

Au-delà de la relativité générale : Certains aspects de la cosmologie quantique à boucles, des trous noirs et de l'univers sombre.

Thèse présentée le 24 juillet 2017
au Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie de Grenoble

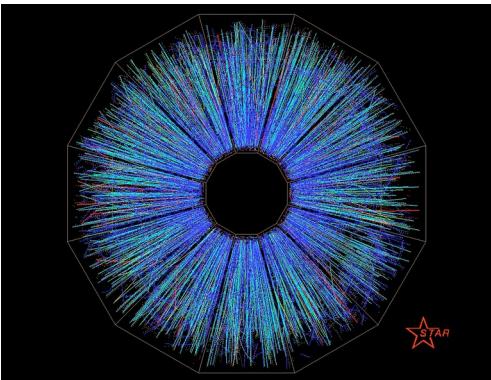
Boris BOLLIET

Sous la direction d'Aurélien BARRAU

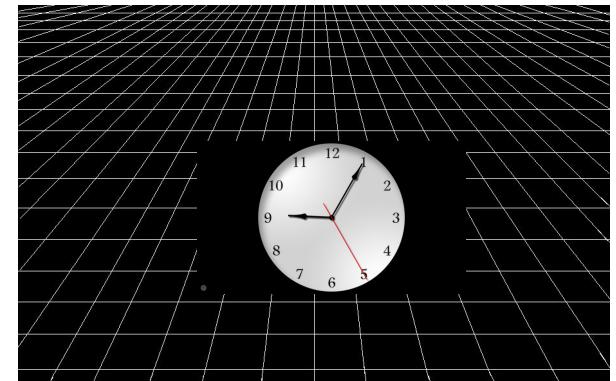
Devant un jury composé de Dominique BOUTIGNY,
Ruth DURRER, Gilles HENRI, Karim NOUI et Patrick PETER



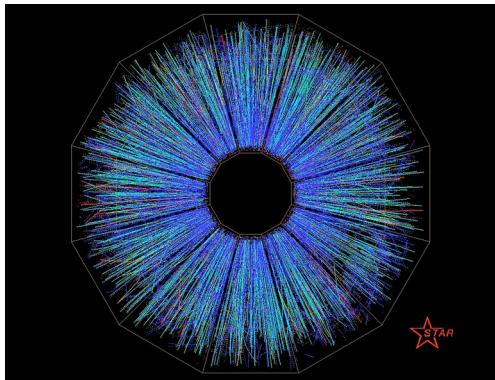
Pourquoi aller au-delà du modèle standard ?



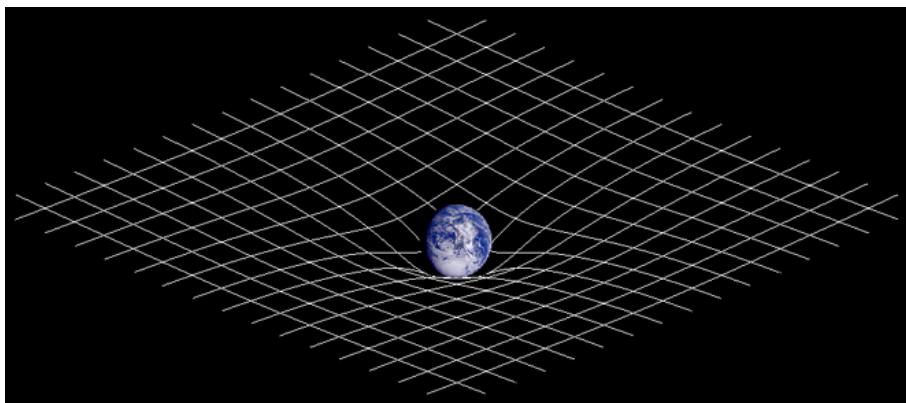
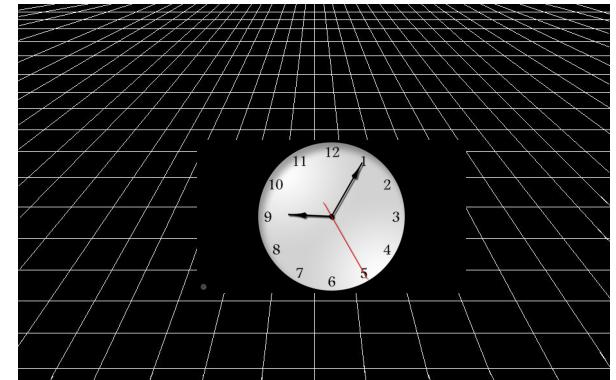
Physique des particules
(Théorie quantique des champs)



Pourquoi aller au-delà du modèle standard ?

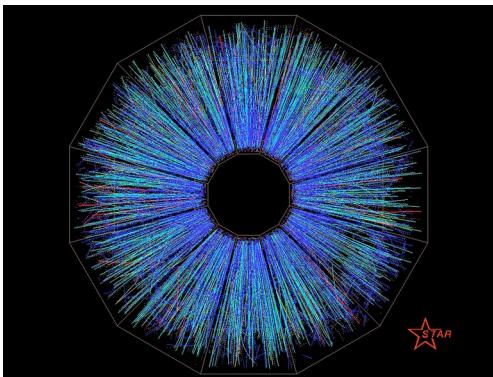


Physique des particules
(Théorie quantique des champs)

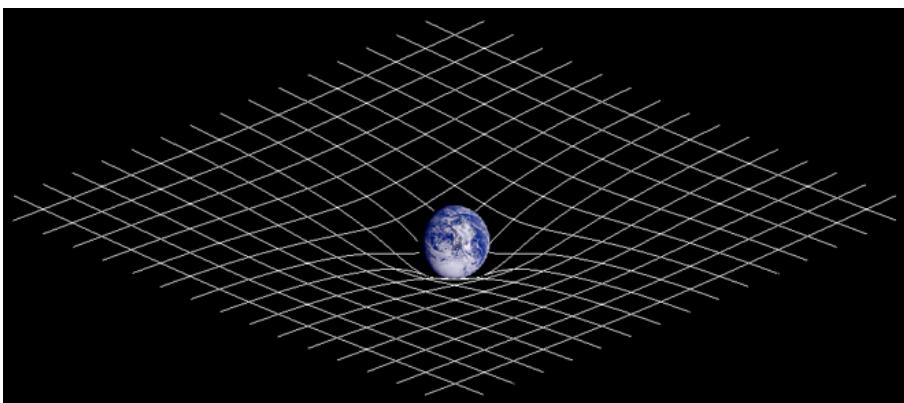
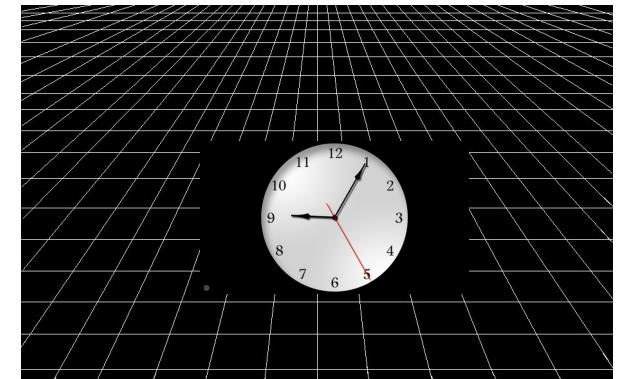


Astrophysique et Cosmologie
(Relativité générale)

Pourquoi aller au-delà du modèle standard ?



Physique des particules
(Théorie quantique des champs)



Astrophysique et Cosmologie
(Relativité générale)

Deux théories pour expliquer avec précision la plupart des expériences menées sur Terre et les observations dans le Cosmos.

Pourquoi aller au-delà du modèle standard ?

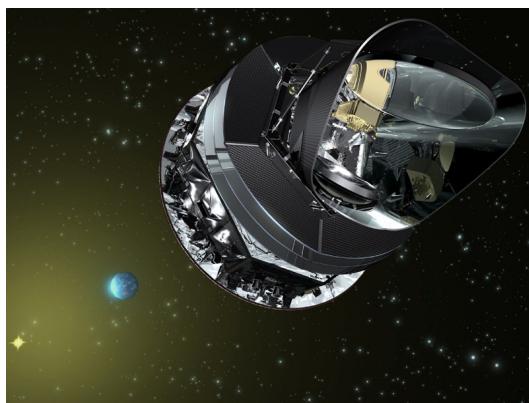


LHC
boson de Higgs
(2012)

Pourquoi aller au-delà du modèle standard ?



LHC
boson de Higgs
(2012)

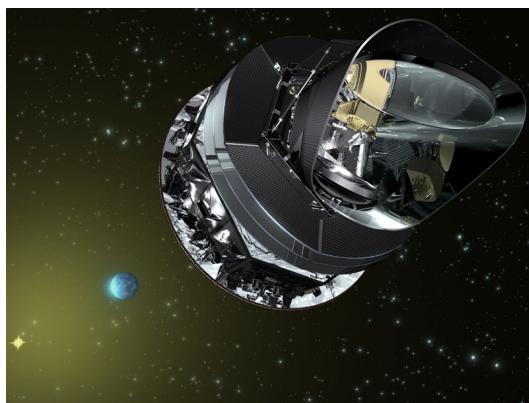


Satellite Planck
big bang et
univers en expansion accélérée
(1998 - 2015)

Pourquoi aller au-delà du modèle standard ?



LHC
boson de Higgs
(2012)



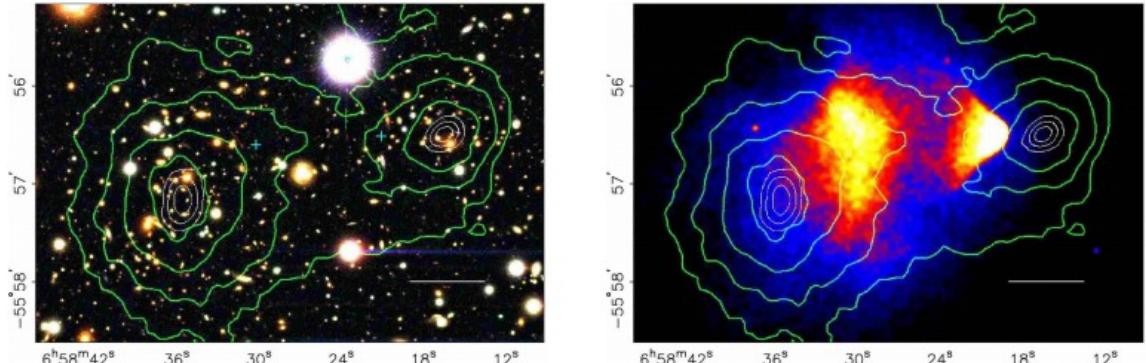
Satellite Planck
big bang et
univers en expansion accélérée
(1998 - 2015)



LIGO
Observation directe de trous noirs
(2015)

Pourquoi aller au-delà du modèle standard ?

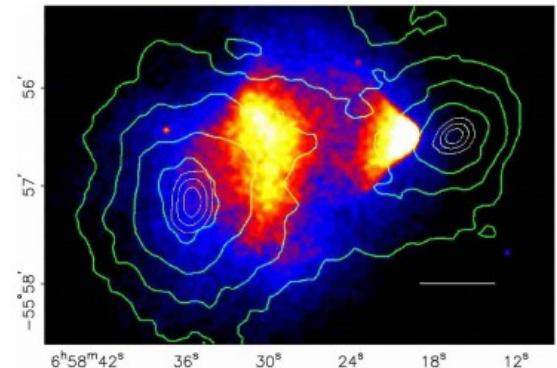
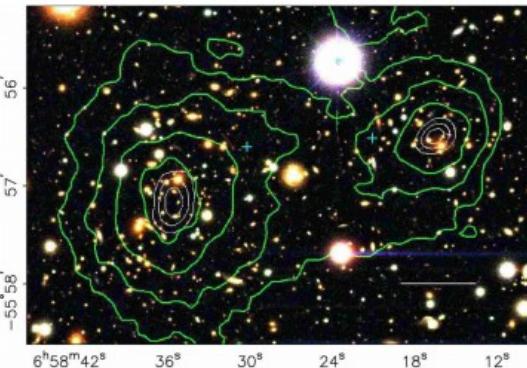
85 % de matière sombre dans les amas de galaxies.



Amas de la Balle (2004)

Pourquoi aller au-delà du modèle standard ?

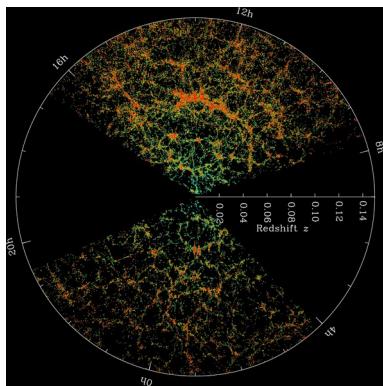
85 % de matière sombre dans les amas de galaxies.



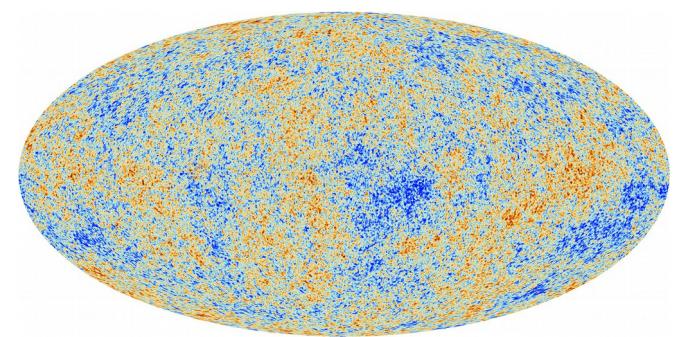
Amas de la Balle (2004)

26 % de matière sombre dans l'univers observable.

70 % d'énergie sombre.



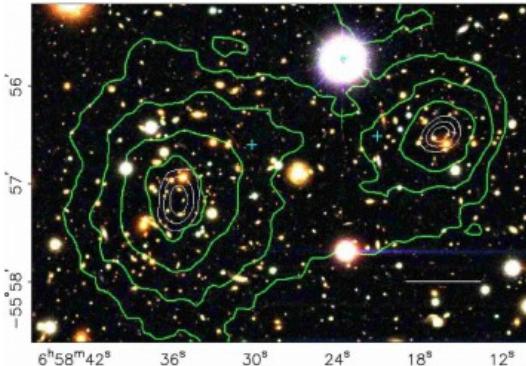
Structure à grande échelle
(SDSS - 2012)



Fond diffus cosmologique
(Planck - 2015)

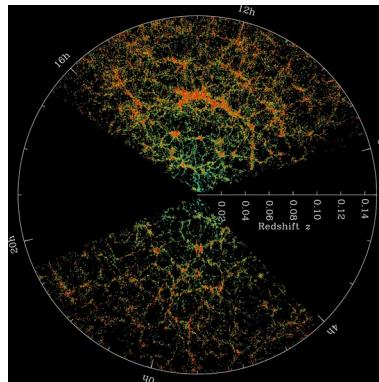
Pourquoi aller au-delà du modèle standard ?

85 % de matière sombre dans les amas de galaxies.

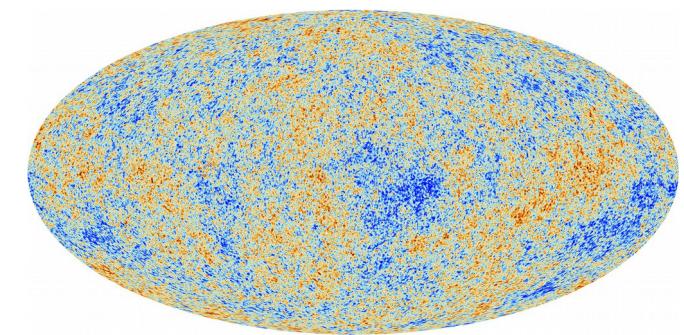


Amas de la Balle (2004)

26 % de matière sombre dans l'univers observable.



Structure à grande échelle
(SDSS - 2012)

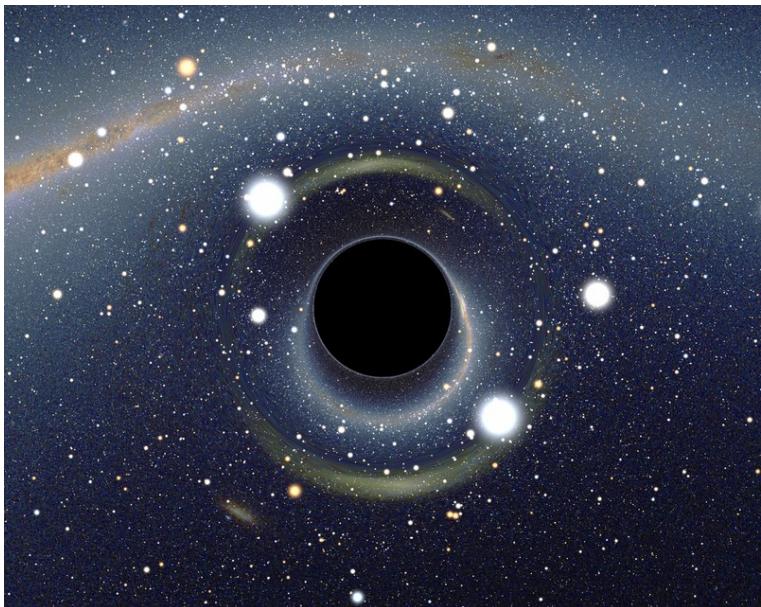


Fond diffus cosmologique
(Planck - 2015)

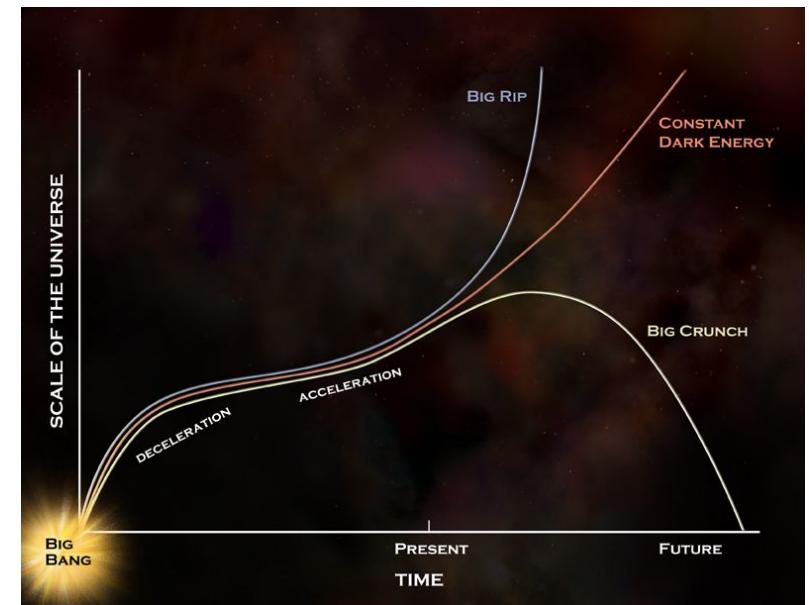
La matière et l'énergie sombre ne sont pas prévues par la physique des particules : Est-ce une indication que le modèle standard de la physique des particules est incomplet ou bien que la relativité générale ne décrit pas correctement la dynamique de la matière aux grandes échelles ?

Pourquoi aller au-delà du modèle standard ?

