

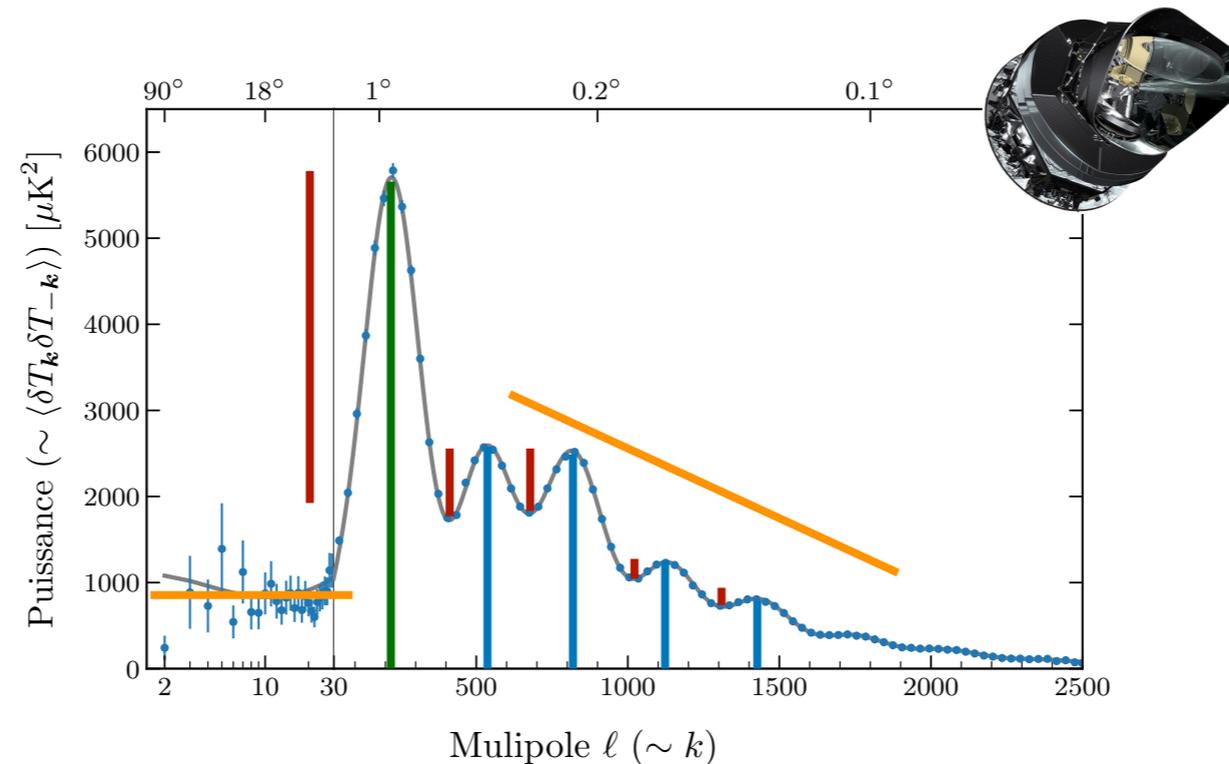
$$\Omega_b$$

Qu'est ce que
l'énergie noire ?

$$\Omega_\Lambda$$

Qu'est ce que la
matière noire ?

$$\Omega_m$$



Quelle est l'origine des fluctuations de densité ?

$$A_s, n_s$$

Le Modèle Cosmologique Λ CDM (en crise ?)

Pourquoi plus de matière
que d'anti-matière ?

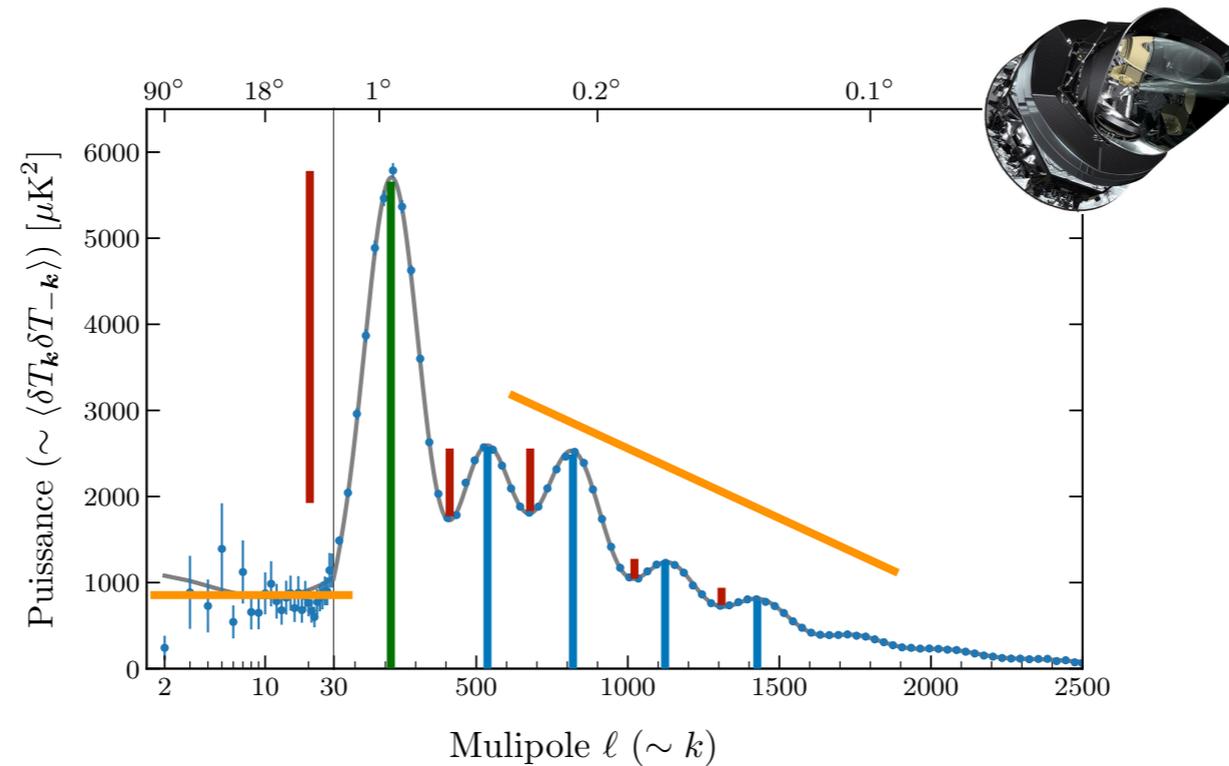
$$\Omega_b$$

Qu'est ce que
l'énergie noire ?

$$\Omega_\Lambda$$

Qu'est ce que la
matière noire ?