Selon la relativité générale,
trous noirs et big bang = **singularités** spatio-temporelles



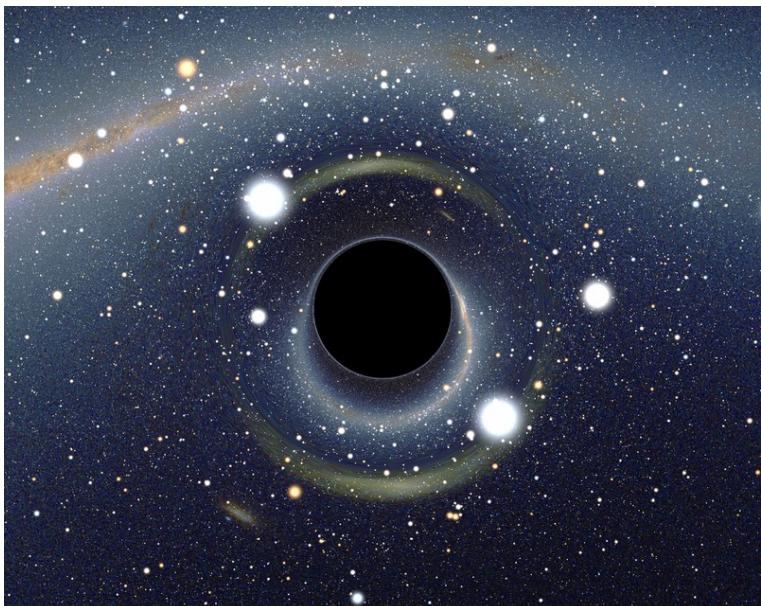
Trou noir
(simulation numérique d'Alain Riazuelo)



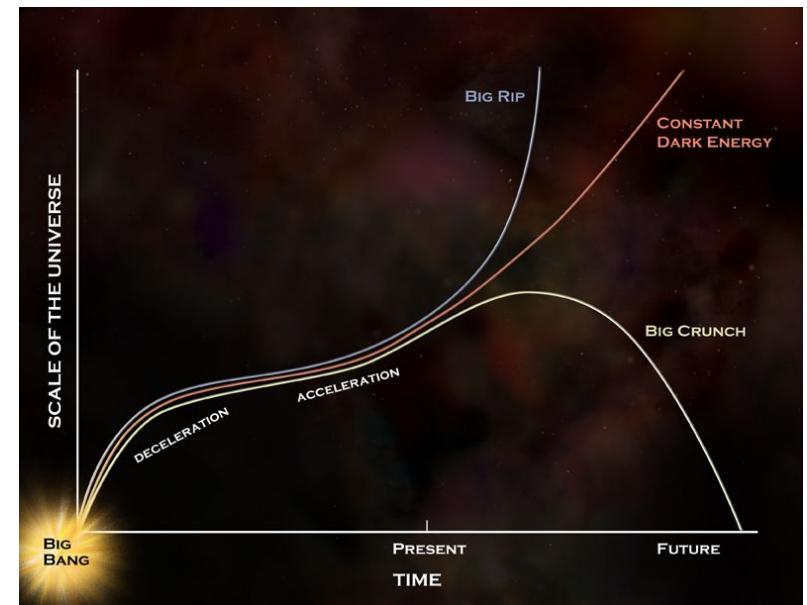
Expansion de l'univers

Pourquoi aller au-delà du modèle standard ?

Selon la relativité générale,
trous noirs et big bang = **singularités** spatio-temporelles



Trou noir
(simulation numérique d'Alain Riazuelo)

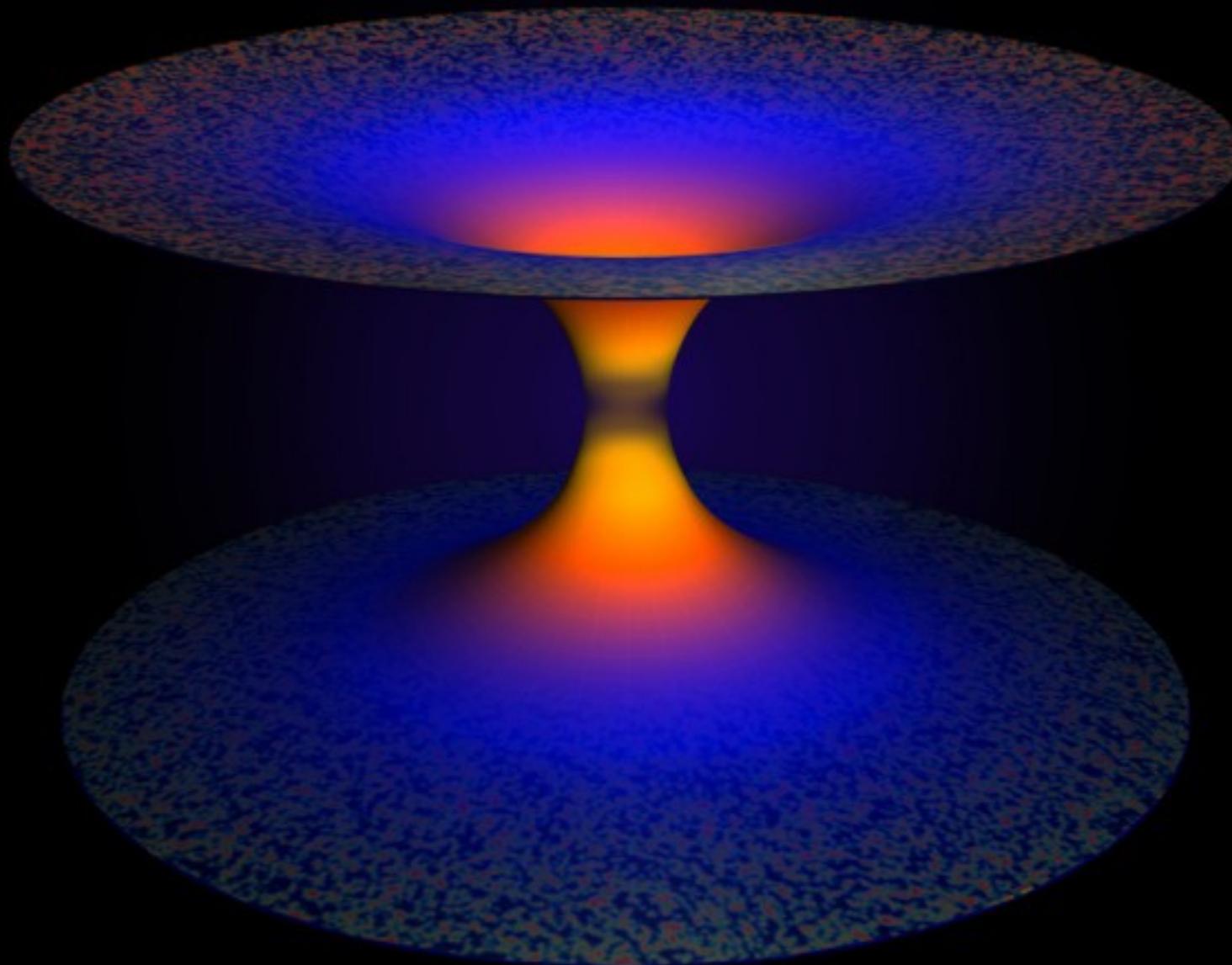


Expansion de l'univers

*Au cœur des singularités,
La théorie quantique des champs et la relativité générale deviennent alors incompatibles.*

Le besoin d'une **théorie quantique de la gravité** s'impose.

Cosmologie quantique à boucles

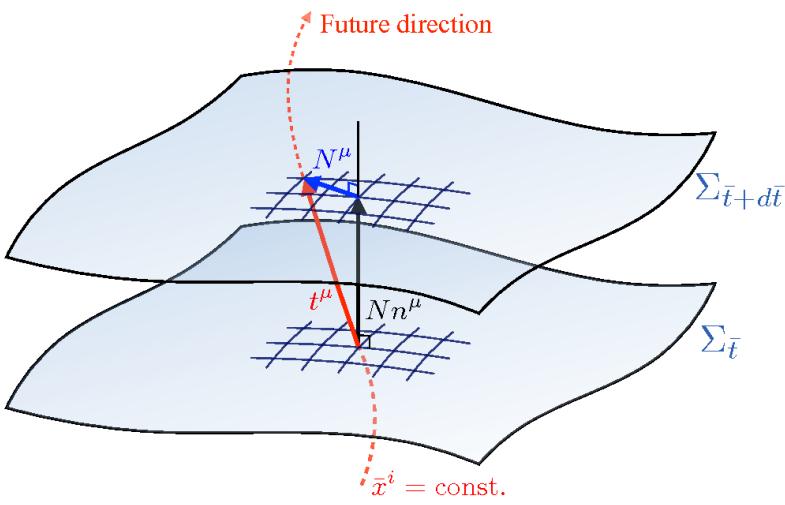


Travaux fondateurs : Ashtekar, Pawłowski, Singh, Bojowald en 2006

Les idées de base de la gravité quantique à boucles

- pas une théorie d'unification des quatre interactions,
- une théorie *inachevée* de la gravité quantique,
- pas encore vérifiée expérimentalement.

Formalisme ADM



Les opérateurs d'aire et de volume ont des spectres discrets :

Structure granulaire de l'espace à l'échelle de Planck.
(Rovelli 1994)

Variables d'Ashtekar
(Sen 1982, Ashtekar 1986)

$$A^i = (\Gamma_a^i + \gamma K_a^i) dx^a$$

$$E_i = \frac{1}{2} |e| e_i^a \partial_a$$

γ : paramètre de Barbero-Immirzi

Écriture du Hamiltonien de la RG en un somme de contraintes :

$$\mathcal{H} = \int d^3x \{ NC + N^a C_a + \beta^i G_i \}$$

Les états de géométrie quantique sont des vecteurs propres des trois types de contraintes promues au rang d'opérateurs.
(Rovelli, Smolin 1989)

Ce sont les « réseaux de spins » inventés par Penrose en 1971.

$$\hat{A}\Psi = \ell_{Pl}^2 \sqrt{j(j+1)}\Psi$$

Spectre de l'opérateur d'aire

$$\ell_{Pl} = \sqrt{G\hbar/c^3} = 10^{-33} \text{ cm}$$

Longueur de Planck

La cosmologie quantique à boucles

Application de la gravité quantique à boucles à un espace-temps **homogène et isotrope**, rempli d'un **champ scalaire** Φ avec **potentiel** $V(\Phi)$.

Variables d'Ashtekar

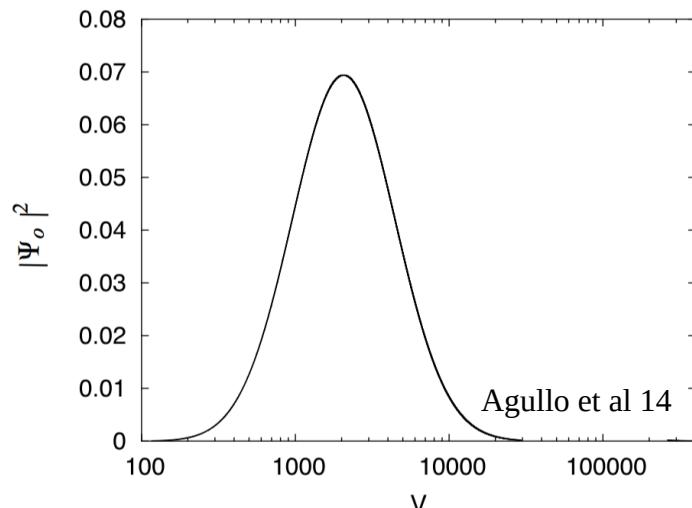
$$A^i \propto \delta_a^i dx^a \quad E_i \propto \delta_i^a \partial_a$$

Hamiltonien

$$\mathcal{H} = \int d^3x \left\{ \frac{1}{2} p_\phi^2 - V(\phi) + C \right\}$$

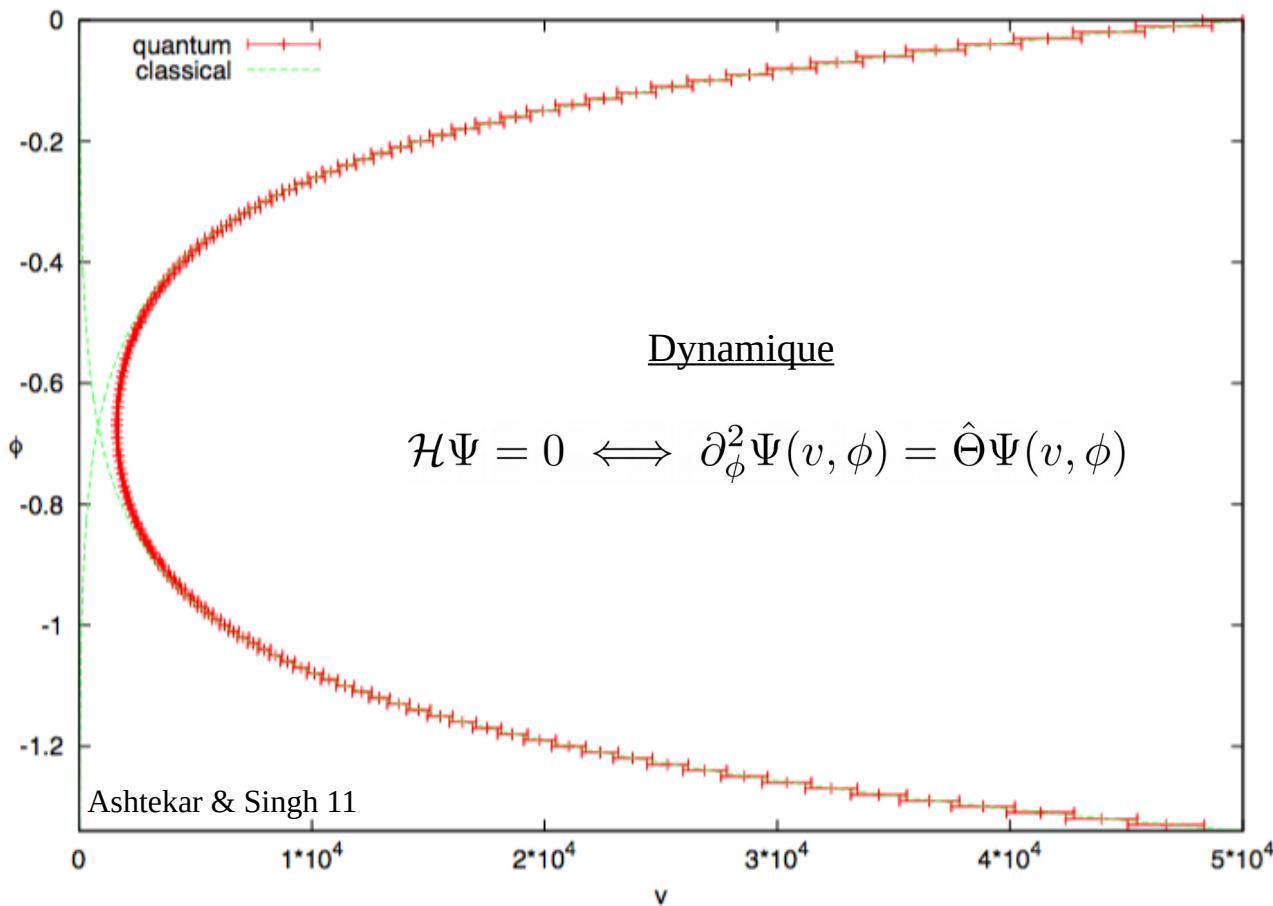
États quantiques

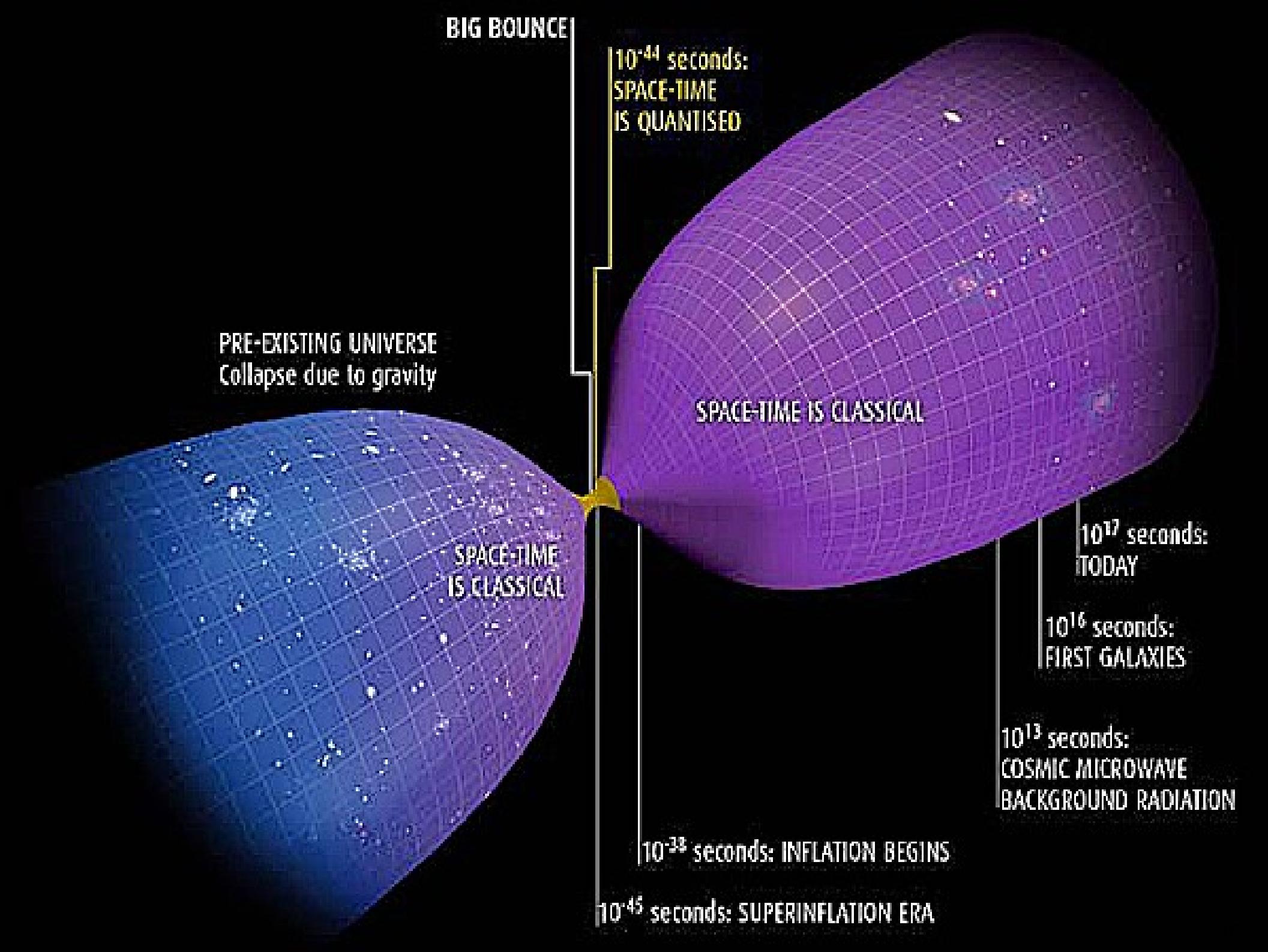
$$\Psi(v, \phi) \quad \text{avec} \quad v \sim a^3$$



Dynamique

$$\mathcal{H}\Psi = 0 \iff \partial_\phi^2 \Psi(v, \phi) = \hat{\Theta}\Psi(v, \phi)$$

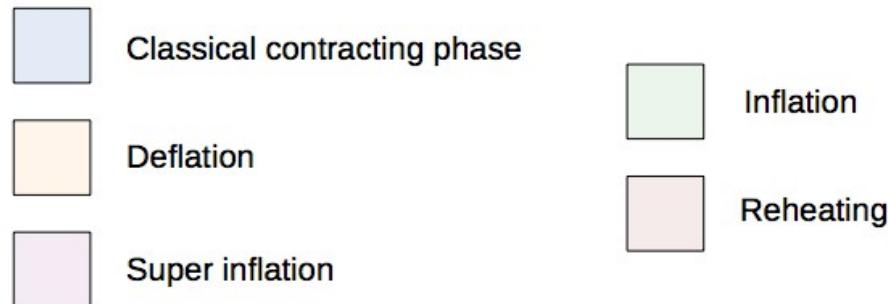




La cosmologie quantique à boucles : la théorie effective

Equation de Friedmann modifiée

$$H^2 = \frac{\rho}{3} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_B}\right)$$



Densité d'énergie maximale

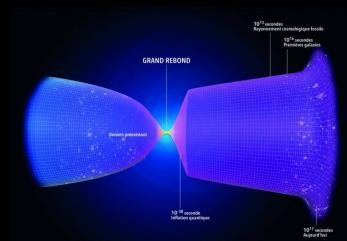
$$\rho_B \sim 1/\gamma^3 \sim m_{Pl}^4$$

Potentiel quadratique

$$V(\phi) = m^2 \phi^2 / 2$$

La durée de l'inflation en cosmologie quantique à boucles

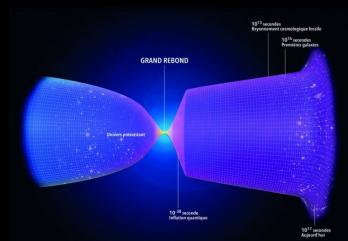
BB, Barrau, Martineau, Moulin,
Class.Quant.Grav. 34 (2017)



La durée de l'inflation en cosmologie quantique à boucles

BB, Barrau, Martineau, Moulin,
Class.Quant.Grav. 34 (2017)

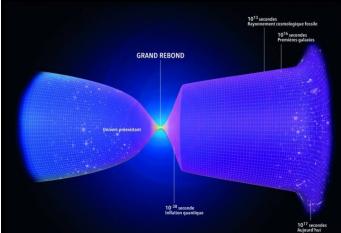
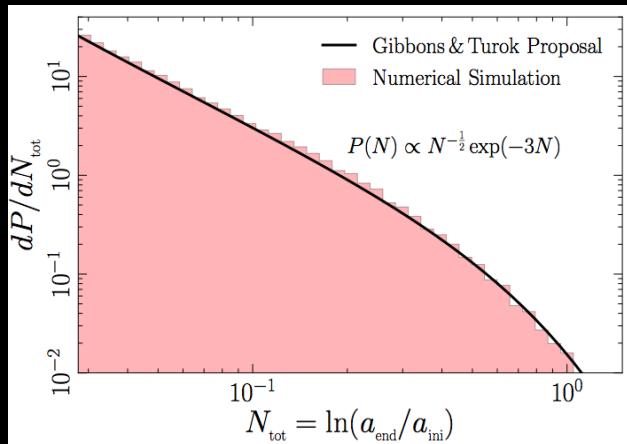
Quelle est la fraction des trajectoires avec une période d'inflation qui dure N e-folds ?



La durée de l'inflation en cosmologie quantique à boucles

BB, Barrau, Martineau, Moulin,
Class.Quant.Grav. 34 (2017)

Quelle est la fraction des trajectoires avec une période d'inflation qui dure N e-folds ?

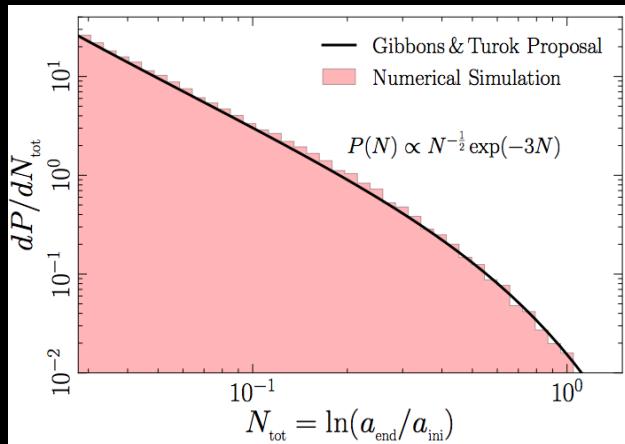


Durée de la déflation

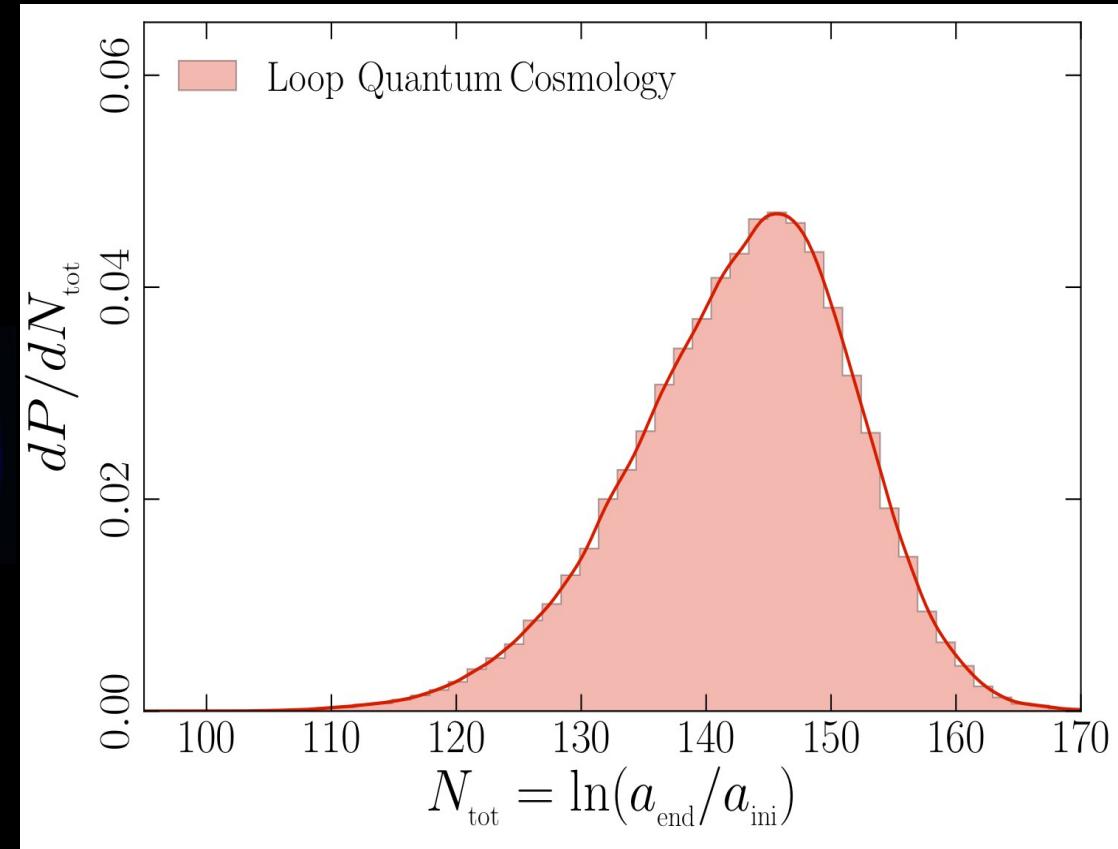
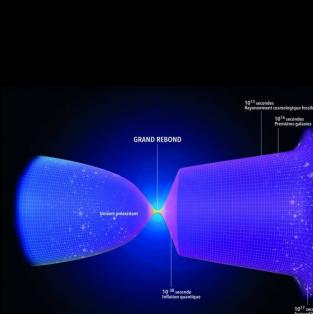
La durée de l'inflation en cosmologie quantique à boucles

BB, Barrau, Martineau, Moulin,
Class.Quant.Grav. 34 (2017)

Quelle est la fraction des trajectoires avec une période d'inflation qui dure N e-folds ?



Durée de la déflation

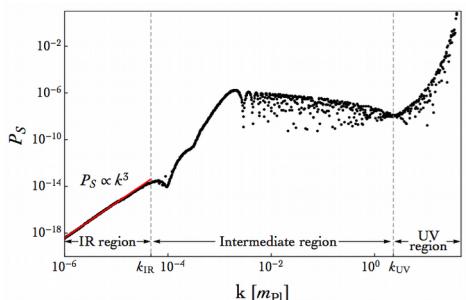


Durée de l'inflation

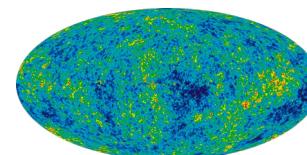
Longue phase d'inflation post-rebond très « probable »

Peut-on trouver des empreintes du rebond quantique dans le fond diffus cosmologique ?

Spectre des perturbations primordiales



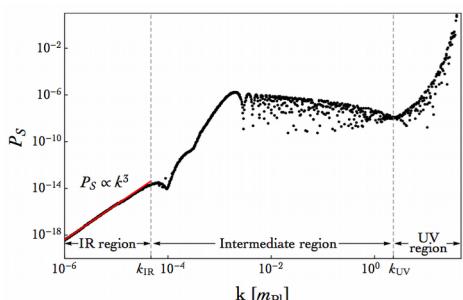
Anisotropies
du fond diffus cosmologique



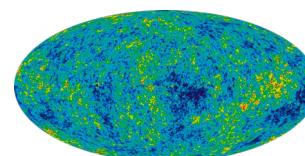
BB, Stahl, Grain, Linsefors, Barrau,
Phys.Rev. D91 (2015)
&
Schander, Barrau, **BB**, Linsefors,
Mielczarek, Grain,
Phys.Rev. D93 (2016)

Peut-on trouver des empreintes du rebond quantique dans le fond diffus cosmologique ?

Spectre des perturbations primordiales



Anisotropies
du fond diffus cosmologique



BB, Stahl, Grain, Linsefors, Barrau,
Phys.Rev. D91 (2015)
&
Schander, Barrau, **BB**, Linsefors,
Mielczarek, Grain,
Phys.Rev. D93 (2016)

Dynamique des perturbations cosmologiques en cosmologie quantique à boucles

Approche de « la métrique effective » : $v'' + (k^2 - \frac{z''}{z})v = 0$

Approche de « l'algèbre déformée » : $v'' + (\Omega k^2 - \frac{z''}{z})v = 0$ avec

Scalaire

$$z_s = a\dot{\phi}/H$$

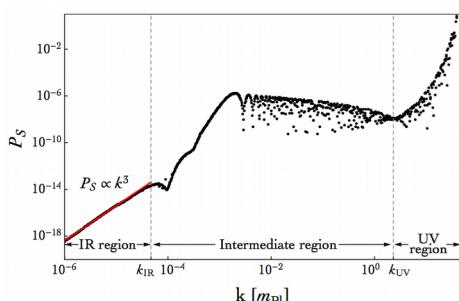
Tenseur

$$z_T = a$$

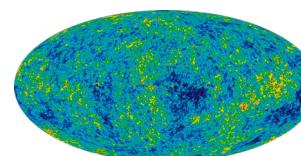
$$\Omega = 1 - 2\rho/\rho_B$$

Peut-on trouver des empreintes du rebond quantique dans le fond diffus cosmologique ?

Spectre des perturbations primordiales



Anisotropies
du fond diffus cosmologique



BB, Stahl, Grain, Linsefors, Barrau,
Phys.Rev. D91 (2015)
&
Schander, Barrau, **BB**, Linsefors,
Mielczarek, Grain,
Phys.Rev. D93 (2016)

Dynamique des perturbations cosmologiques en cosmologie quantique à boucles

Approche de « la métrique effective » : $v'' + (k^2 - \frac{z''}{z})v = 0$

Approche de « l'algèbre déformée » : $v'' + (\Omega k^2 - \frac{z''}{z})v = 0$ avec

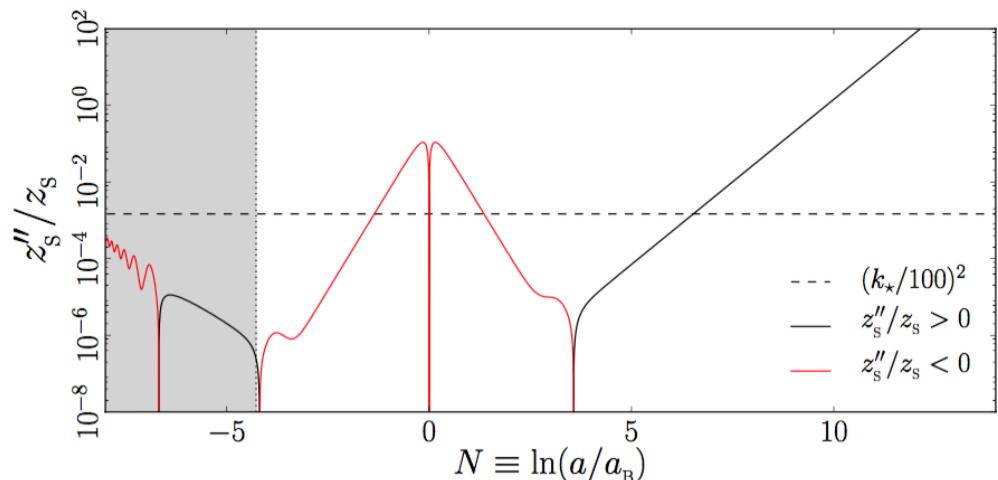
Scalaire

$$z_s = a\dot{\phi}/H$$

Tenseur

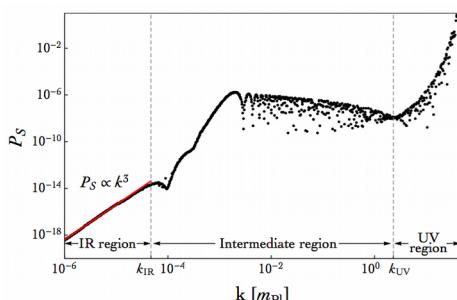
$$z_T = a$$

$$\Omega = 1 - 2\rho/\rho_B$$

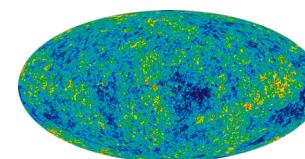


Peut-on trouver des empreintes du rebond quantique dans le fond diffus cosmologique ?

Spectre des perturbations primordiales



Anisotropies
du fond diffus cosmologique



BB, Stahl, Grain, Linsefors, Barrau,
Phys.Rev. D91 (2015)
&
Schander, Barrau, BB, Linsefors,
Mielczarek, Grain,
Phys.Rev. D93 (2016)

Dynamique des perturbations cosmologiques en cosmologie quantique à boucles

Approche de « la métrique effective » : $v'' + (k^2 - \frac{z''}{z})v = 0$

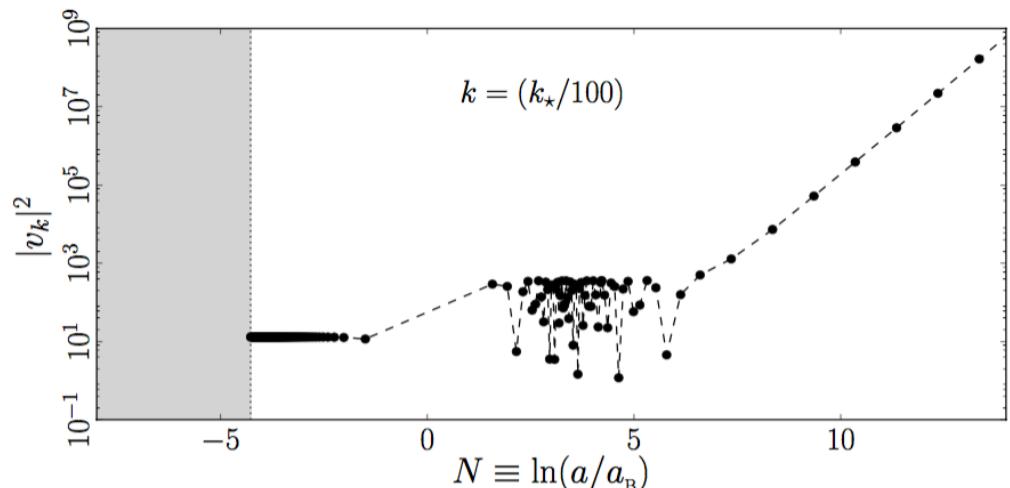
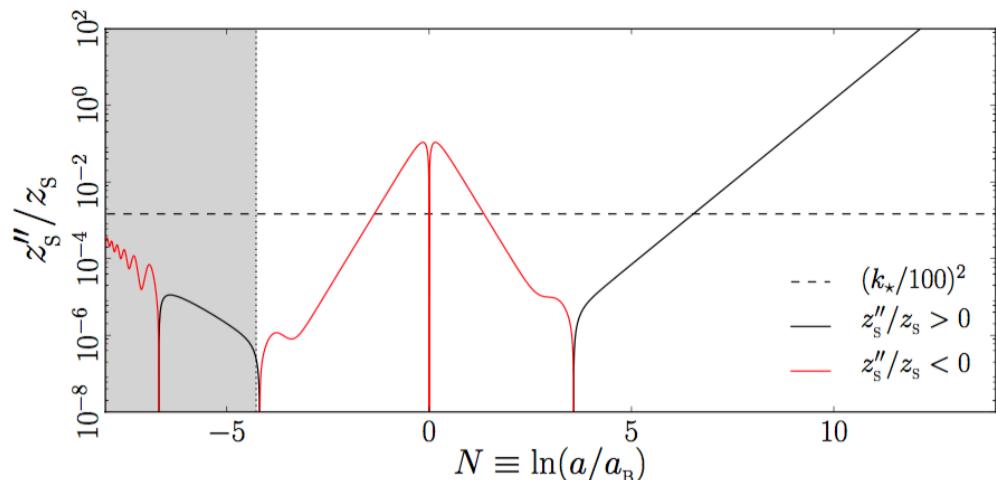
Approche de « l'algèbre déformée » : $v'' + (\Omega k^2 - \frac{z''}{z})v = 0$ avec $\Omega = 1 - 2\rho/\rho_B$

Scalaire

$$z_s = a\dot{\phi}/H$$

Tenseur

$$z_T = a$$



Spectres des perturbations tensorielles et scalaires dans l'approche « métrique effective »

1) Conditions initiales dans la phase de contraction :

$$v_k(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2k}} e^{-ik\tau}$$

2) Evolution des perturbations à travers le rebond.

$$v'' + (k^2 - \frac{z''}{z})v = 0$$

3) Arrêt lorsque les perturbations deviennent super-Hubble pendant l'inflation.