$$\Omega_m$$



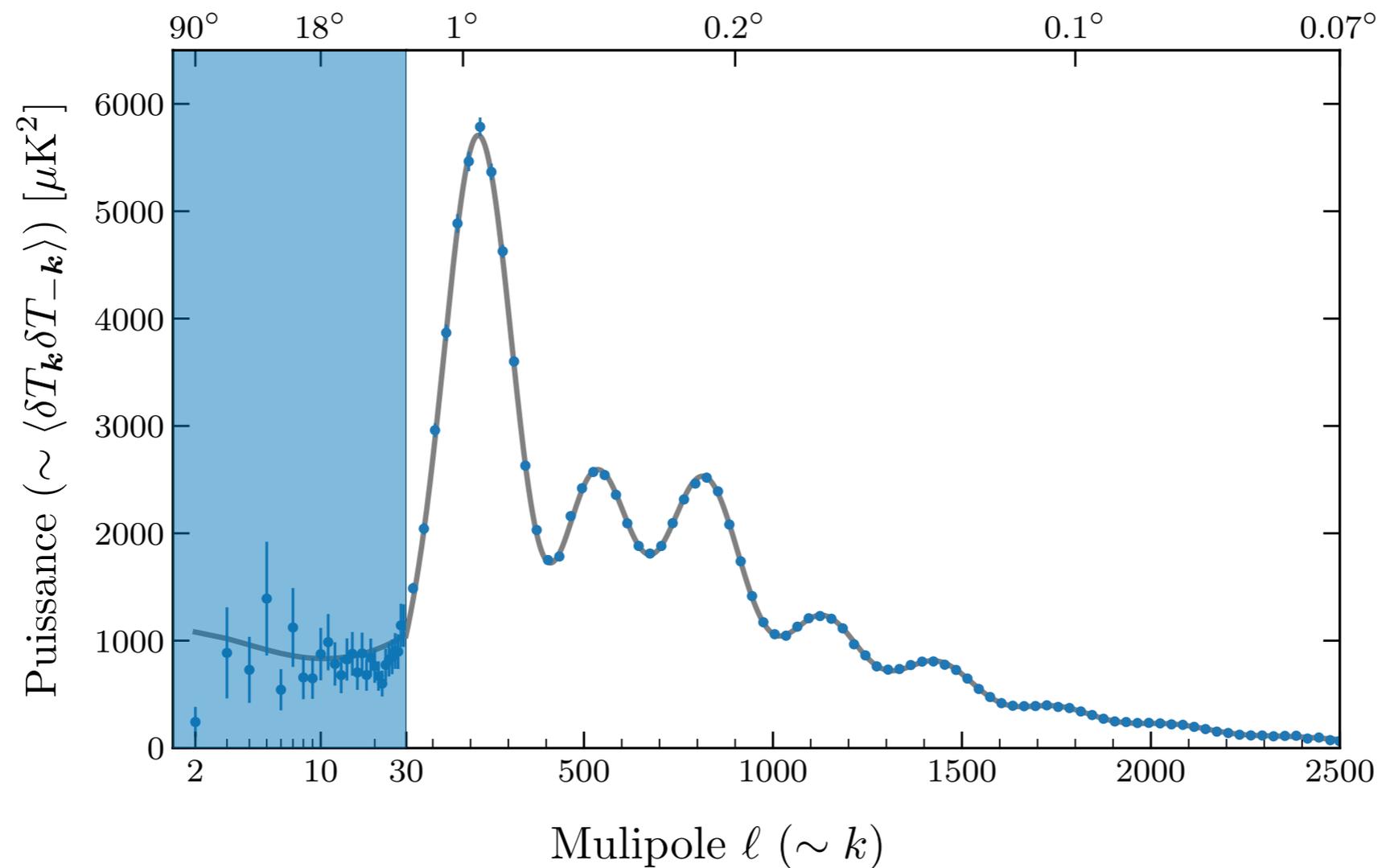
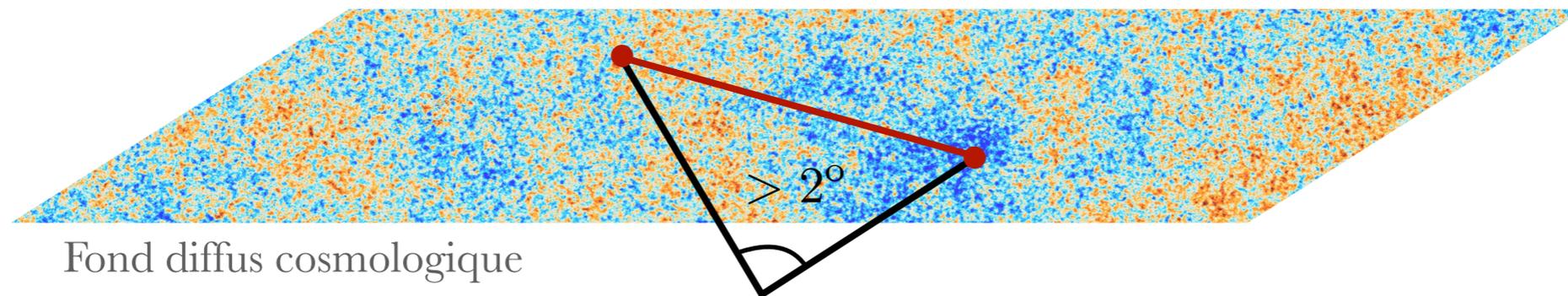
Quelle est l'origine des fluctuations de densité ?

$$A_s, n_s$$

Inflation Cosmologique

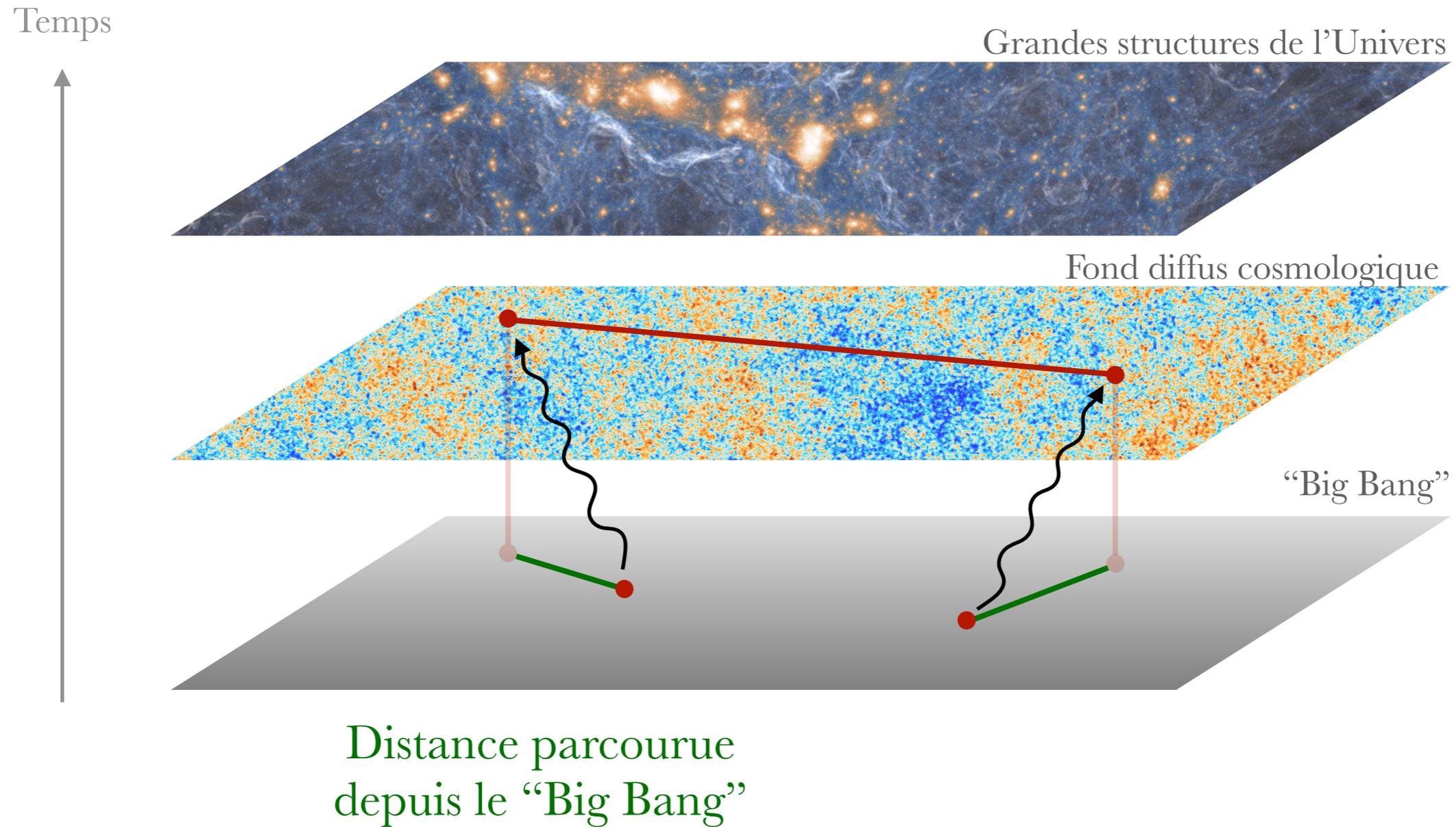
Correlations super-Horizons

Les fluctuations de densité sont corrélées à des échelles causalement déconnectées