$$k \ll aH$$

4) Calcul du spectre de puissance : $P(k) = \frac{k^3}{2\pi^2} \left| \frac{v_k}{z} \right|^2$

Spectres des perturbations tensorielles et scalaires dans l'approche « métrique effective »

1) Conditions initiales dans la phase de contraction :

$$v_k(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2k}} e^{-ik\tau}$$

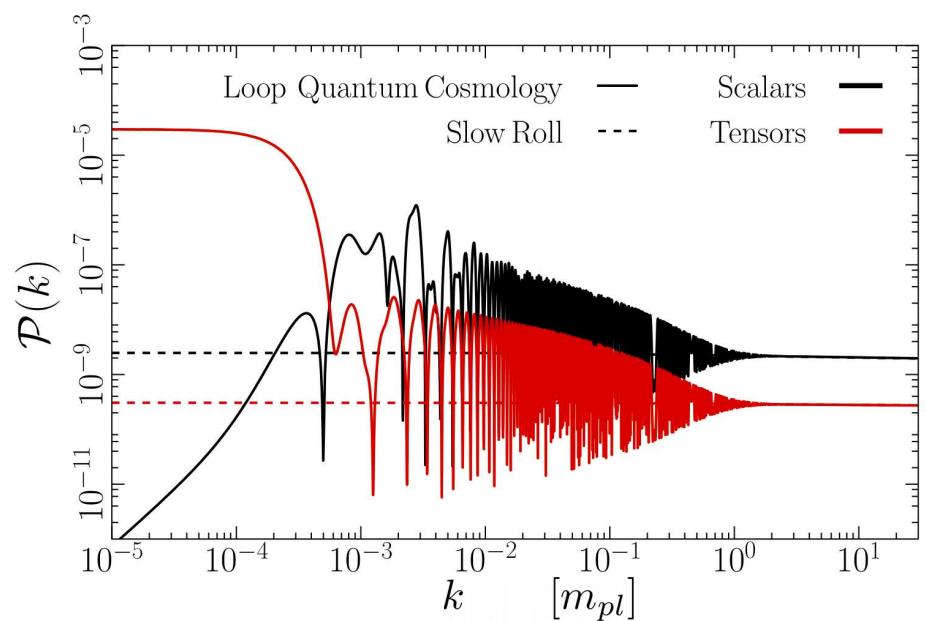
2) Evolution des perturbations à travers le rebond.

$$v'' + (k^2 - \frac{z''}{z})v = 0$$

3) Arrêt lorsque les perturbations deviennent super-Hubble pendant l'inflation.

$$k \ll aH$$

4) Calcul du spectre de puissance : $P(k) = \frac{k^3}{2\pi^2} \left| \frac{v_k}{z} \right|^2$



Spectres des perturbations tensorielles et scalaires dans l'approche « métrique effective »

1) Conditions initiales dans la phase de contraction :

$$v_k(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2k}} e^{-ik\tau}$$

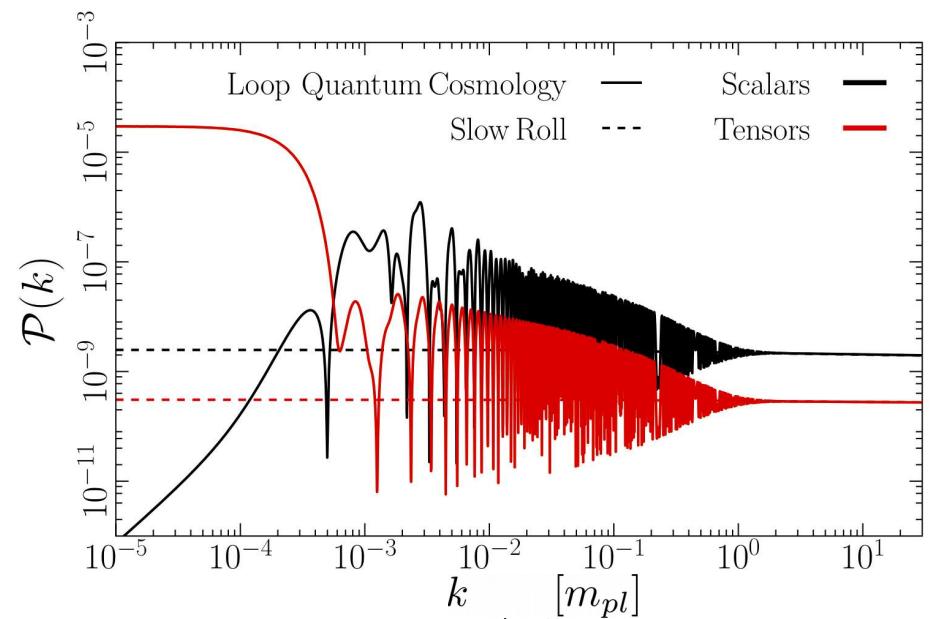
2) Evolution des perturbations à travers le rebond.

$$v'' + \left(k^2 - \frac{z''}{z}\right)v = 0$$

3) Arrêt lorsque les perturbations deviennent super-Hubble pendant l'inflation.

$$k \ll aH$$

4) Calcul du spectre de puissance : $P(k) = \frac{k^3}{2\pi^2} \left| \frac{v_k}{z} \right|^2$

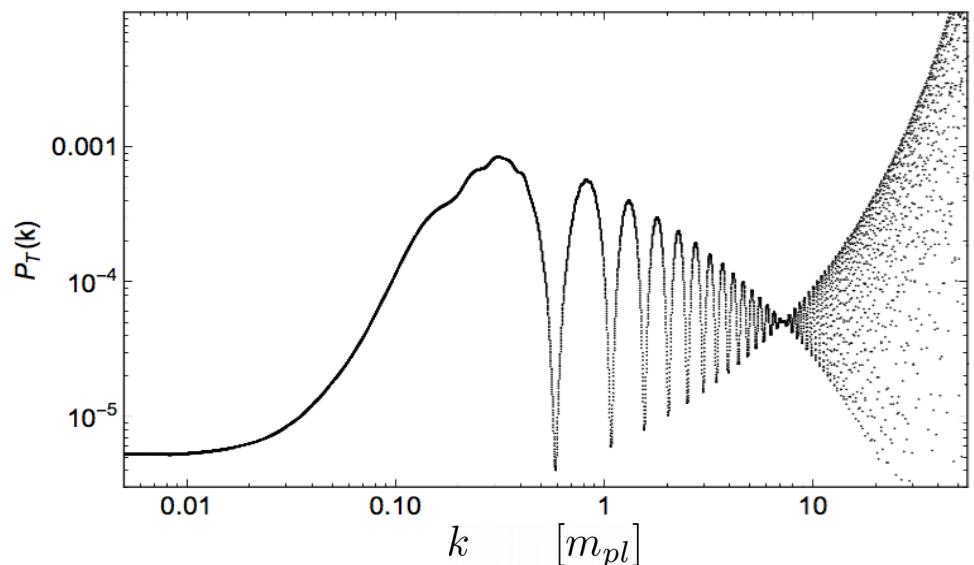
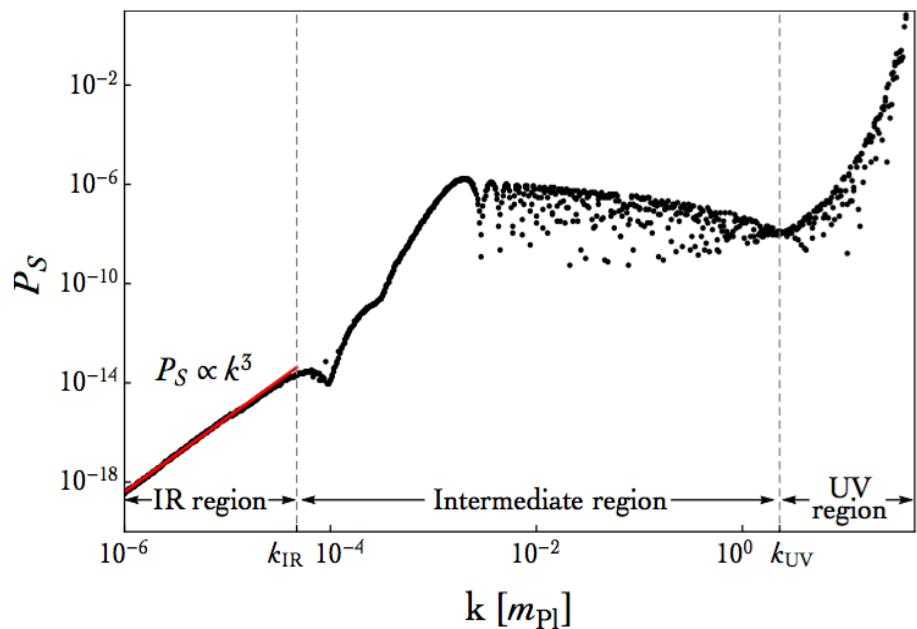


Trois régimes dans les spectres de puissance

- IR : invariant d'échelle pour les tenseurs et loi de puissance pour les scalaires
- Intermédiaire : oscillations
- UV : spectre de puissance de l'inflation

Spectres des perturbations tensorielles et scalaires dans l'approche « algèbre déformée »

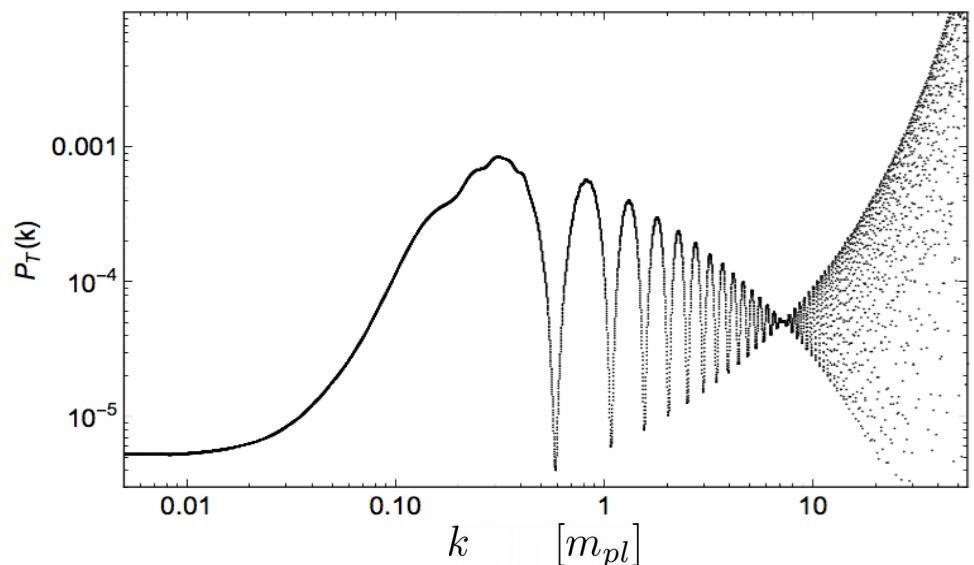
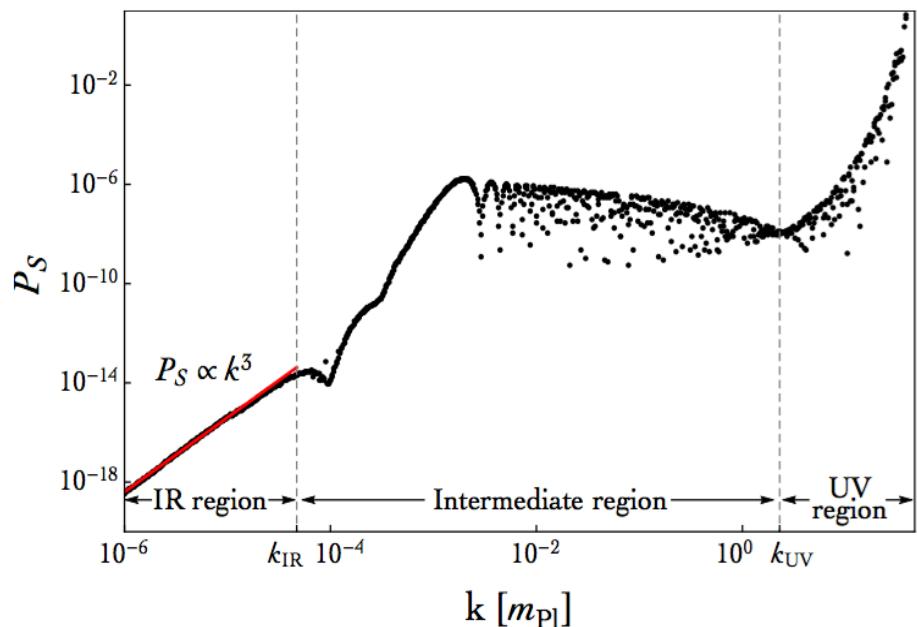
$$v'' + (\Omega k^2 - \frac{z''}{z})v = 0 \quad \text{avec} \quad \Omega = 1 - 2\rho/\rho_B$$



Divergence exponentielle de l'amplitude des modes lorsque $\Omega < 0$!

Spectres des perturbations tensorielles et scalaires dans l'approche « algèbre déformée »

$$v'' + \left(\Omega k^2 - \frac{z''}{z}\right)v = 0 \quad \text{avec} \quad \Omega = 1 - 2\rho/\rho_B$$



Divergence exponentielle de l'amplitude des modes lorsque $\Omega < 0$!

N>>60 e-folds : fenêtre observable = UV
 N~60 e-folds : fenêtre observable = oscillations
 N<<60 : fenêtre observable = IR

Contraintes observationnelles sur l'approche « algèbre déformée »

BB, Barrau, Grain, Schander,
Phys.Rev. D93 (2016)

Potentiel quadratique : $V(\phi) = m^2 \phi^2 / 2$

Masse de l'inflaton : $m = 10^{-6} m_{\text{Pl}}$

Densité critique : $\rho_B = 0.41 m_{\text{Pl}}^4$

Durée totale de l'inflation : $N_{\text{tot}} \approx 140$

Durée de l'inflation « observable » : $N_* \approx 60$

Contraintes observationnelles sur l'approche « algèbre déformée »

BB, Barrau, Grain, Schander,
Phys.Rev. D93 (2016)

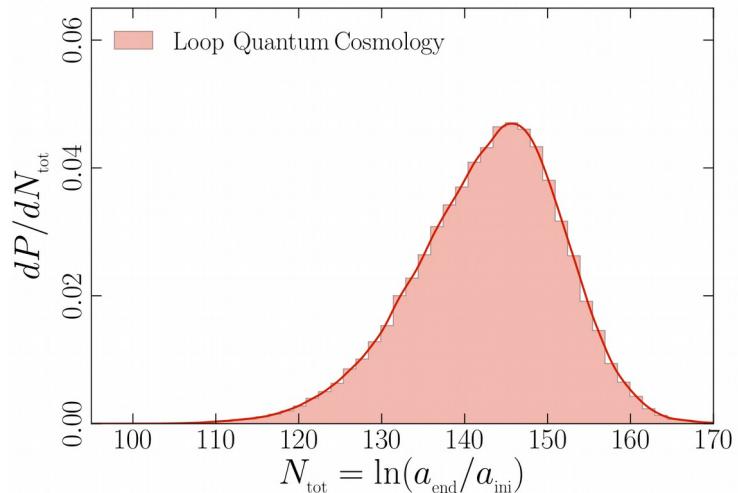
Potentiel quadratique : $V(\phi) = m^2 \phi^2 / 2$

Masse de l'inflaton : $m = 10^{-6} m_{\text{Pl}}$

Densité critique : $\rho_B = 0.41 m_{\text{Pl}}^4$

Durée totale de l'inflation : $N_{\text{tot}} \approx 140$

Durée de l'inflation « observable » : $N_* \approx 60$



$N \sim 140$: fenêtre observable = partie UV du spectre

Contraintes observationnelles sur l'approche « algèbre déformée »

BB, Barrau, Grain, Schander,
Phys.Rev. D93 (2016)

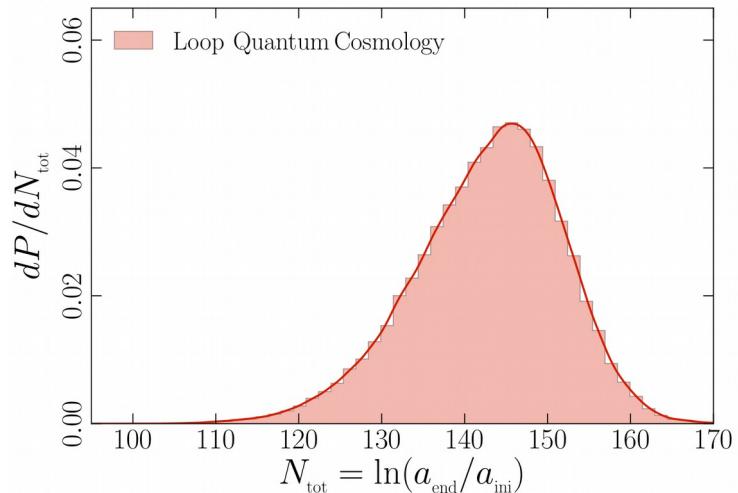
Potentiel quadratique : $V(\phi) = m^2 \phi^2 / 2$

Masse de l'inflaton : $m = 10^{-6} m_{\text{Pl}}$

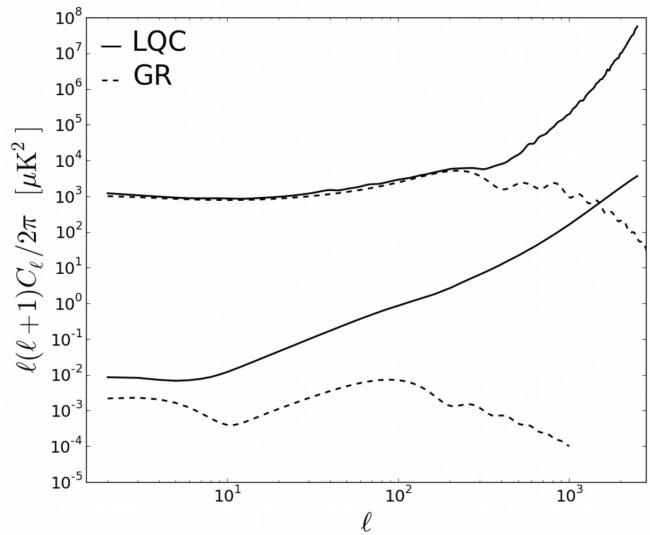
Densité critique : $\rho_B = 0.41 m_{\text{Pl}}^4$

Durée totale de l'inflation : $N_{\text{tot}} \approx 140$

Durée de l'inflation « observable » : $N_* \approx 60$



$N \sim 140$: fenêtre observable = partie UV du spectre



Contraintes observationnelles sur l'approche « algèbre déformée »

BB, Barrau, Grain, Schander,
Phys.Rev. D93 (2016)