Le Problème de l'Horizon

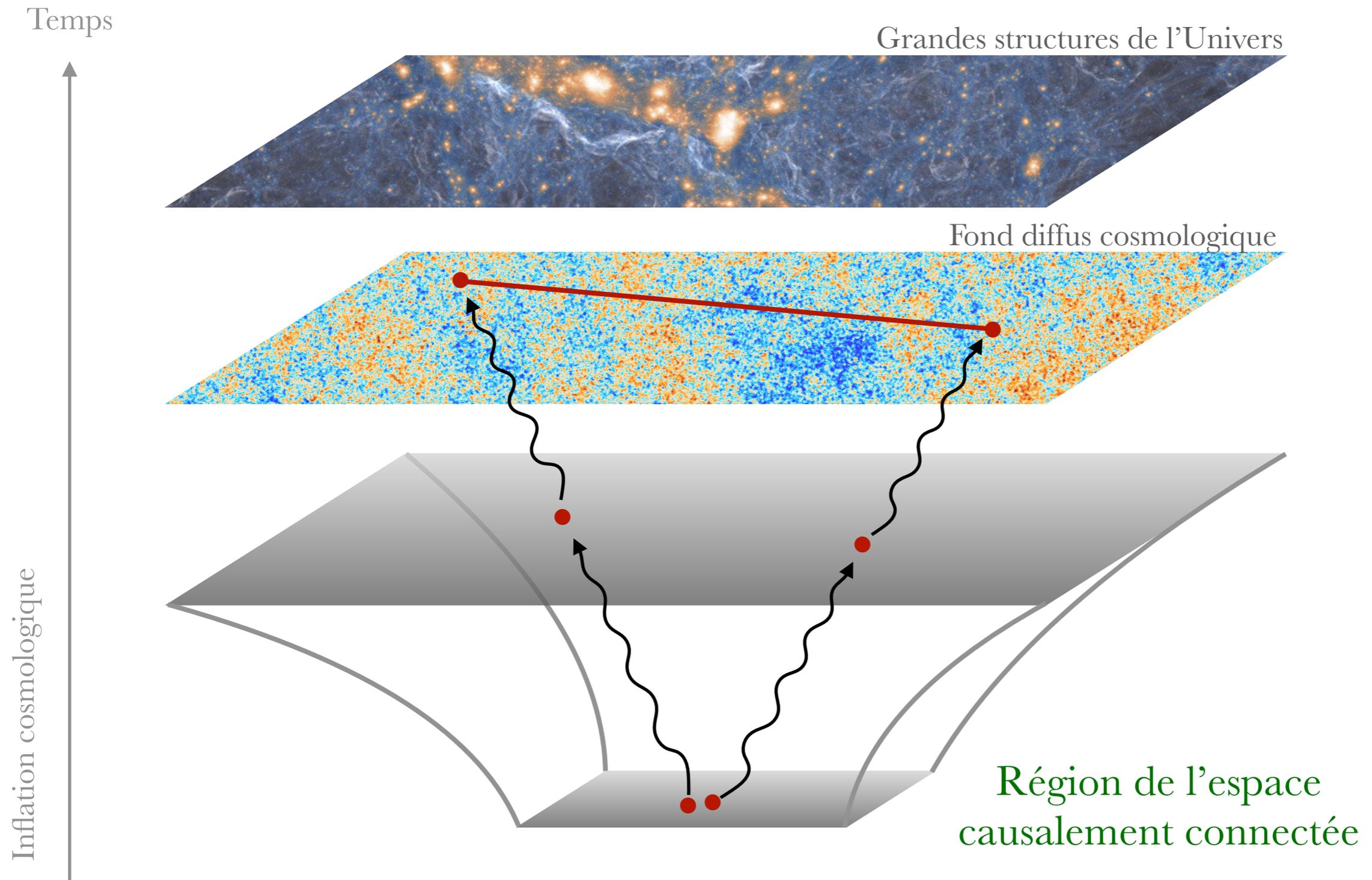
Selon le modèle standard du “Big Bang”, une corrélation super-horizon est impossible car cela viole la **causalité**



Les fluctuations primordiales doivent être créées avant le “Big Bang”

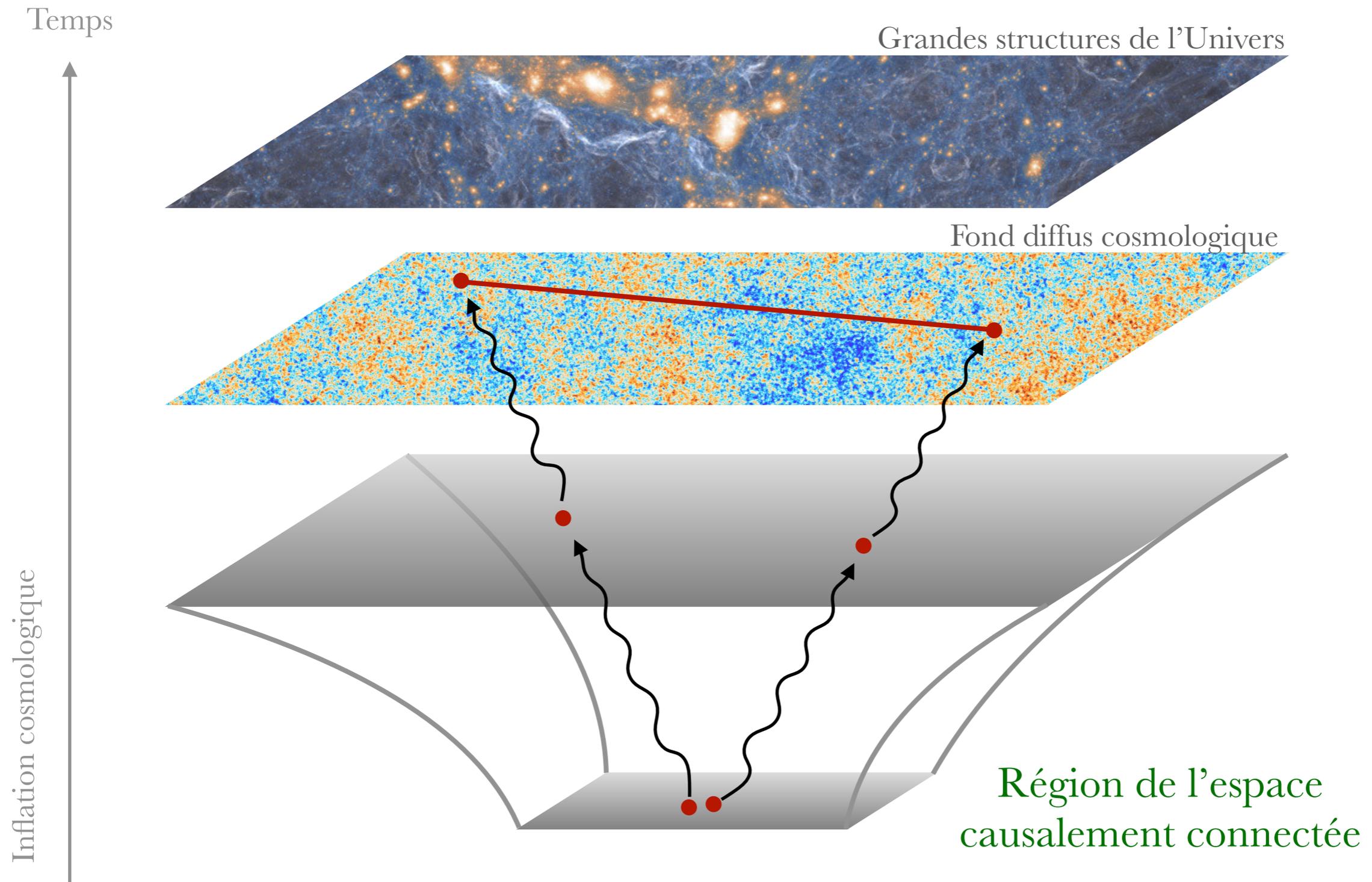
L'Inflation Cosmologique : Expansion Accélérée

Le problème de l'horizon peut être résolu si l'Univers s'étendait plus vite que la lumière



L'Inflation Cosmologique : Expansion Accélérée

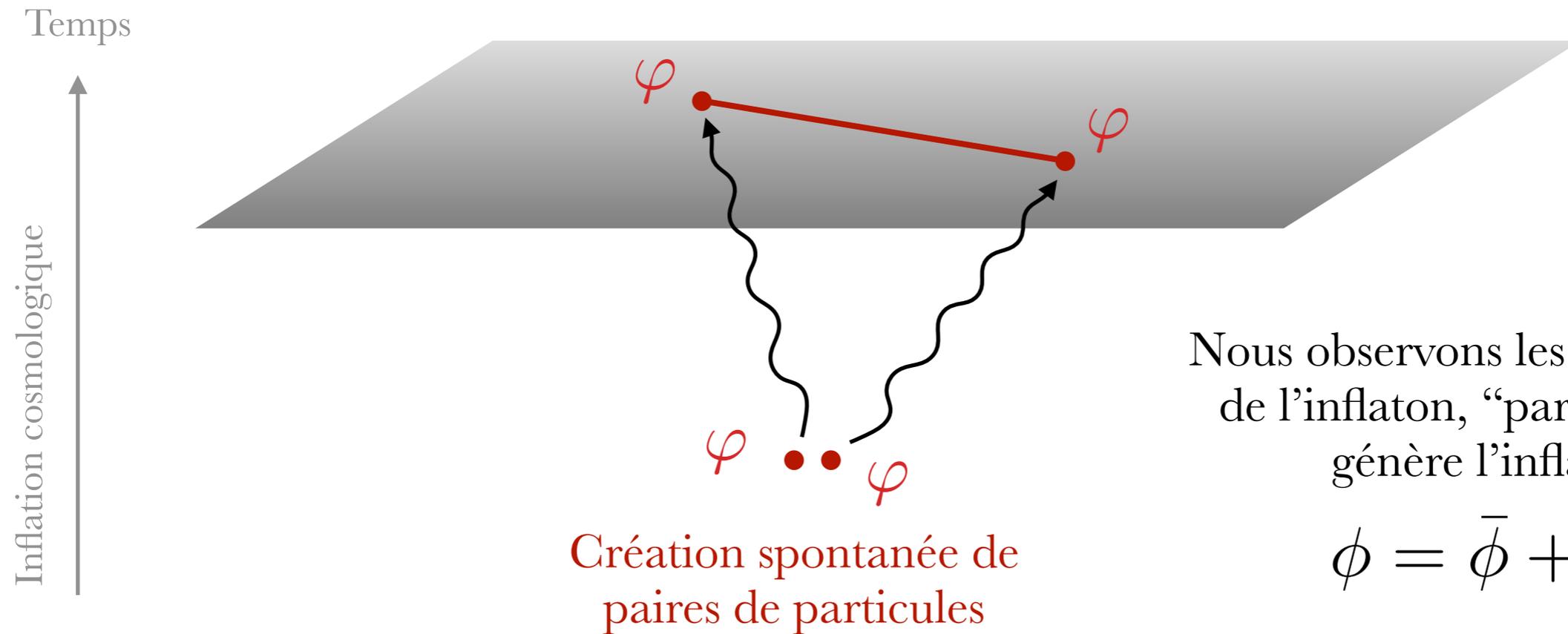
Le problème de l'horizon peut être résolu si l'Univers s'étendait plus vite que la lumière



Mais d'où viennent les fluctuations primordiales ?

Origine Quantique des Fluctuations de Densité

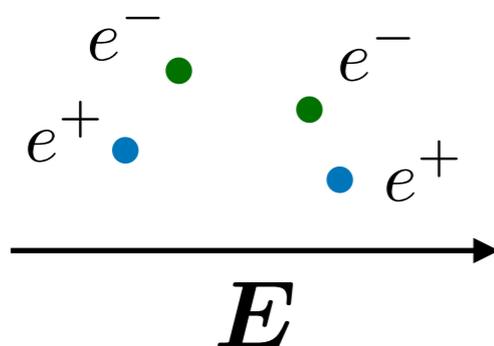
Pendant l'inflation, des fluctuations quantiques du vide sont amplifiées et étirées à des échelles super-horizons



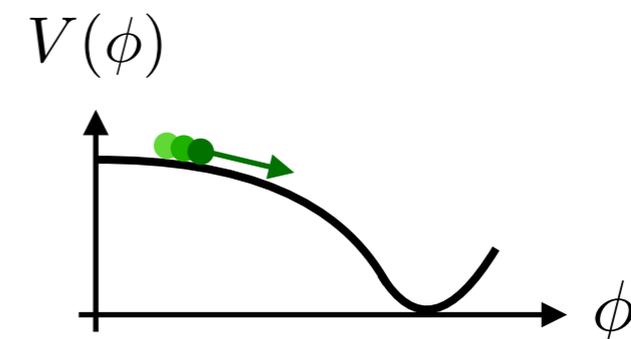
Nous observons les fluctuations de l'inflaton, "particule" qui génère l'inflation

$$\phi = \bar{\phi} + \varphi$$

Analogie de l'effet Schwinger

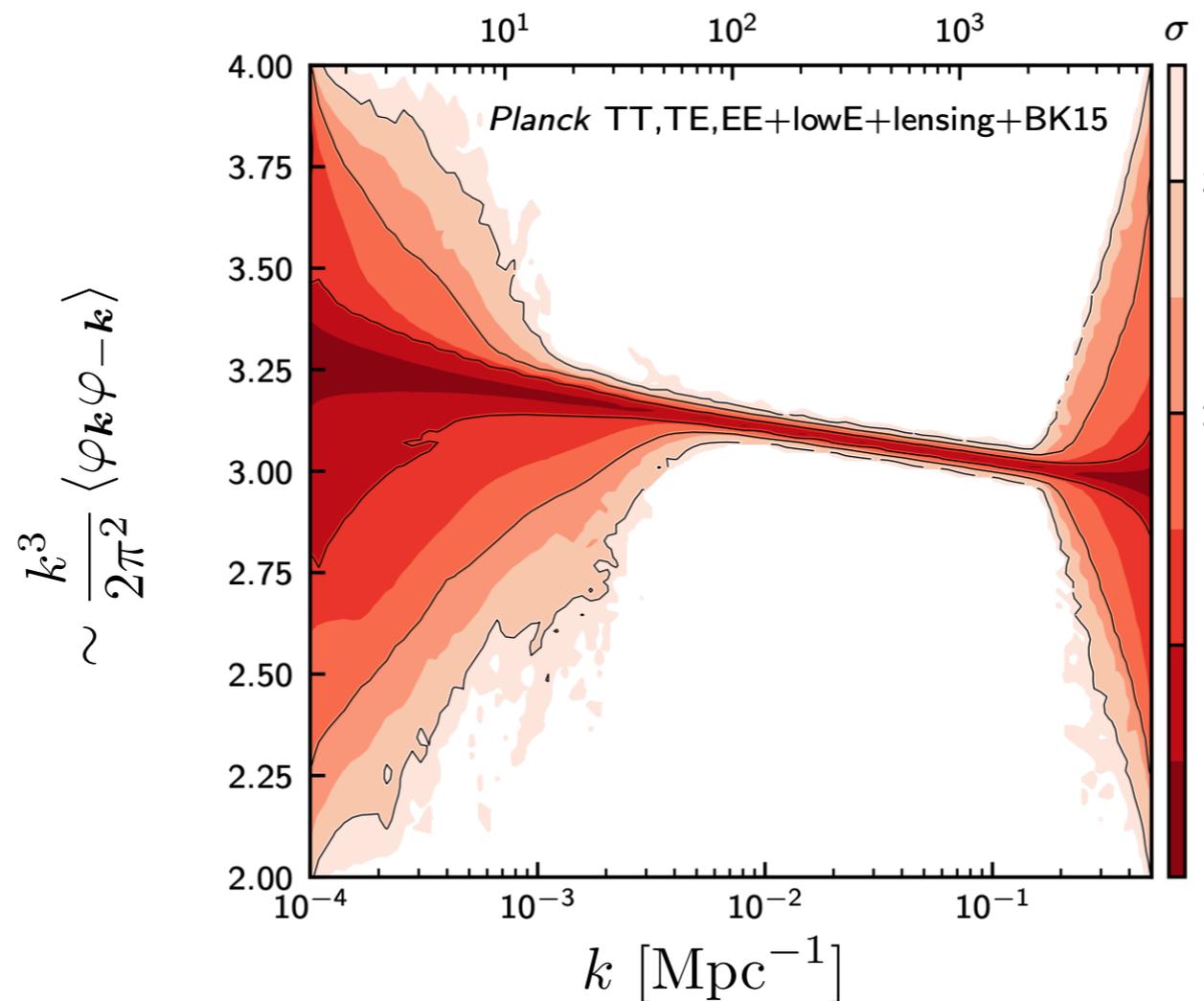
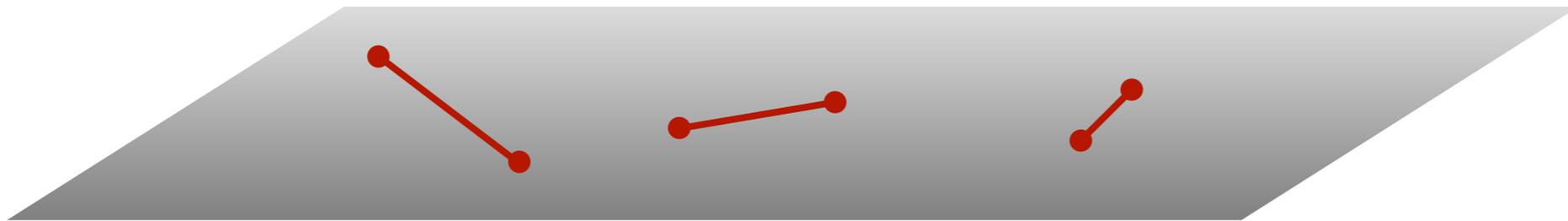