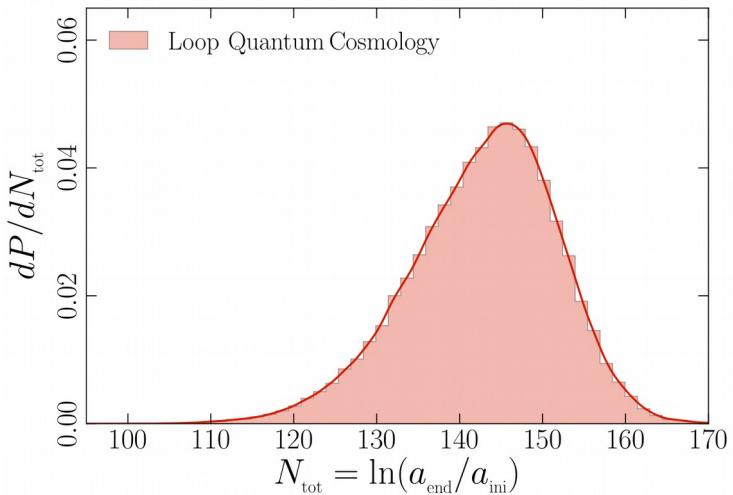
Potentiel quadratique : $V(\phi) = m^2 \phi^2 / 2$

Masse de l'inflaton : $m = 10^{-6} m_{\text{Pl}}$

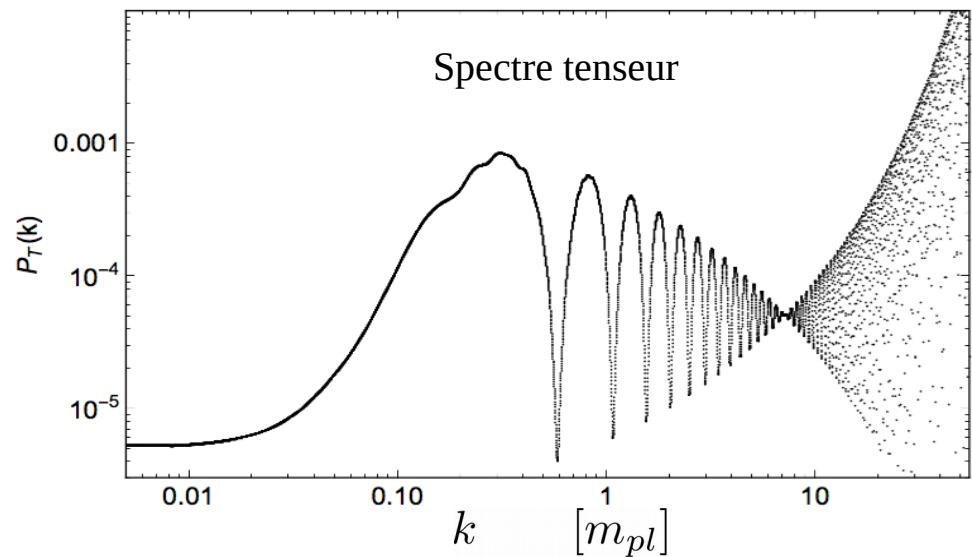
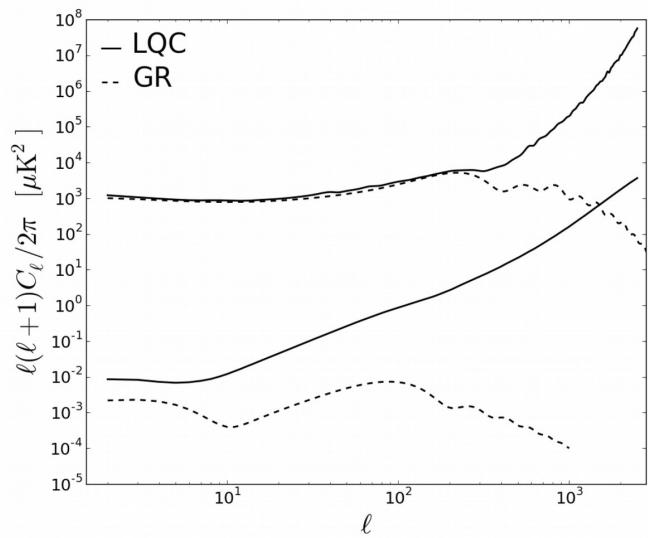
Densité critique : $\rho_{\text{B}} = 0.41 m_{\text{Pl}}^4$

Durée totale de l'inflation : $N_{\text{tot}} \approx 140$

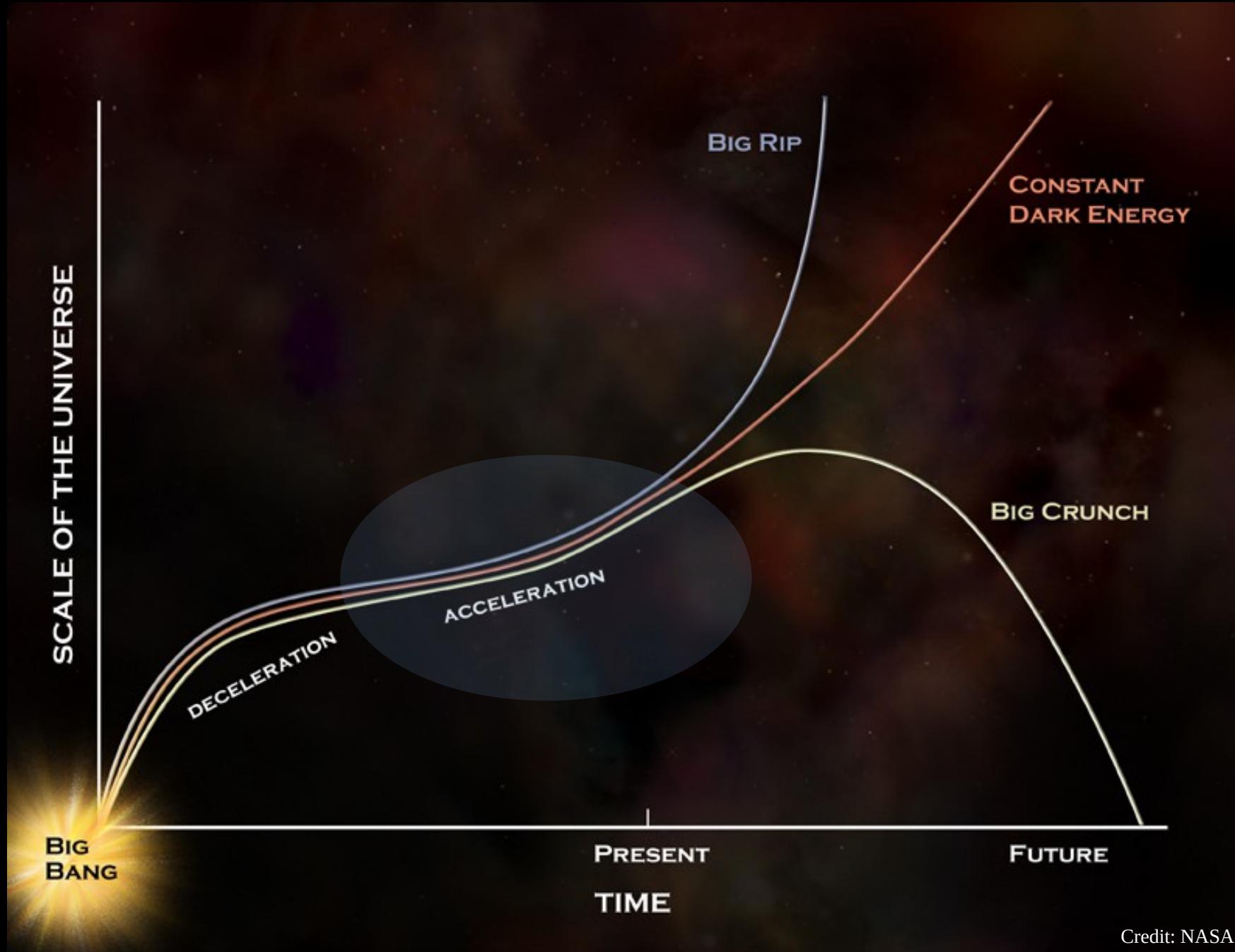
Durée de l'inflation « observable » : $N_* \approx 60$



$N \sim 140$: fenêtre observable = partie UV du spectre



L'approche « algèbre déformée », avec son spectre divergent est exclue (dans sa formulation actuelle).



Credit: NASA



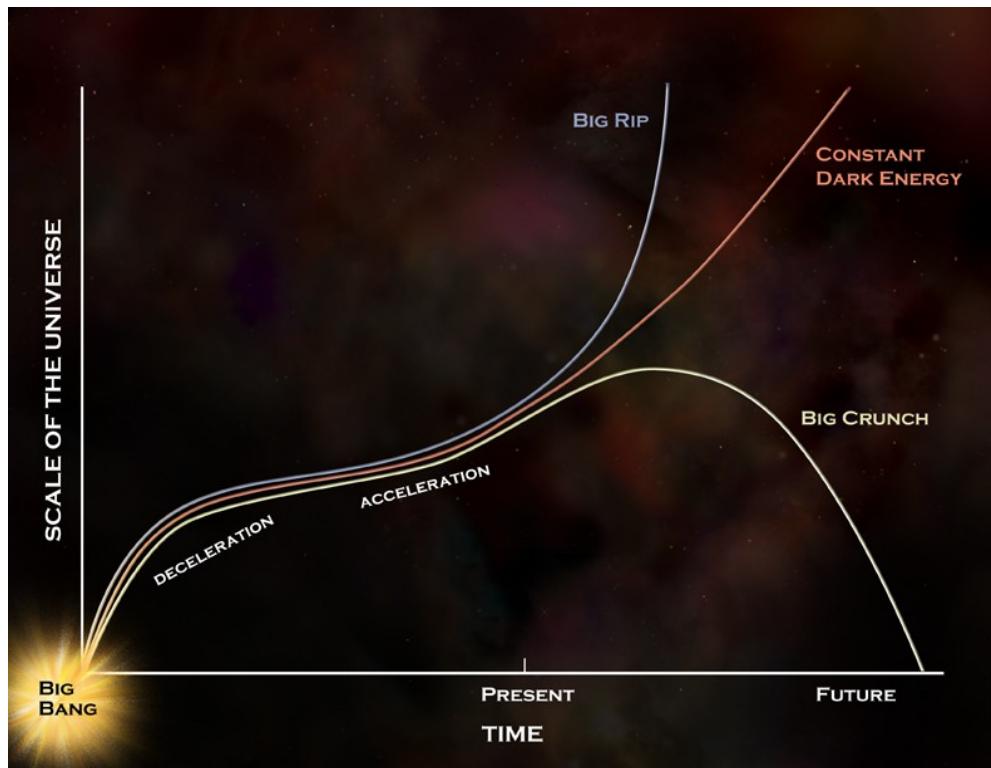
L'approche « EoS » pour les perturbations cosmologiques dans le secteur sombre

15 Mpc/h

D4 $z = 1.5$

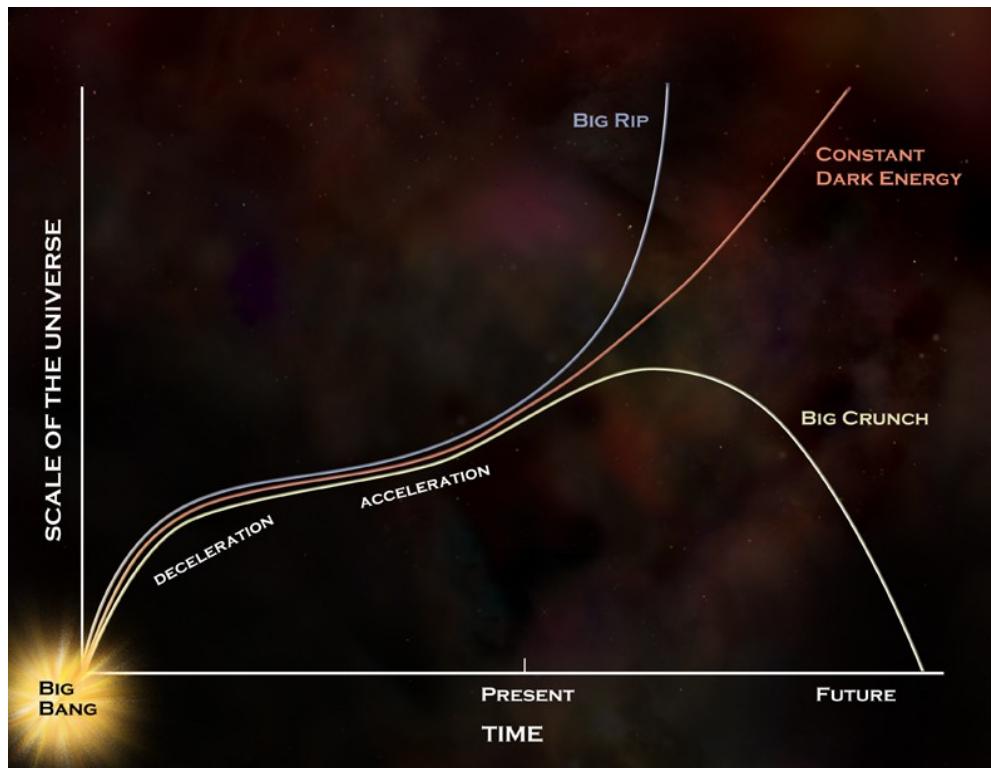
Motivations :

- 1998 : observations de l'expansion accélérée.
- Le statut de la constante cosmologique est en débat.
Nouvelle constante fondamentale de la physique ?
- Liens avec l'inflation ?
- Liens avec la matière sombre ? Echec de la théorie d'Einstein aux échelles cosmologiques ?



Motivations :

- 1998 : observations de l'expansion accélérée.
- Le statut de la constante cosmologique est en débat.
Nouvelle constante fondamentale de la physique ?
- Liens avec l'inflation ?
- Liens avec la matière sombre ? Echec de la théorie d'Einstein aux échelles cosmologiques ?



Objectif :

Construire un cadre phénoménologique permettant d'étudier toutes les théories de gravité modifiée et modèles d'énergie sombre dans le même formalisme.

Les idées clés de l'approche EoS pour l'énergie sombre et la gravité modifiée

Point commun des modèles d'énergie sombre et de gravité modifiée :
Il est toujours possible de se ramener à un **fluide effectif**

Battye, BB, Pearson,
Phys.Rev. D93 (2016)

A partir de l'**action**, on écrit les tenseurs énergie-impulsion pour la **matière** et le **secteur sombre**....

$$\mathcal{S} = \int d^4x \sqrt{-|g|} \{ \mathcal{L}_m + \mathcal{L}_{ds} \}$$

$$T_{\mu\nu} \equiv -\frac{2}{\sqrt{-|g|}} \frac{\delta}{\delta g^{\mu\nu}} (\sqrt{-|g|} \mathcal{L}_m)$$

Décomposition 3+1 :

$$D_{\mu\nu} \equiv -\frac{2}{\sqrt{-|g|}} \frac{\delta}{\delta g^{\mu\nu}} (\sqrt{-|g|} \mathcal{L}_{ds})$$

$$T = \rho_m u \otimes u + P_m \gamma$$

$$D = \rho_{ds} u \otimes u + P_{ds} \gamma$$

Les équations du champ et la conservation de l'énergie :

Equation d'état au niveau du fond :

$$P_{ds} = w_{ds} \rho_{ds}$$

$$H^2 = \frac{1}{3}(\rho_m + \rho_{ds}) \quad \dot{\rho} = -3H(\rho + P)$$

Perturbations des équations au premier ordre :

Pour clore le système d'équations des perturbations il faut spécifier la perturbation de cisaillement et en pression dans chaque fluide.

Équations d'état pour les perturbations

$$\Pi^s = \Pi^s(\delta\rho, \Phi, h, h_{\parallel}, W, \nabla_i v^i)$$

$$\delta\Gamma = \delta\Gamma(\delta\rho, \Phi, h, h_{\parallel}, W, \nabla_i v^i)$$

L'approche EoS pour la gravité $f(R)$

Battye, BB, Pace,
in prep.

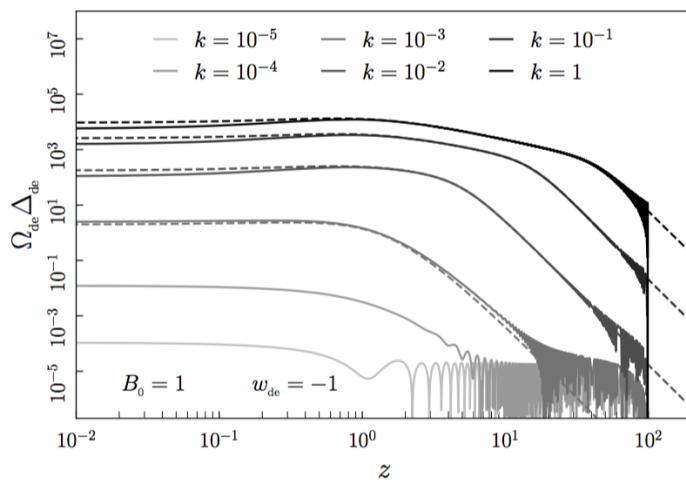
Pour les modes sub-horizon ($k \gg aH$) les équations d'état pour la gravité $f(R)$ prennent une forme très simple.

$$w_{\text{de}} \Gamma_{\text{de}} = \left\{ \frac{1}{3} - w_{\text{de}} + \frac{M^2}{K^2} \right\} \Delta_{\text{de}} + \frac{1}{3} \Omega_m \Delta_m$$

$$w_{\text{de}} \Pi_{\text{de}}^S = \Delta_{\text{de}} \quad \text{où} \quad M^2 \sim 1/f'_R$$

Les équations du mouvement peuvent alors s'écrire :

$$\Delta''_{\text{de}} + (2 - \epsilon_H) \Delta'_{\text{de}} + (K^2 + M^2) \Delta_{\text{de}} = -\frac{1}{3} \frac{\Omega_m}{\Omega_{\text{de}}} K^2 \Delta_m$$



Evolution de la sur-densité dans le fluide effectif de la gravité $f(R)$ calculée avec CLASS_EOS, pour différentes longueurs d'ondes.