Champ scalaire : inflaton



Spectre de Puissance Primordial

La théorie de l'inflation (inflaton roulant le long d'un potentiel plat dont les fluctuations sont générées de manière quantique) est en parfait accord avec les observations



$$\mathcal{P}_\varphi \equiv A_s \left(\frac{k}{k_0} \right)^{n_s - 1}$$

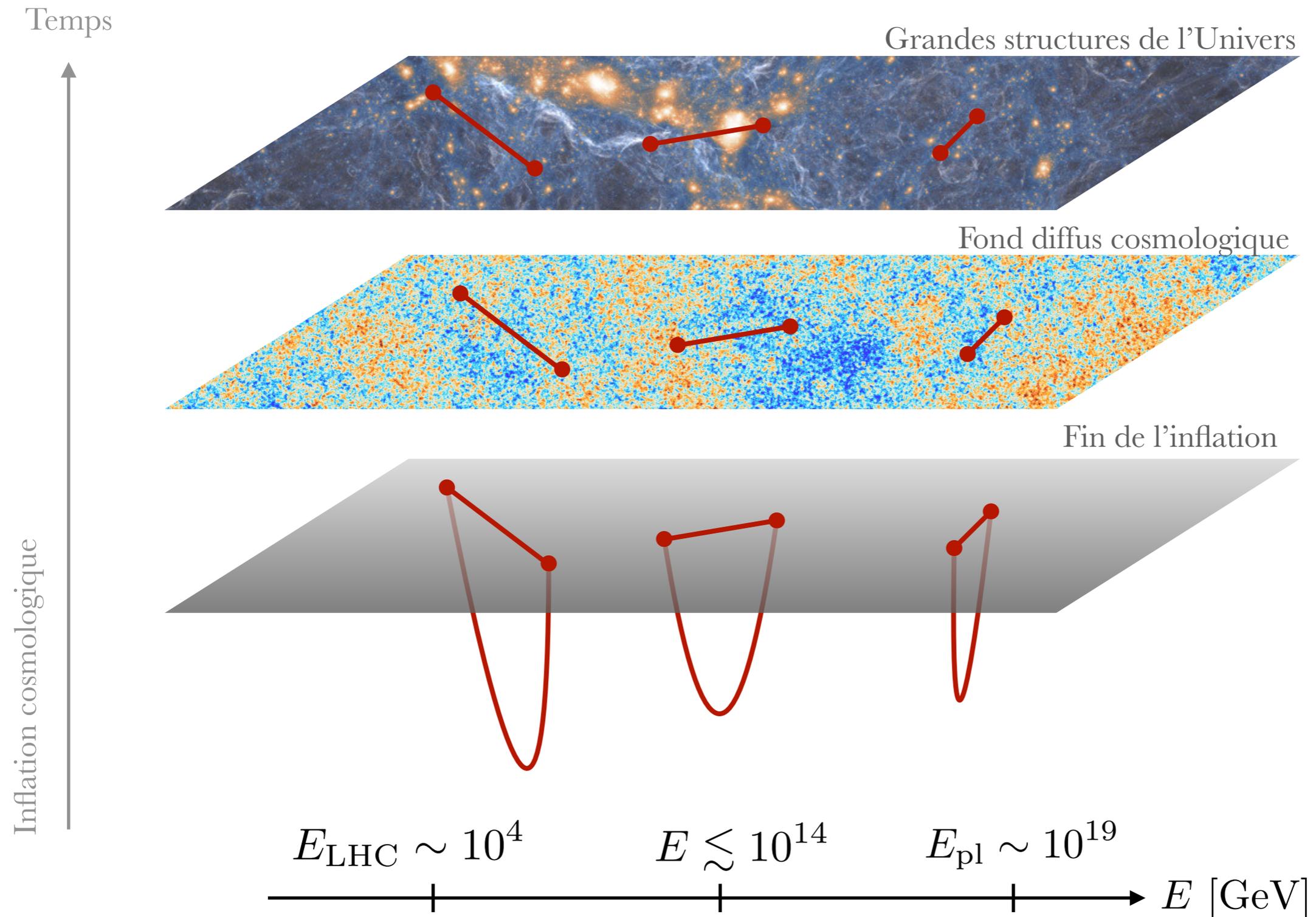
$$A_s = 2.1 \times 10^{-9}$$

$$n_s = 0.9649$$

Sonder la Physique des Hautes Énergies

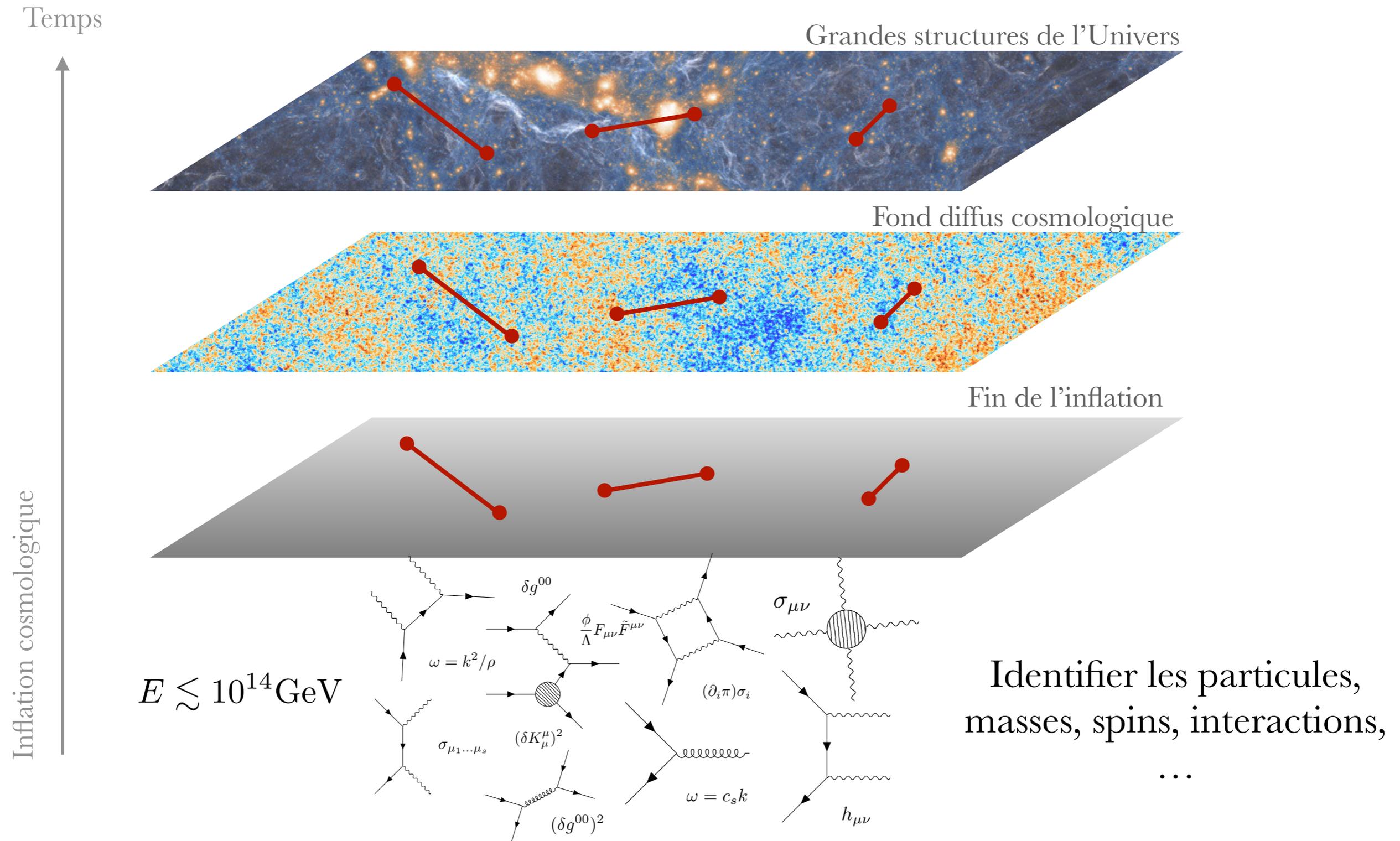
Échelle d'Énergie de l'Inflation

L'inflation est une sonde unique de la physique des **très hautes énergies**



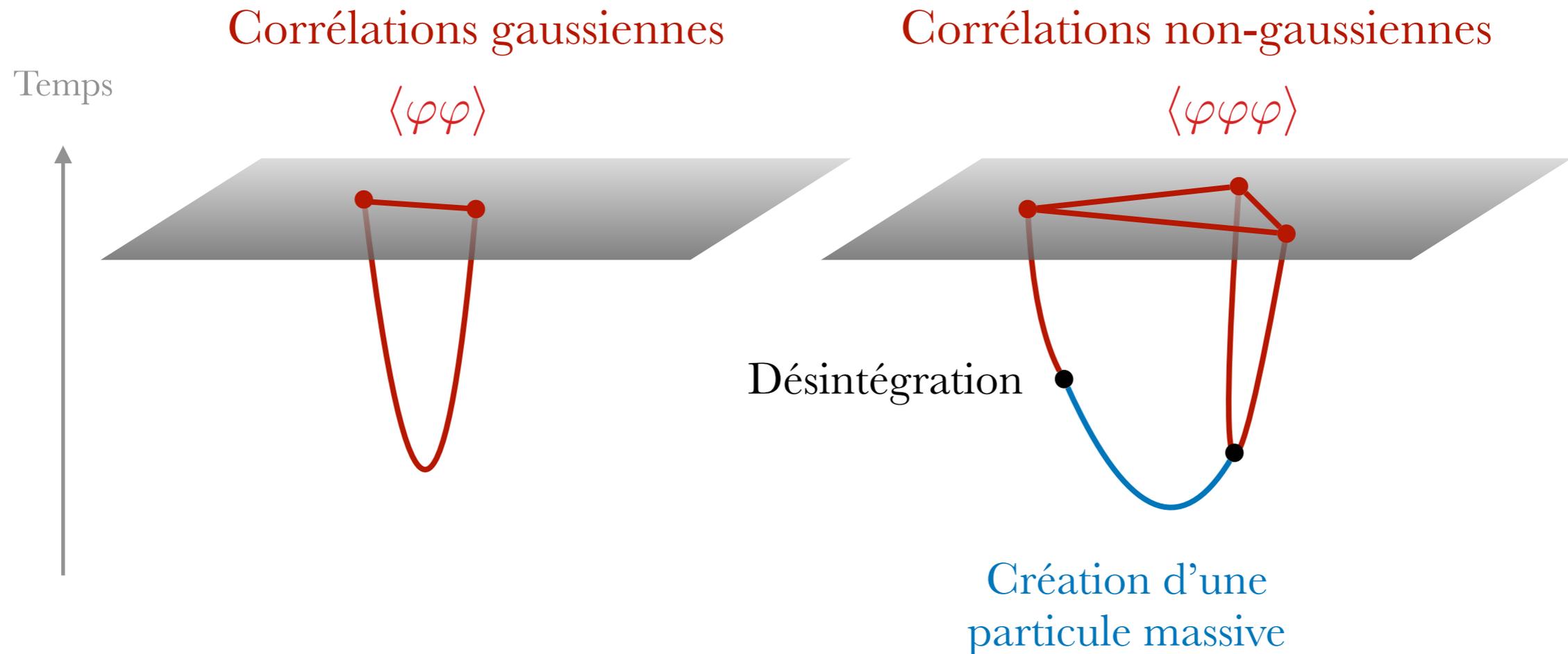
Vers un "Modèle Standard" de l'Inflation Cosmologique

Pendant l'inflation, des particules très massives pouvaient être produites



Non-Gaussianités primordiales

La désintégration de particules très massives laisse des empreintes dans les corrélateurs cosmologiques observés