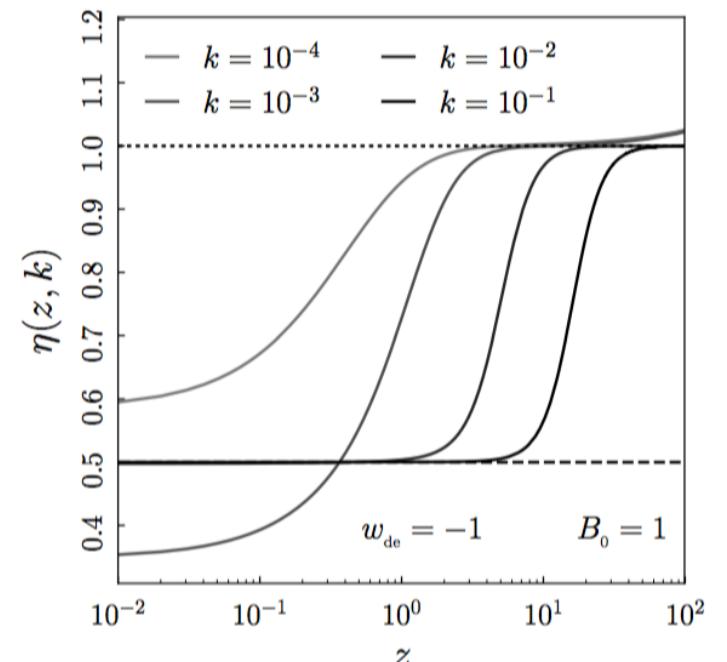
Paramètres phéno : « mu » et « eta »

$$\Omega_m \Delta_m = -\frac{2}{3} \mu(a, k) K^2 Z$$

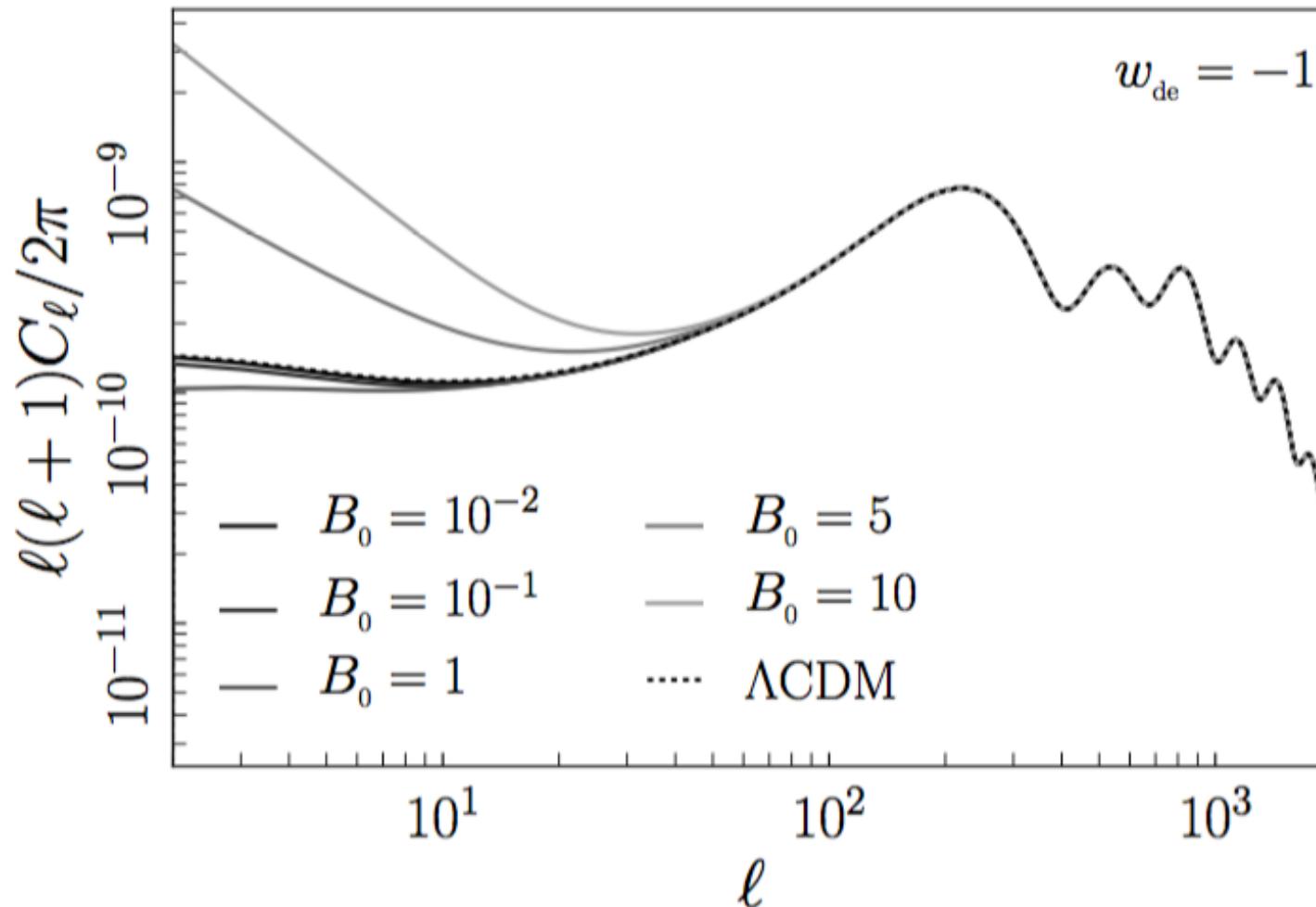
$$\eta(a, k) \equiv \frac{Z}{Y}$$

$$\mu(a, k) = \frac{3(K^2 + M^2)}{2K^2 + 3M^2}.$$

$$\eta(a, k) = \frac{2K^2 + 3M^2}{4K^2 + 3M^2}$$



Gravité modifiée, énergie sombre et observations : le fond diffus cosmologique



La physique du CMB est essentiellement déterminée par les phénomènes à $z=1100$.

L'effet ISW et le lensing permettent de tracer l'énergie sombre.

Effet ISW important à grande échelle angulaire :
problème de la variance cosmique, dégénérescence avec les anisotropies primordiales.

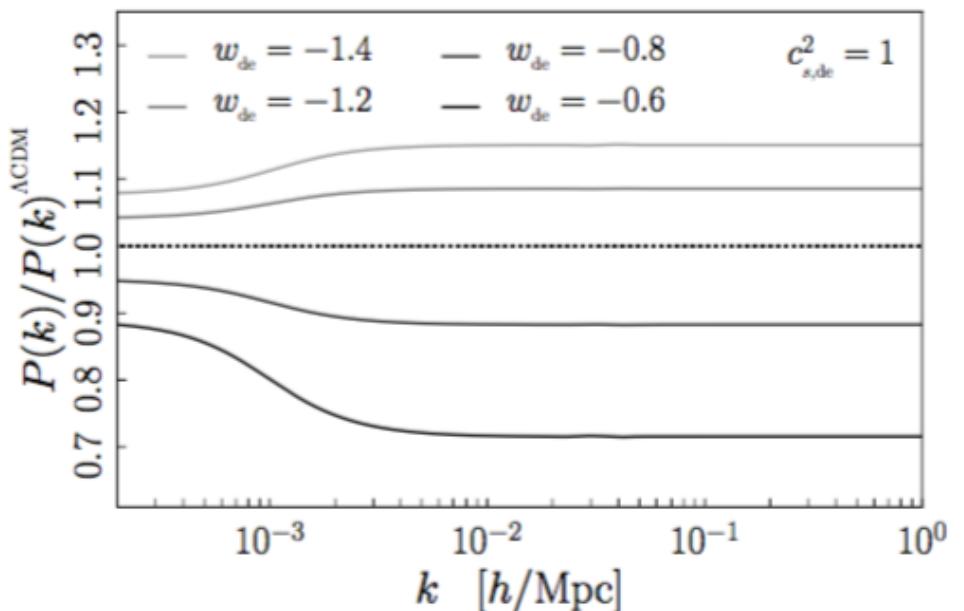
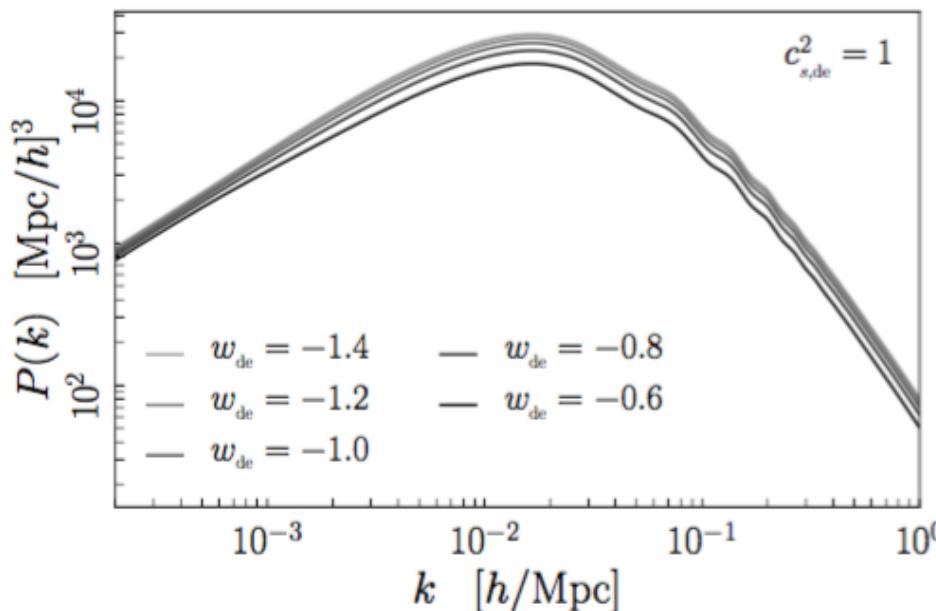
Gravité modifiée, énergie sombre et observations : le spectre de puissance de la matière

Les perturbations cosmologiques sont vues comme des variables aléatoires obéissant à des lois de probabilité gaussiennes dont la variance est directement reliée au spectre de puissance.

$$f(\bar{\Delta}; R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(R)} \exp\left(-\frac{\bar{\Delta}^2}{2\sigma^2(R)}\right),$$

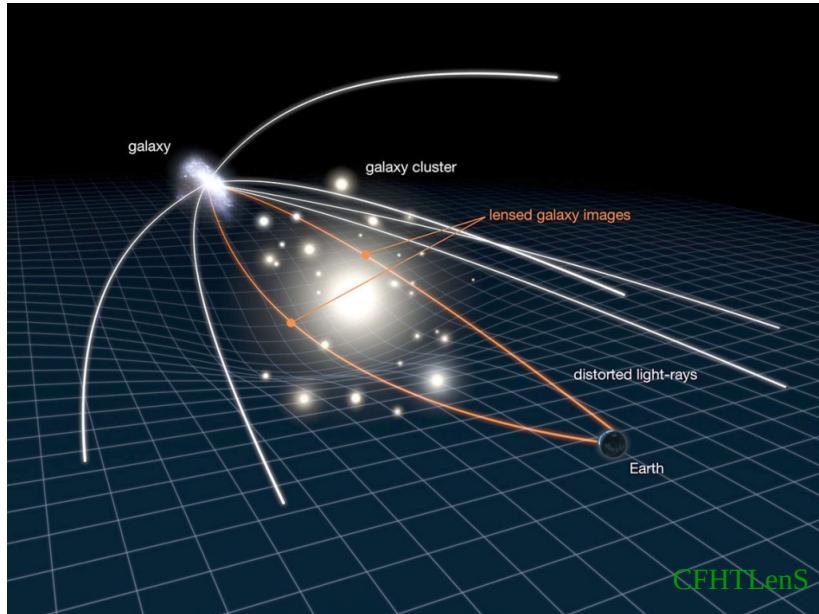
$$\sigma^2(R) = \int_0^\infty \frac{dk}{k} \frac{k^3}{2\pi^2} P(k) W(kR)^2 \quad \text{avec} \quad W(x) = \frac{3}{x^3} (\sin x - x \cos x)$$

$$P(k) \equiv \frac{2\pi^2}{k^3} \Delta_m^2 \mathcal{P}_R(k)$$



Le spectre de puissance est un **bon traceur** de l'énergie sombre.
Mesure compliquée : **biaisées par la physique non-linéaire et processus astrophysiques**

Gravité modifiée, énergie sombre et observations : le lentillage gravitationnel des galaxies



La lumière provenant des galaxies lointaines subit des distorsions à cause des trous de potentiel gravitationnel qui se trouvent sur son chemin.

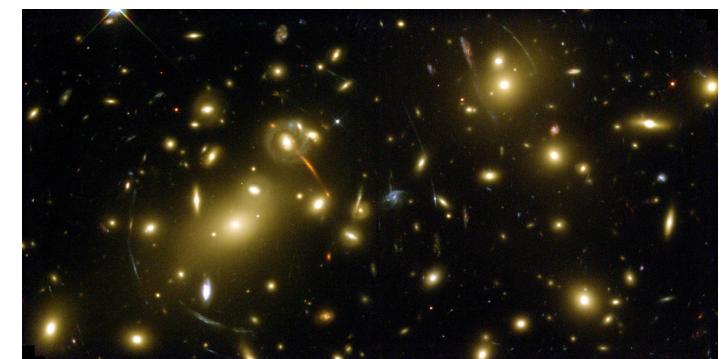
$$ds^2 = -(1 + 2\psi) dt^2 + (1 - 2\phi) dx^2$$

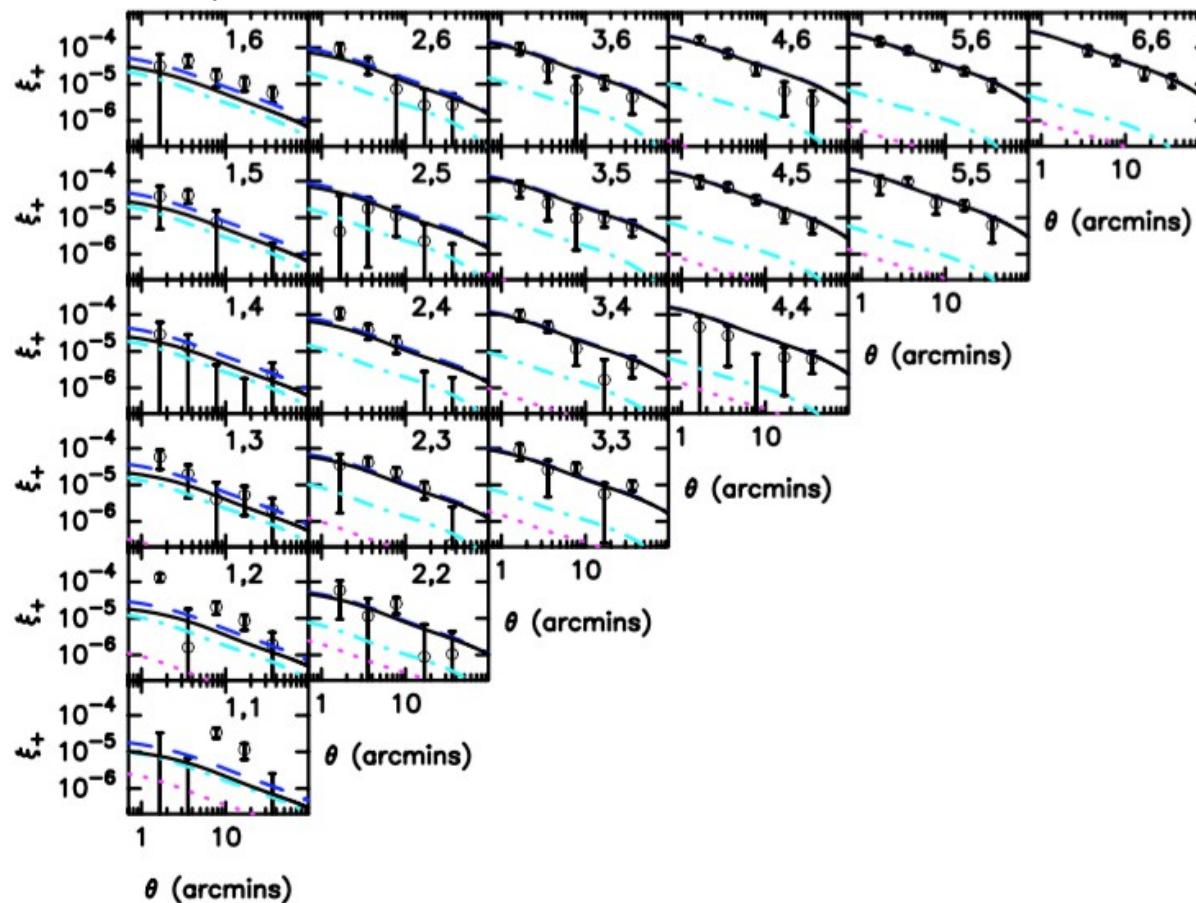
Les trous de potentiel sont équivalents à un indice de réfraction : $v = c/n$ avec $n = 1 - 2\Phi_{WL}$

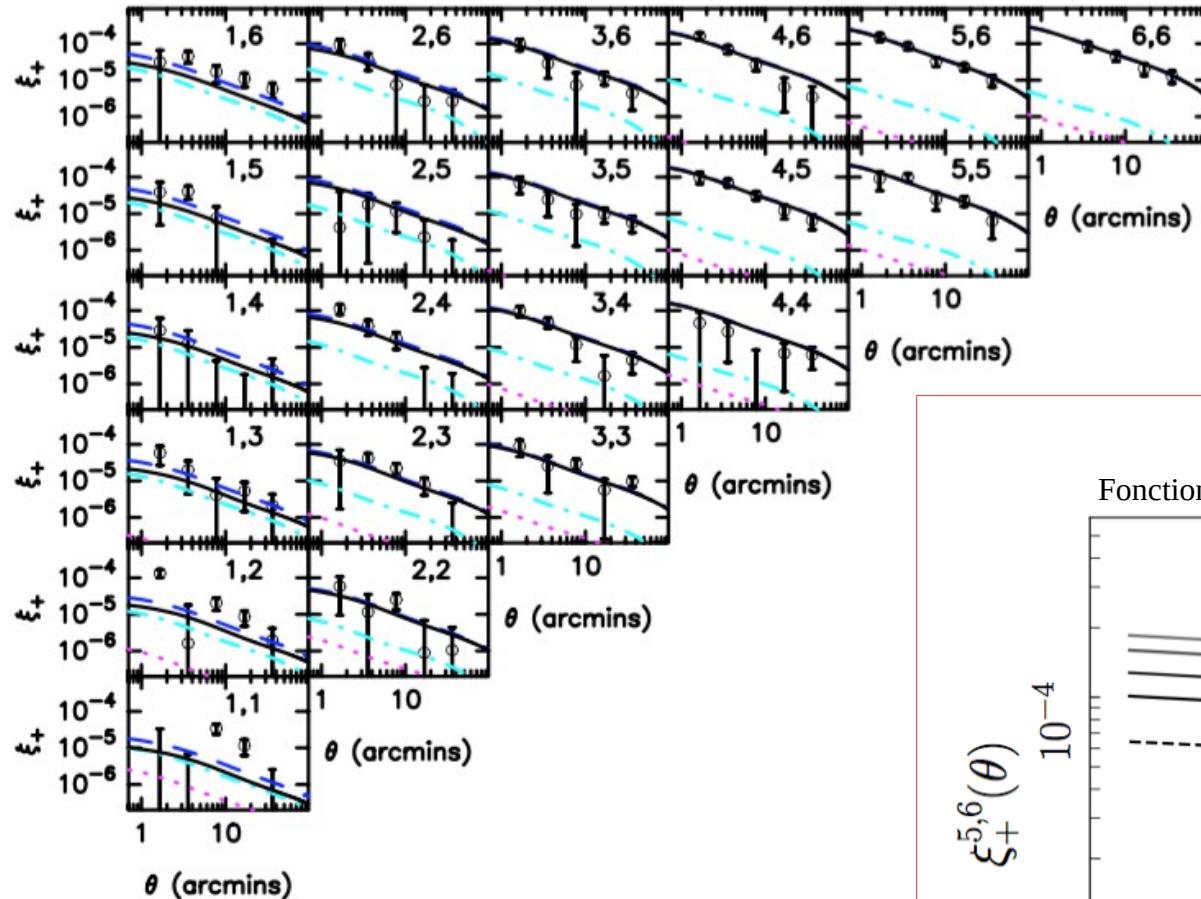
où le potentiel du « weak lensing » est $\Phi_{WL} = \frac{\phi + \psi}{2}$

A partir d'un catalogue de galaxies, on calcule une observable clé,
la fonction de corrélation à deux points des ellipticités

$$\xi_{\pm}(\theta) = \frac{1}{2\pi} \int d\ell J_{\pm}(\ell\theta) P^{\kappa}(\ell)$$



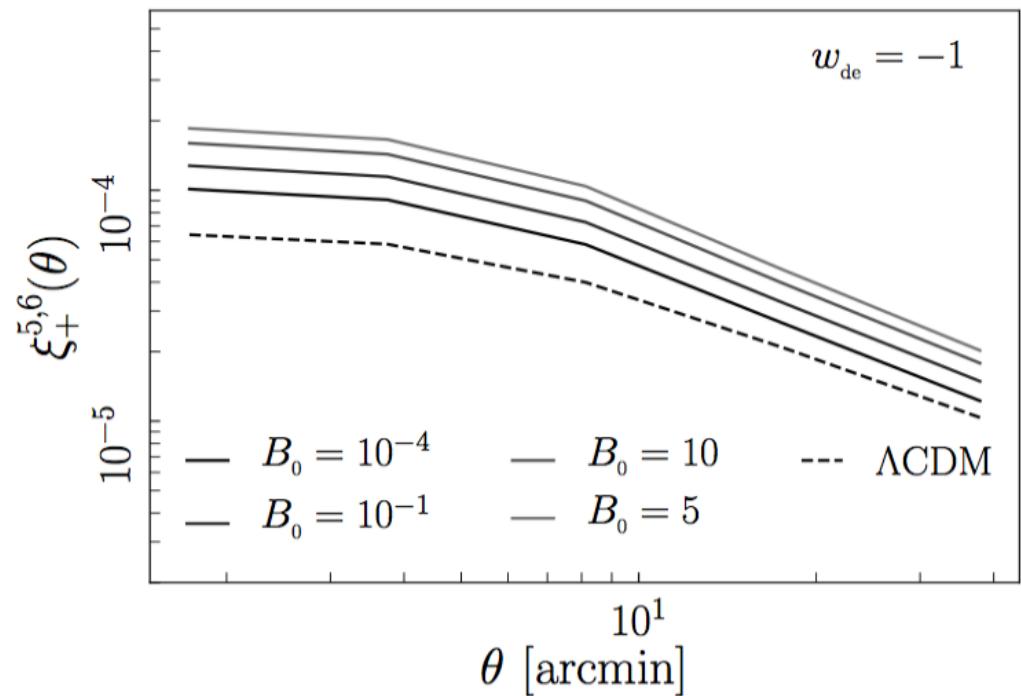




Battye, BB, Pace,
in prep.



Fonction de corrélation des ellipticités

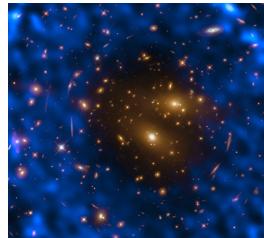


Sonde prometteuse pour les missions WFIRST, EUCLID et LSST

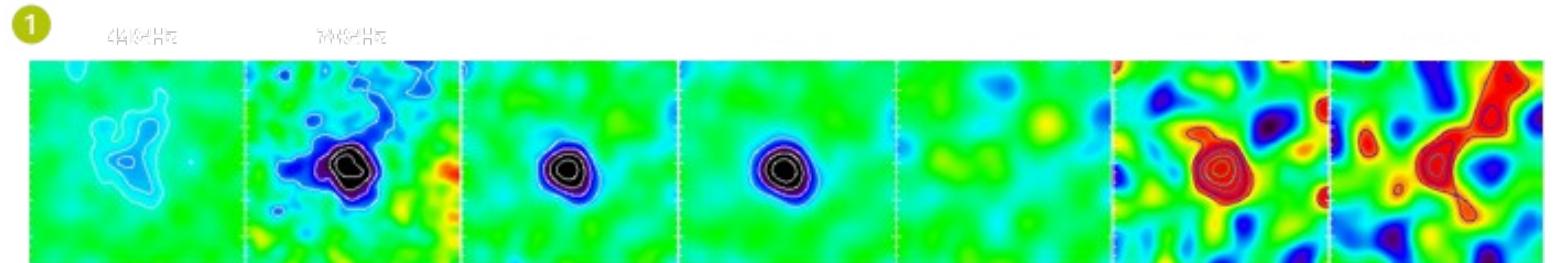
L'effet Sunyaev Zeldovich : un traceur de l'énergie sombre ?

L'effet Sunyaev Zeldovich (1972) : paramètre de Compton

Diffusion Compton des photons **CMB** sur le gaz des électrons environnant aux **amas de galaxies**.
Conséquence : **distorsion spectrale** du fond diffus cosmologique !



ALMA 17

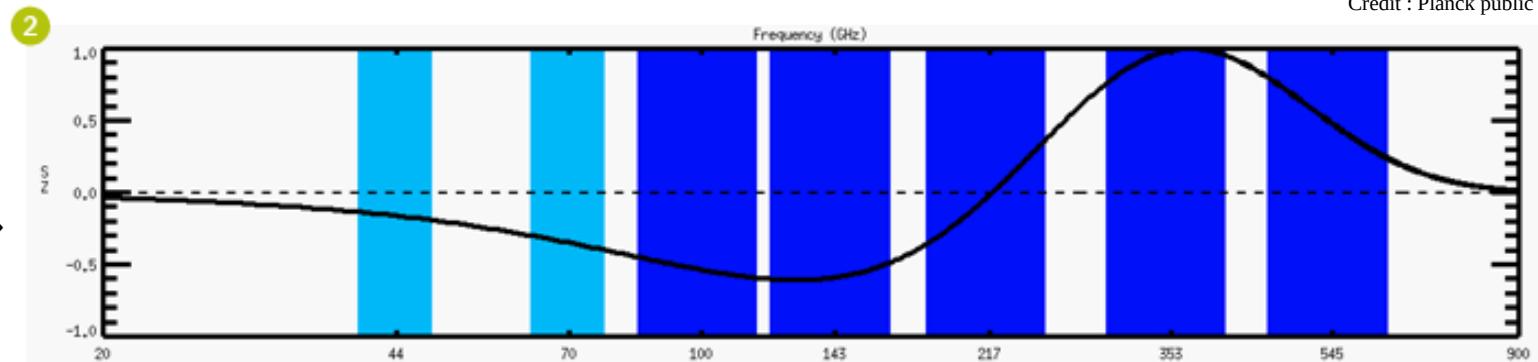


Credit : Planck public

1
 $\Delta T / T_{\text{CMB}} \propto y$

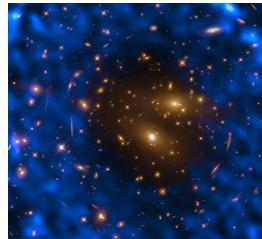
Paramètre de Compton « y »

$$y \equiv \int ds \frac{n_e k_B T_e}{m_e c^2} \sigma_T = \int ds \frac{P_e}{m_e c^2} \sigma_T$$

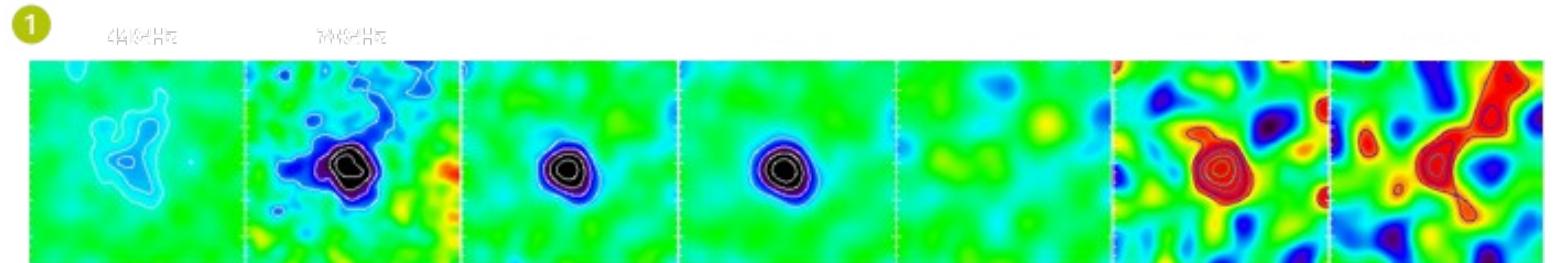


L'effet Sunyaev Zeldovich (1972) : paramètre de Compton

Diffusion Compton des photons **CMB** sur le gaz des électrons environnant aux **amas de galaxies**.
Conséquence : **distorsion spectrale** du fond diffus cosmologique !



ALMA 17

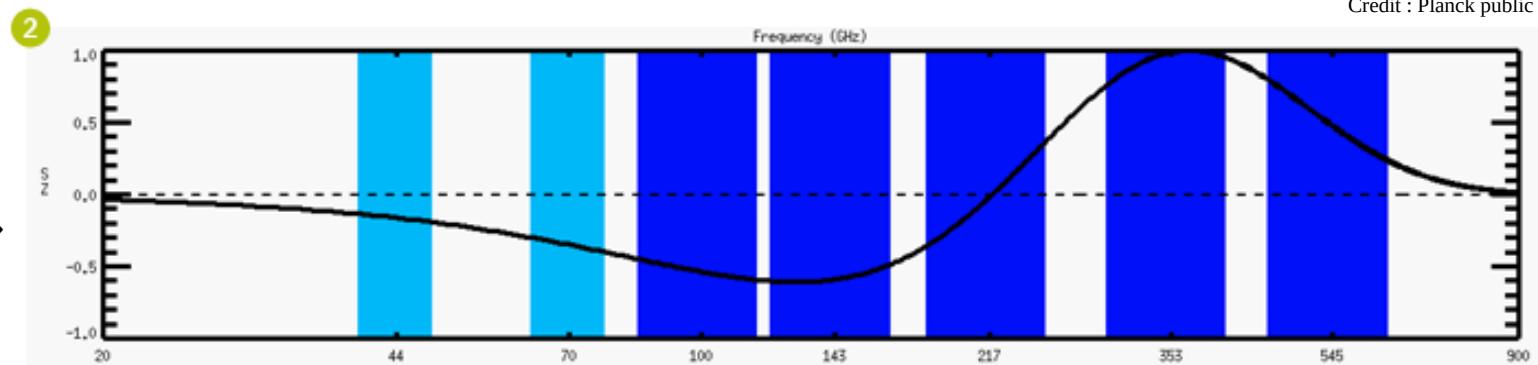


Credit : Planck public

$$\Delta T / T_{\text{CMB}} \propto y$$

Paramètre de Compton « y »

$$y \equiv \int ds \frac{n_e k_B T_e}{m_e c^2} \sigma_T = \int ds \frac{P_e}{m_e c^2} \sigma_T$$

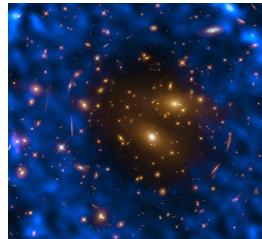


Décomposition de la carte « y » du ciel entier sur la base des harmoniques sphériques

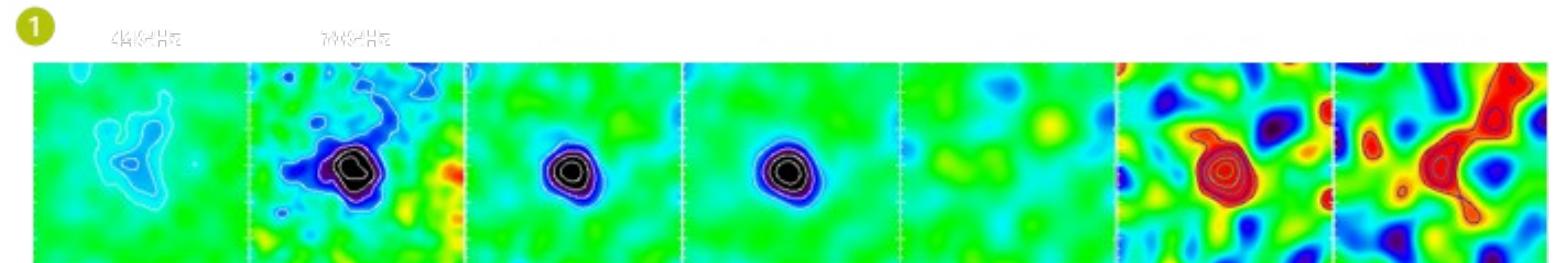
$$\tilde{y}(\mathbf{n}) = \sum_{\ell,m} y_{\ell m} Y_{\ell m}(\mathbf{n}) \quad \text{et calcul du spectre de puissance de « } y \text{ » : } C_{\ell}^{y^2} = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_m y_{\ell m} y_{\ell m}^*$$

L'effet Sunyaev Zeldovich (1972) : paramètre de Compton

Diffusion Compton des photons **CMB** sur le gaz des électrons environnant aux **amas de galaxies**.
Conséquence : **distorsion spectrale** du fond diffus cosmologique !



ALMA 17

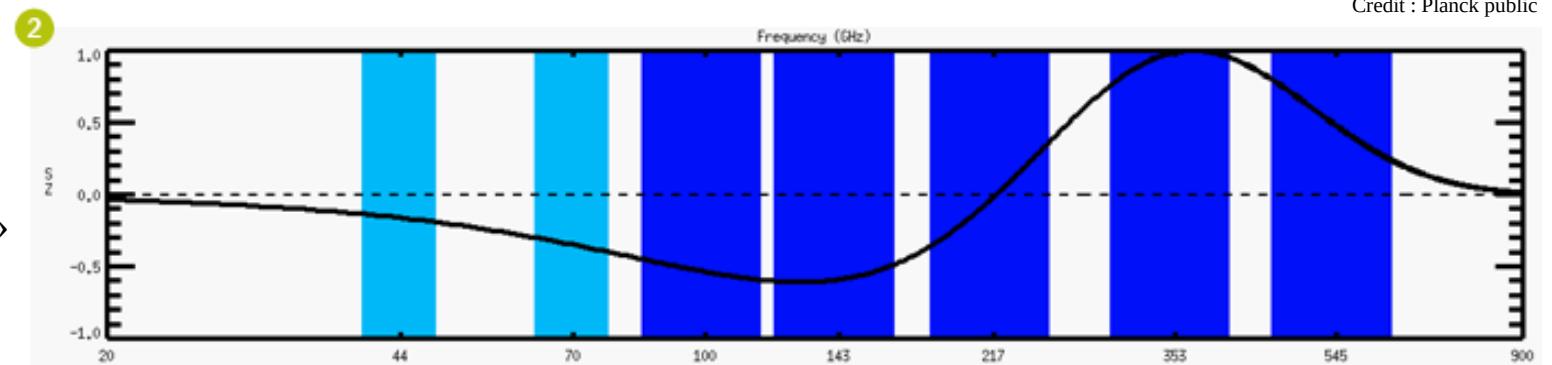


Credit : Planck public

$$\Delta T / T_{\text{CMB}} \propto y$$

Paramètre de Compton « y »

$$y \equiv \int ds \frac{n_e k_B T_e}{m_e c^2} \sigma_T = \int ds \frac{P_e}{m_e c^2} \sigma_T$$



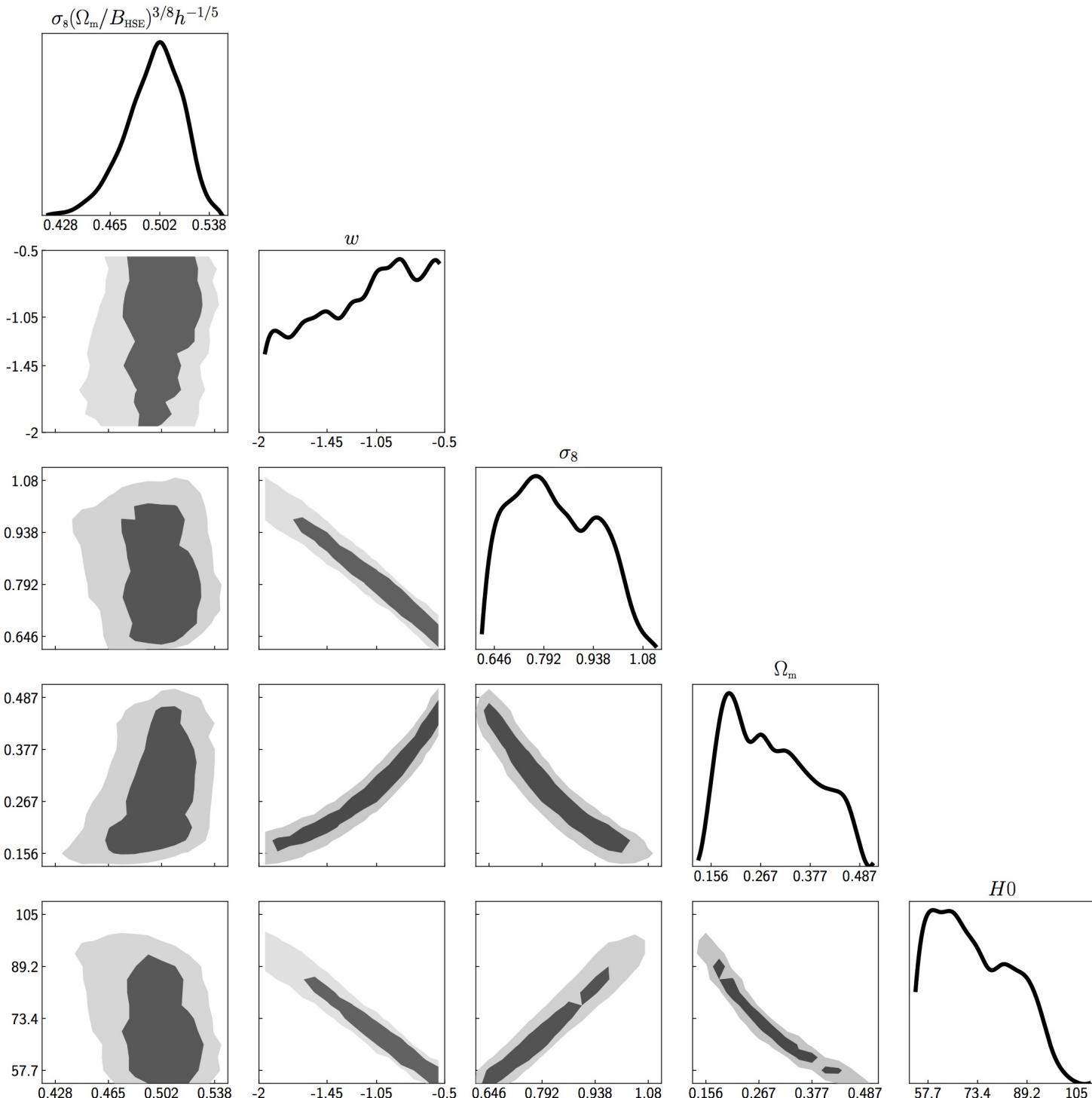
Décomposition de la carte « y » du ciel entier sur la base des harmoniques sphériques

$$\tilde{y}(\mathbf{n}) = \sum_{\ell,m} y_{\ell m} Y_{\ell m}(\mathbf{n}) \quad \text{et calcul du spectre de puissance de « } y \text{ » : } C_{\ell}^{y^2} = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_m y_{\ell m} y_{\ell m}^*$$

Carte « y » Planck : **effet SZ thermique** + composantes résiduelles d'**avant-plan**