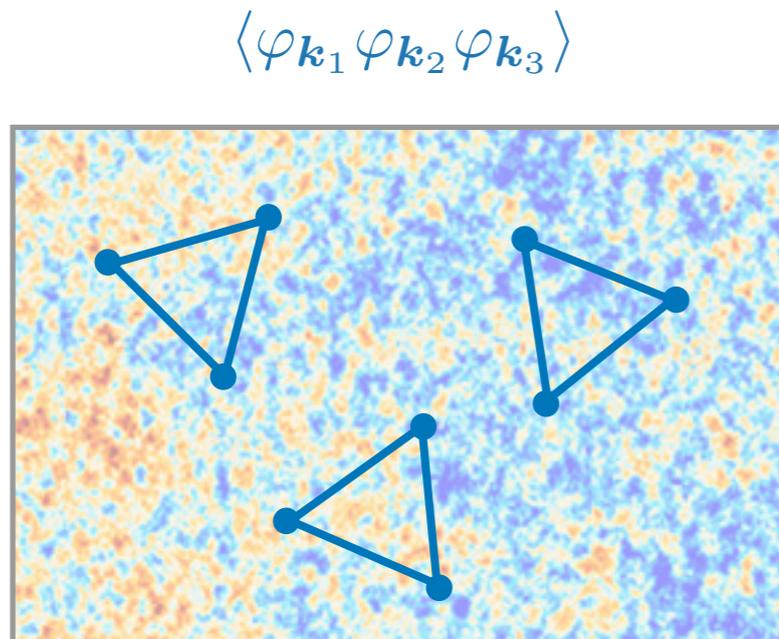


La physique de l'inflation est encodée dans les fonctions de corrélations d'ordre supérieur (> 2)

Bispectre : Fonctions de Corrélation à 3 points

La physique de l'inflation est sondée à travers la fonction de corrélation à 3 points

$$\mathbb{P}[\varphi(\boldsymbol{x})] \sim \exp \left[-\frac{1}{2} \int_{\mathbf{k}_i} \langle \varphi_{\mathbf{k}_1} \varphi_{\mathbf{k}_2} \rangle \varphi_{\mathbf{k}_1} \varphi_{\mathbf{k}_2} + \frac{1}{3!} \int_{\mathbf{k}_i} \langle \varphi_{\mathbf{k}_1} \varphi_{\mathbf{k}_2} \varphi_{\mathbf{k}_3} \rangle \varphi_{\mathbf{k}_1} \varphi_{\mathbf{k}_2} \varphi_{\mathbf{k}_3} + \dots \right]$$



Bispectre dans l'espace de Fourier

$$\langle \varphi_{\mathbf{k}_1} \varphi_{\mathbf{k}_2} \varphi_{\mathbf{k}_3} \rangle =$$

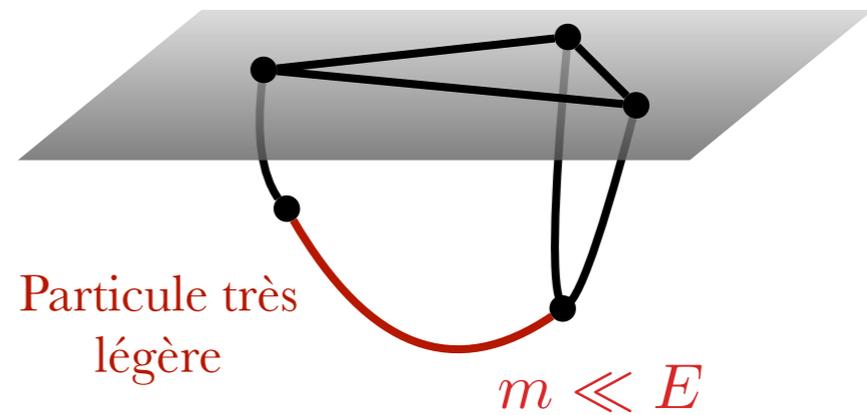
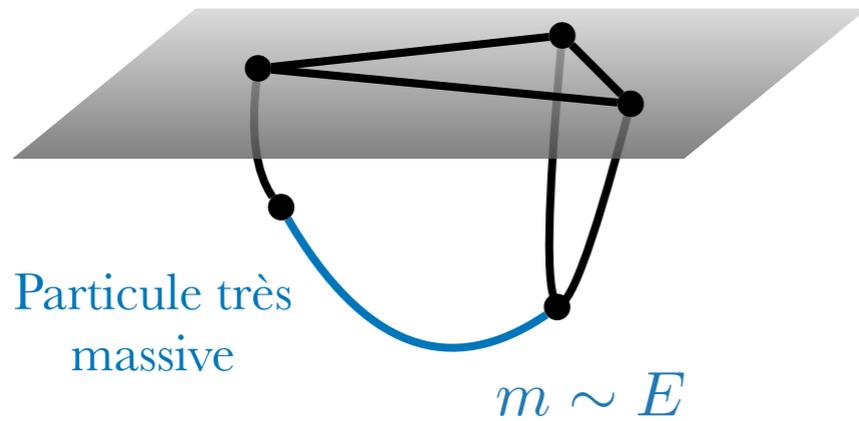
● Amplitude : f_{NL}

● Dépendance de forme : $S(k_1, k_2, k_3)$

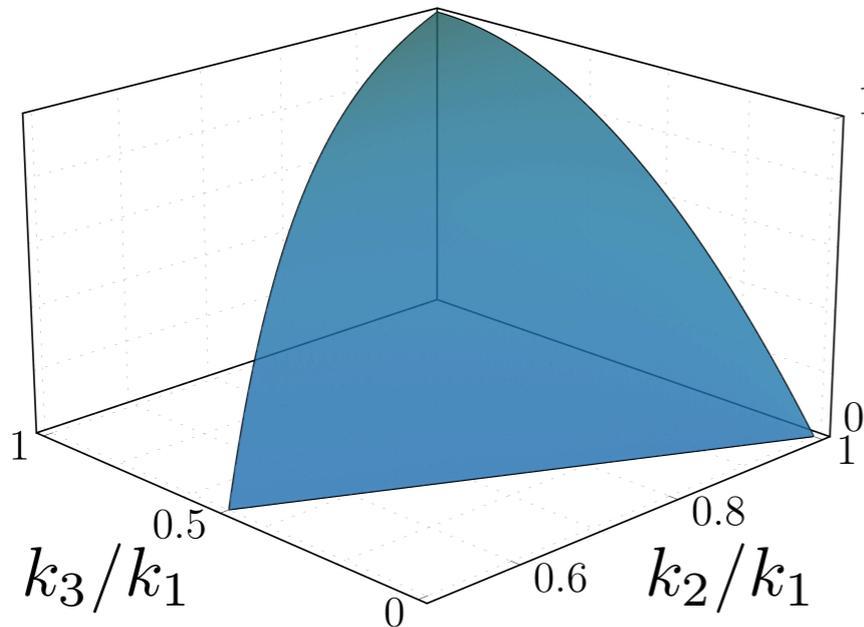
Le bispectre est une
“fonction de triangles”

Corrélateurs Cosmologiques pour Sonder la Physique

Le bispectre encode la physique de l'inflation
(= contenu en particules, interactions, masses, spins, etc)

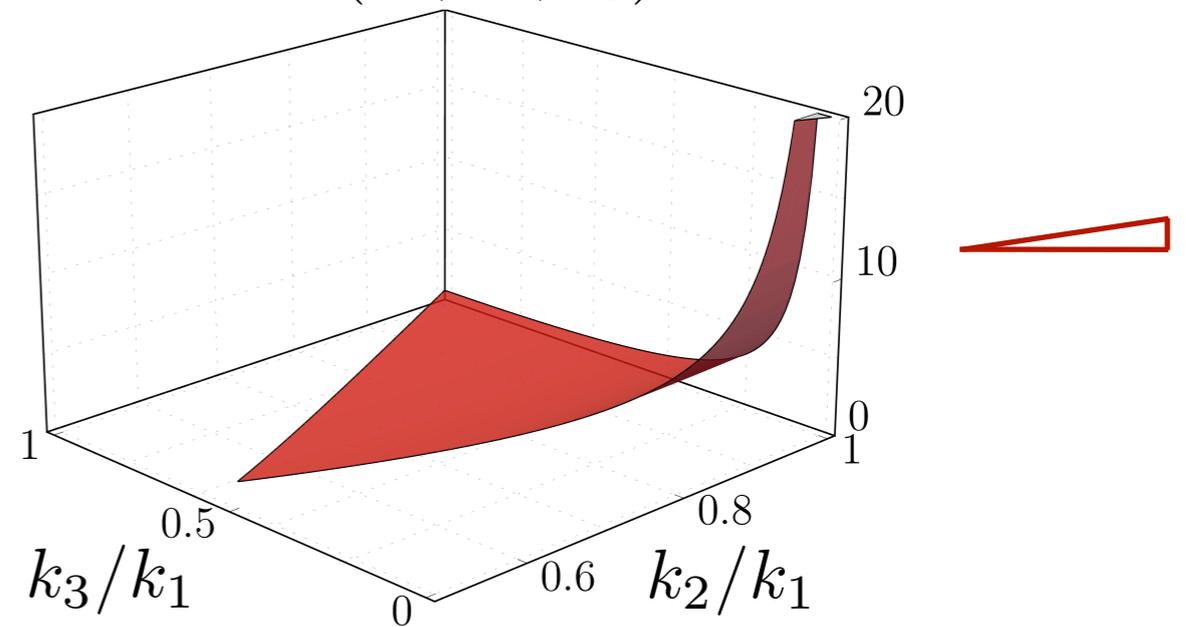


$$S^{\text{eq}}(k_1, k_2, k_3)$$



$$f_{\text{NL}}^{\text{eq}} = -26 \pm 47$$

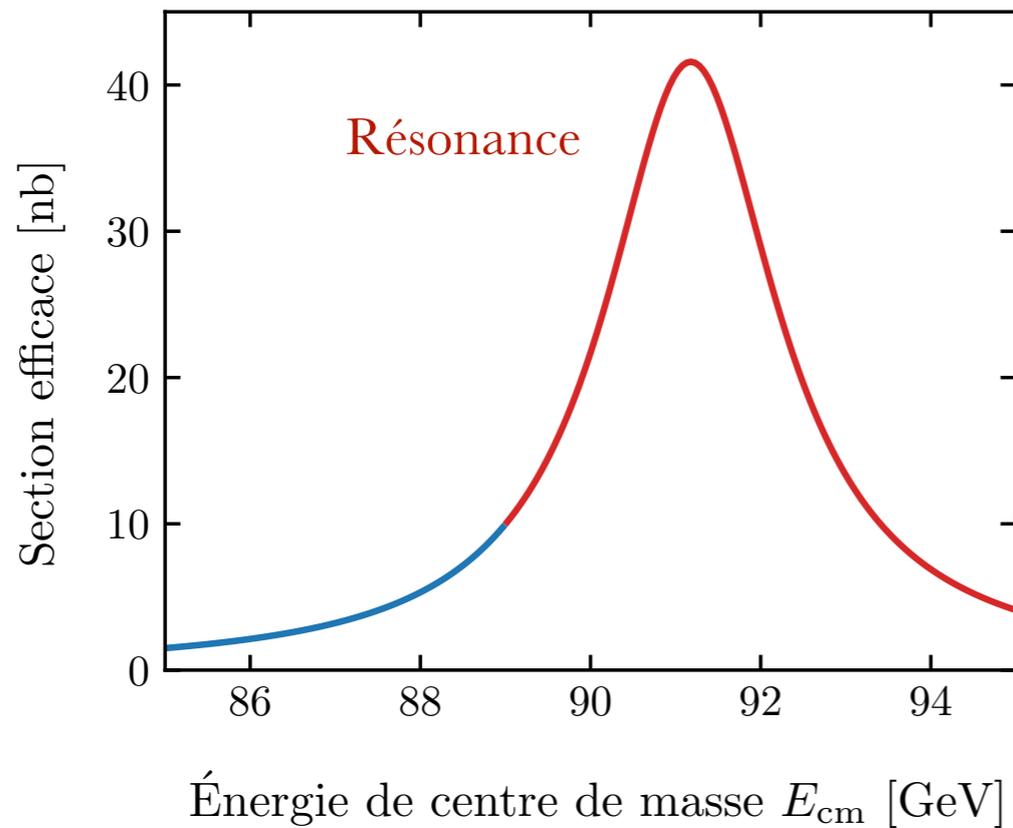
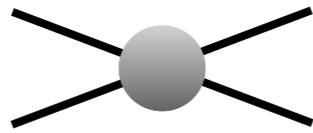
$$S^{\text{loc}}(k_1, k_2, k_3)$$