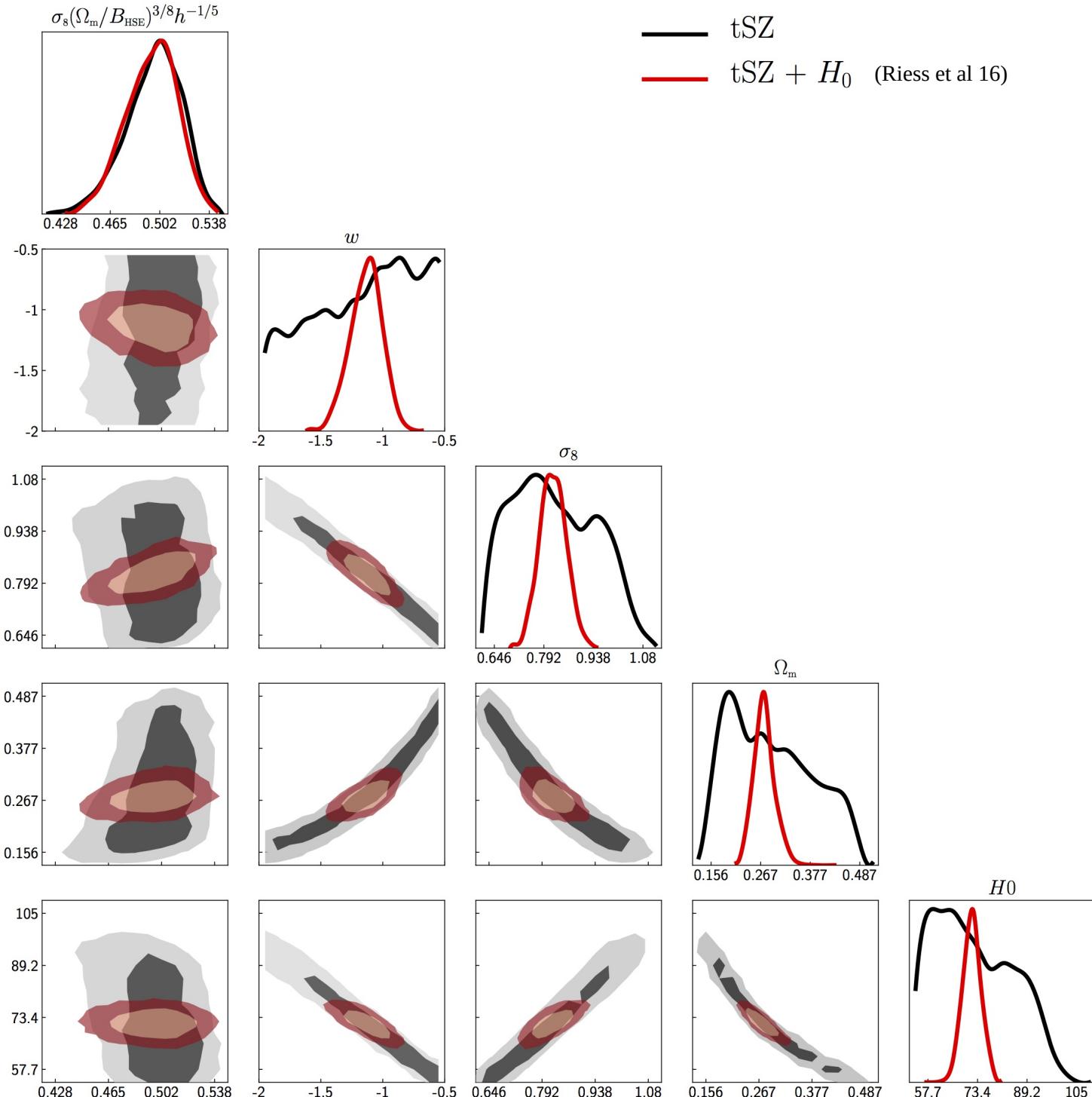
$$C_{\ell}^{y^2} = C_{\ell}^{\text{tSZ}} + A_{\text{CIB}} C_{\ell}^{\text{CIB}} + A_{\text{IR}} C_{\ell}^{\text{IR}} + A_{\text{RS}} C_{\ell}^{\text{RS}} + A_{\text{CN}} C_{\ell}^{\text{CN}}$$

Peut-on contraindre l'équation d'état de l'énergie sombre avec l'effet SZ ?



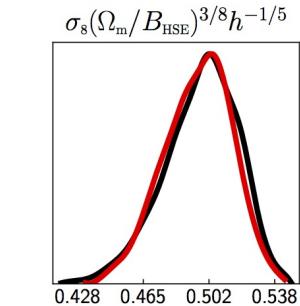
**BB, Comis, Komatsu, Macias-Perez,
in prep.**

Peut-on contraindre l'équation d'état de l'énergie sombre avec l'effet SZ ?

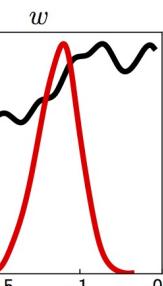
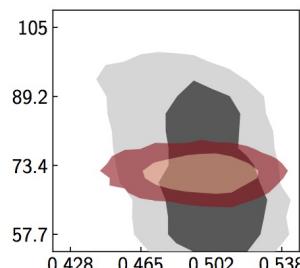
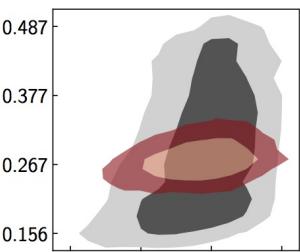
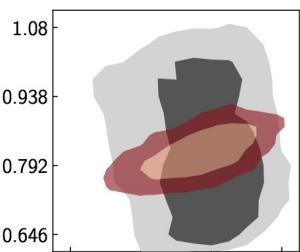
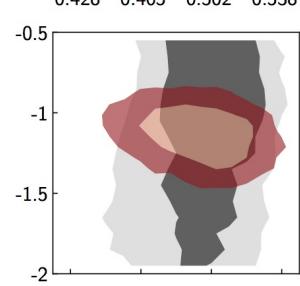


**BB, Comis, Komatsu, Macias-Perez,
in prep.**

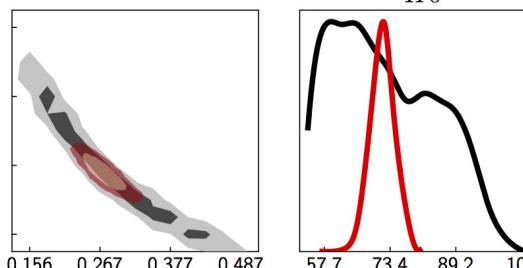
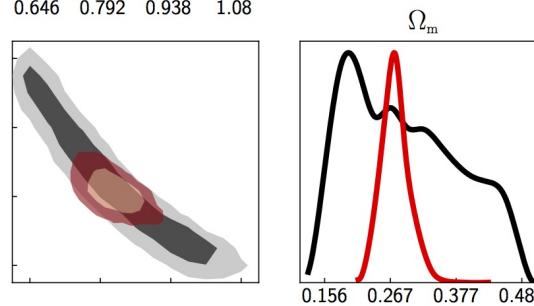
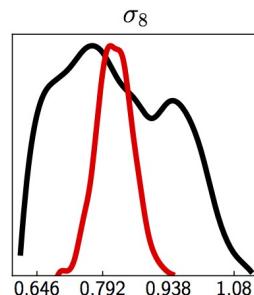
Peut-on contraindre l'équation d'état de l'énergie sombre avec l'effet SZ ?



— tSZ
— tSZ + H_0 (Riess et al 16)



$$w_{\text{de}} = -1.13^{+0.14}_{-0.13}, \quad \sigma_8 = 0.819 \pm 0.041, \quad \Omega_m = 0.275 \pm 0.025.$$



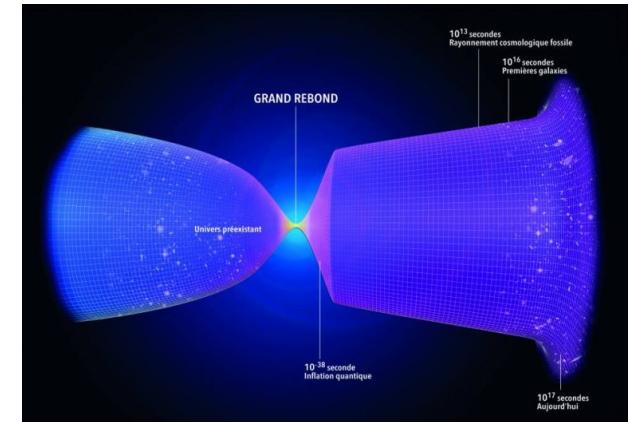
Le SZ permet des contraintes aussi fortes que « CMB lensing » sur l'énergie sombre.

BB, Comis, Komatsu, Macias-Perez,
in prep.

Conclusions

Gravité quantique

- Cosmologie quantique à boucles :
 - Résolution de la singularité du Big Bang
 - Spectre de puissance des perturbations primordiales
 - Modèles falsifiables



Conclusions

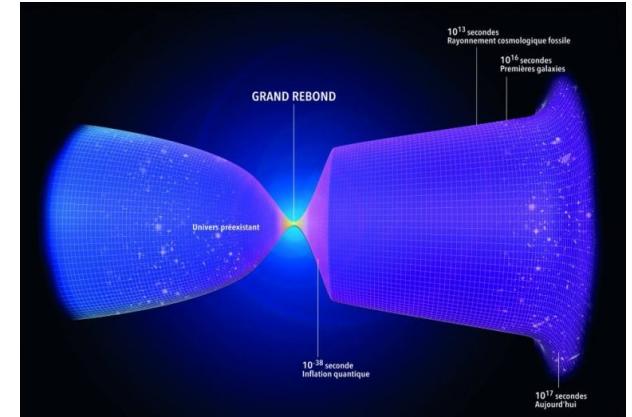
Gravité quantique

- Cosmologie quantique à boucles :

Résolution de la singularité du Big Bang

Spectre de puissance des perturbations primordiales

Modèles falsifiables

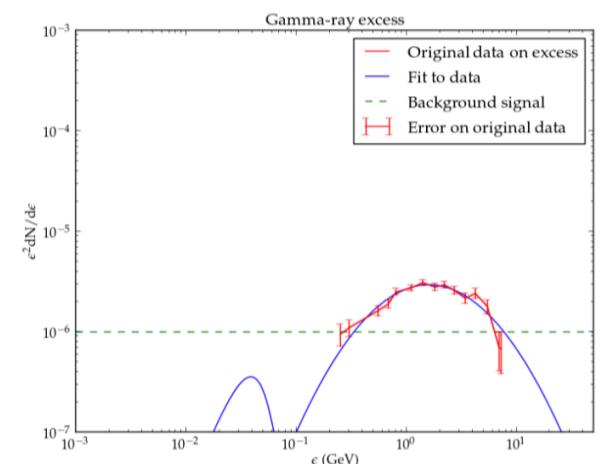


- Étoiles de Planck :

Rayonnement détectable

Explication possible de l'excès vu par Fermi-LAT

Relation redshift-énergie caractéristique



Barrau, **BB**, Vidotto, Schutten
Phys. Lett. B (2016)
&
Barrau, **BB**, Vidotto, Weimer
JCAP (2016)

Conclusions

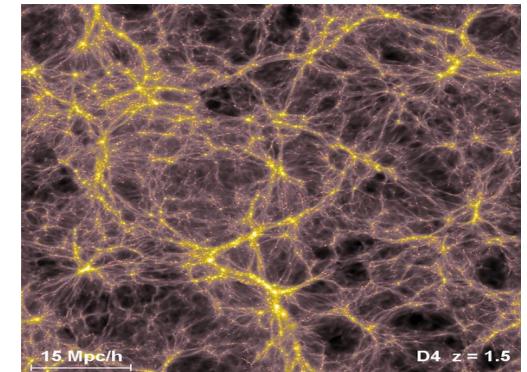
Énergie sombre

- L'approche *équation d'état pour les perturbations*

Formalisme pour décrire la plupart des théories MG et DE

Code numérique CLASS-EOS

Contraintes sur les paramètres cosmologiques



Conclusions

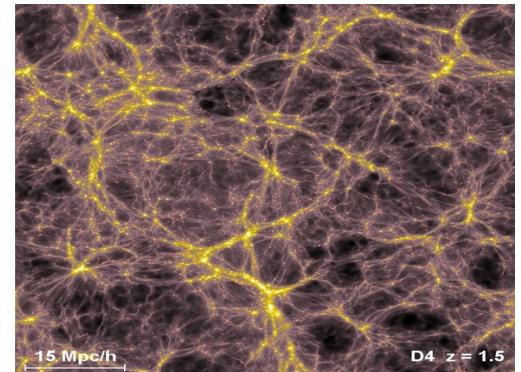
Énergie sombre

- L'approche *équation d'état pour les perturbations*

Formalisme pour décrire la plupart des théories MG et DE

Code numérique CLASS-EOS

Contraintes sur les paramètres cosmologiques

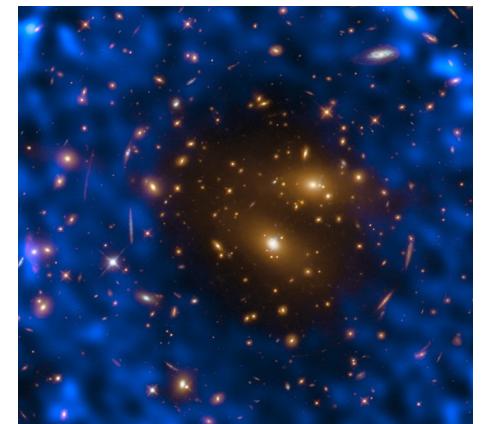


- Effet Sunyaev Zeldovich

Nouvelle sonde pour l'énergie sombre

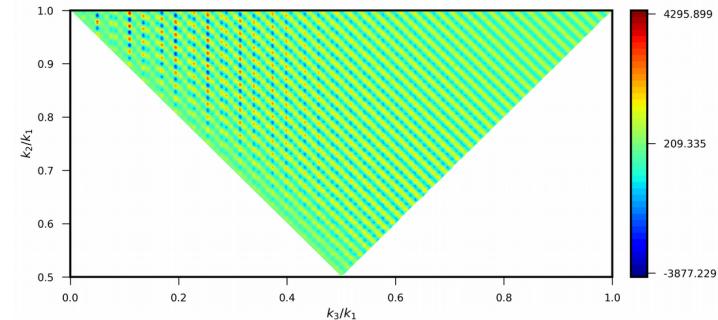
Module numérique adapté à CLASS et MontePython

Contraintes compétitives avec le lensing CMB



Gravité quantique

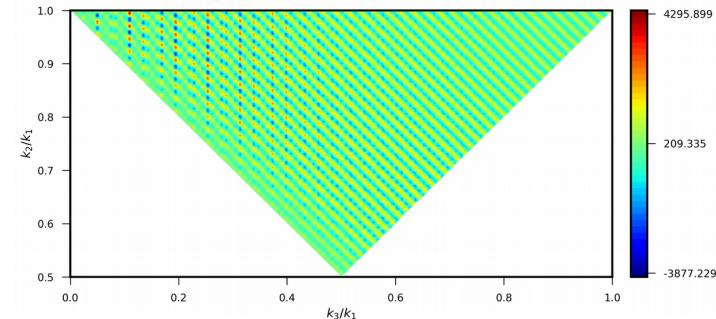
- Liens entre gravité quantique à boucles et cosmologie
- Calculs des amplitudes de transitions
- Non-gaussianités
- Relations de dispersions modifiées
- Distorsions spectrales du CMB



Agullo, **BB**, Vijaykumar (in prep.)

Gravité quantique

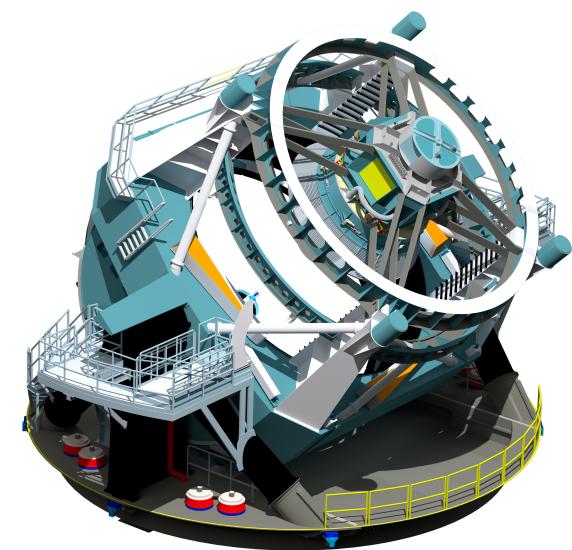
- Liens entre gravité quantique à boucles et cosmologie
- Calculs des amplitudes de transitions
- Non-gaussianités
- Relations de dispersions modifiées
- Distorsions spectrales du CMB



Agullo, BB, Vijaykumar (in prep.)

Énergie sombre

- Identifier des observables clés
- Modélisation des processus astrophysiques
- Régime non-linéaire
- Campagnes d'observations EUCLID-LSST



LSST

Articles publiés :

Conceptual issues in loop quantum cosmology

A. Barrau and B. Bolliet, Int.J.Mod.Phys. D25 (2016)

Observational exclusion of a consistent quantum cosmology scenario

B. Bolliet, A. Barrau, J. Grain, S. Schander, Phys.Rev. D93 (2016)

Primordial scalar power spectrum from the Euclidean big bounce

S. Schander, A. Barrau, B. Bolliet, L. Linsefors, J. Mielczarek, J. Grain, Phys.Rev. D93 (2016)

f(R) as a dark energy fluid

R. Battye, B. Bolliet, J.A. Pearson, Phys.Rev. D93 (2016)

Phenomenology of bouncing black holes in quantum gravity: a closer look

A. Barrau, B. Bolliet, F. Vidotto, C. Weimer, JCAP (2016)

Comparison of primordial tensor power spectra from the deformed algebra and dressed metric approaches in loop quantum cosmology

B. Bolliet, C. Stahl, J. Grain, L. Linsefors, A. Barrau, Phys.Rev. D91 (2015)

Some clarifications on the duration of inflation in Loop Quantum Cosmology

B. Bolliet, A. Barrau, F. Moulin, K. Martineau, Class. Quant. Grav (2017)

Bouncing black holes in quantum gravity and the Fermi gamma-ray excess

A. Barrau, B. Bolliet, M. Schutten, F. Vidotto, Phys. Lett. B (2016)

Articles en préparation :

Probing the acceleration of the universe with the thermal Sunyaev-Zel'dovich power spectrum

B. Bolliet, B. Comis, E. Komatsu, J.-M. Perez

A unified framework for studying dark sector theories: the equation of state approach and its numerical implementation

R. Battye, B. Bolliet, F. Pace

Primordial non-gaussianity In Loop Quantum Cosmology

I. Agullo, B. Bolliet, V. Sreenath

A comparison of Einstein-Boltzman solvers for testing General Relativity

Bellini et al

Au-delà de la relativité générale : Certains aspects de la cosmologie quantique à boucles, des trous noirs et de l'univers sombre.

Thèse présentée le 24 juillet 2017
au Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie de Grenoble

Boris BOLLIET

Sous la direction d'Aurélien BARRAU

Devant un jury composé de Dominique BOUTIGNY,
Ruth DURRER, Gilles HENRI, Karim NOUI et Patrick PETER