$$f_{\text{NL}}^{\text{loc}} = -0.9 \pm 5.1$$

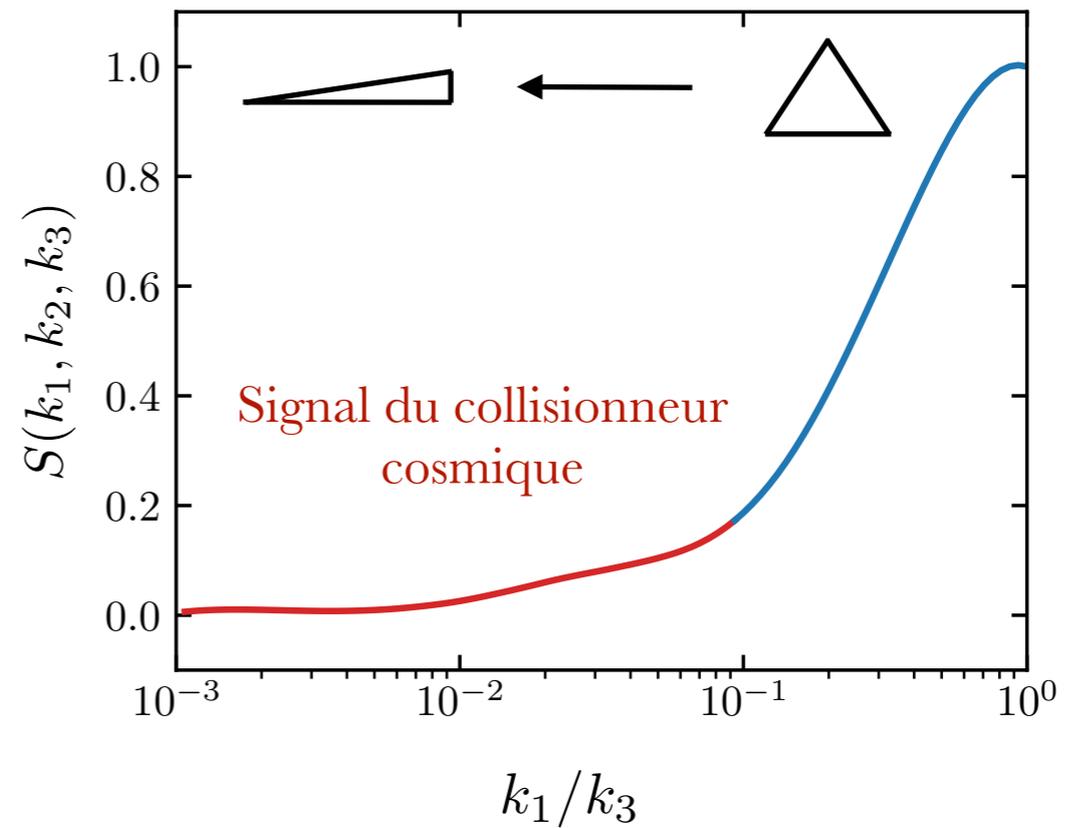
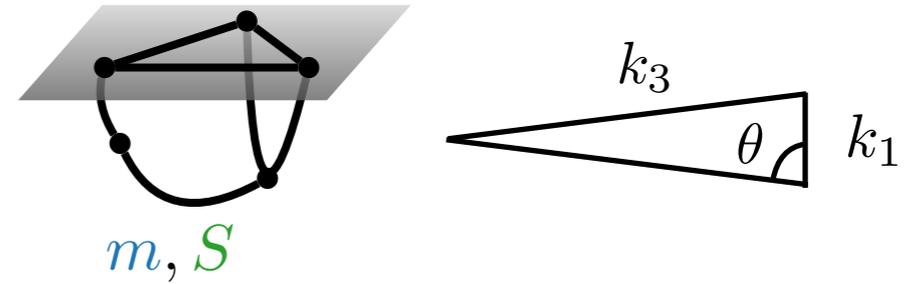
L'Inflation comme un Collisionneur Cosmique

Physique des Particules



$$\mathcal{A} \sim \frac{1}{E_{\text{cm}}^2 - m^2}$$

Inflation Cosmologique



Fréquence

Dépendance angulaire

$$S \sim \cos \left[\frac{m}{E} \log \frac{k_1}{k_3} + \alpha \right] P_S(\cos \theta)$$

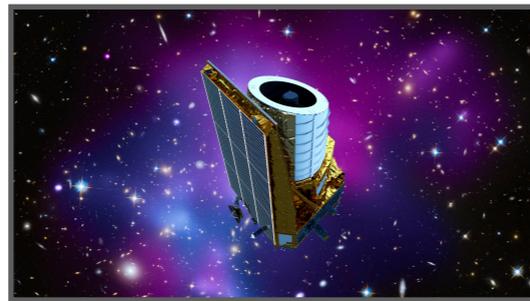
Perspectives Futures des Relevés Cosmologiques

Détecter les non-gaussianités primordiales est l'un des objectifs principaux des missions cosmologiques actuelles et futures

Relevés des grandes structures de l'Univers



DESI

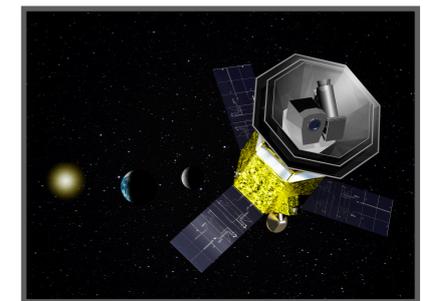


Euclid

Fond diffus cosmologique

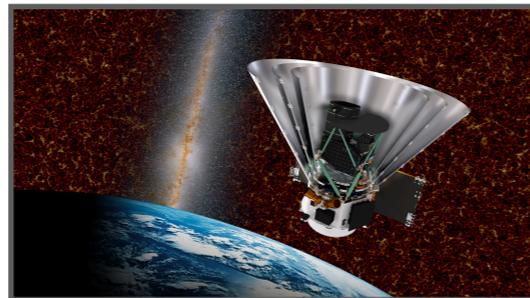


CMB S4



LiteBIRD

Biais dépendent d'échelle



SphereX



Simons Observatory

Les observations vont être nombreuses, indépendantes et précises

Conclusion

Alors ... pourquoi travailler sur l'inflation cosmologique est si excitant ?

Car l'inflation nous permet d'explorer les lois de la physique à de très hautes énergies, imitant un gigantesque collisionneur cosmologique pour découvrir de nouvelles particules !



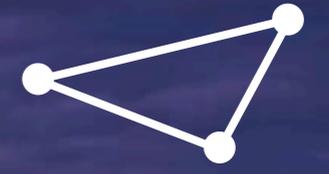
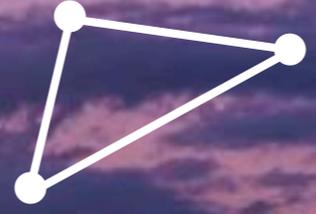
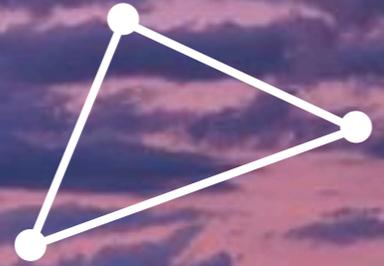
Ah oui ... ? Et comment ?

Et bien en analysant les fonctions de corrélations des fluctuations de densité dans les grandes structures de l'Univers !



Je crois que je me suis
trompé de fête...







Merci