





- ❑ Qu'est-ce que la théorie de l'inflation?
  
- ❑ Comment réaliser une phase d'inflation?
  
- ❑ Quelle est l'origine des grandes structures et des anisotropies du rayonnement cosmologique de fond? Réponse donnée par la théorie de l'inflation.
  
- ❑ L'inflation et les données récentes du satellite Planck

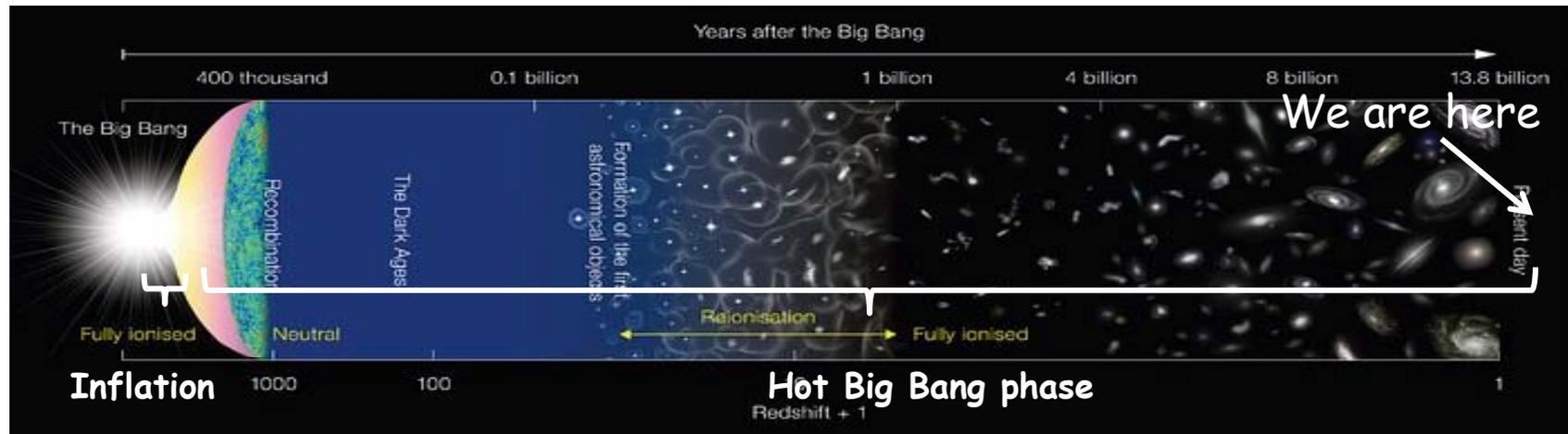


- ❑ Qu'est-ce que la théorie de l'inflation?
  
- ❑ Comment réaliser une phase d'inflation?
  
- ❑ Quelle est l'origine des grandes structures et des anisotropies du rayonnement cosmologique de fond? Réponse donnée par la théorie de l'inflation.
  
- ❑ L'inflation et les données récentes du satellite Planck

## Inflation in brief



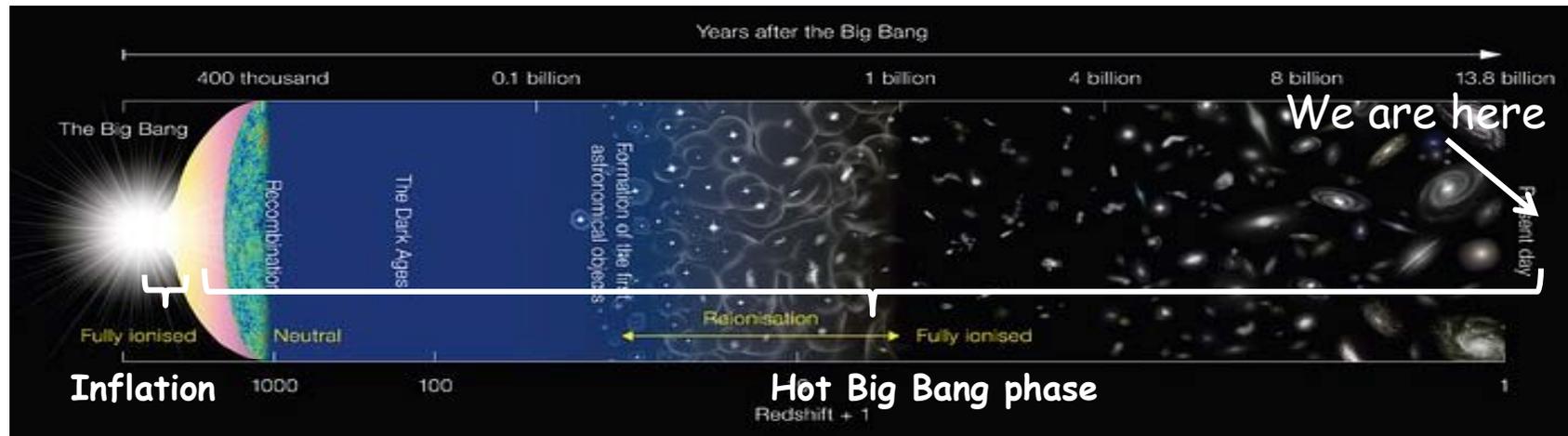
L'inflation est une phase d'expansion acceleree et exponentielle ayant eu lieu dans l'univers primordial, a de tres hautes energies



## Inflation in brief



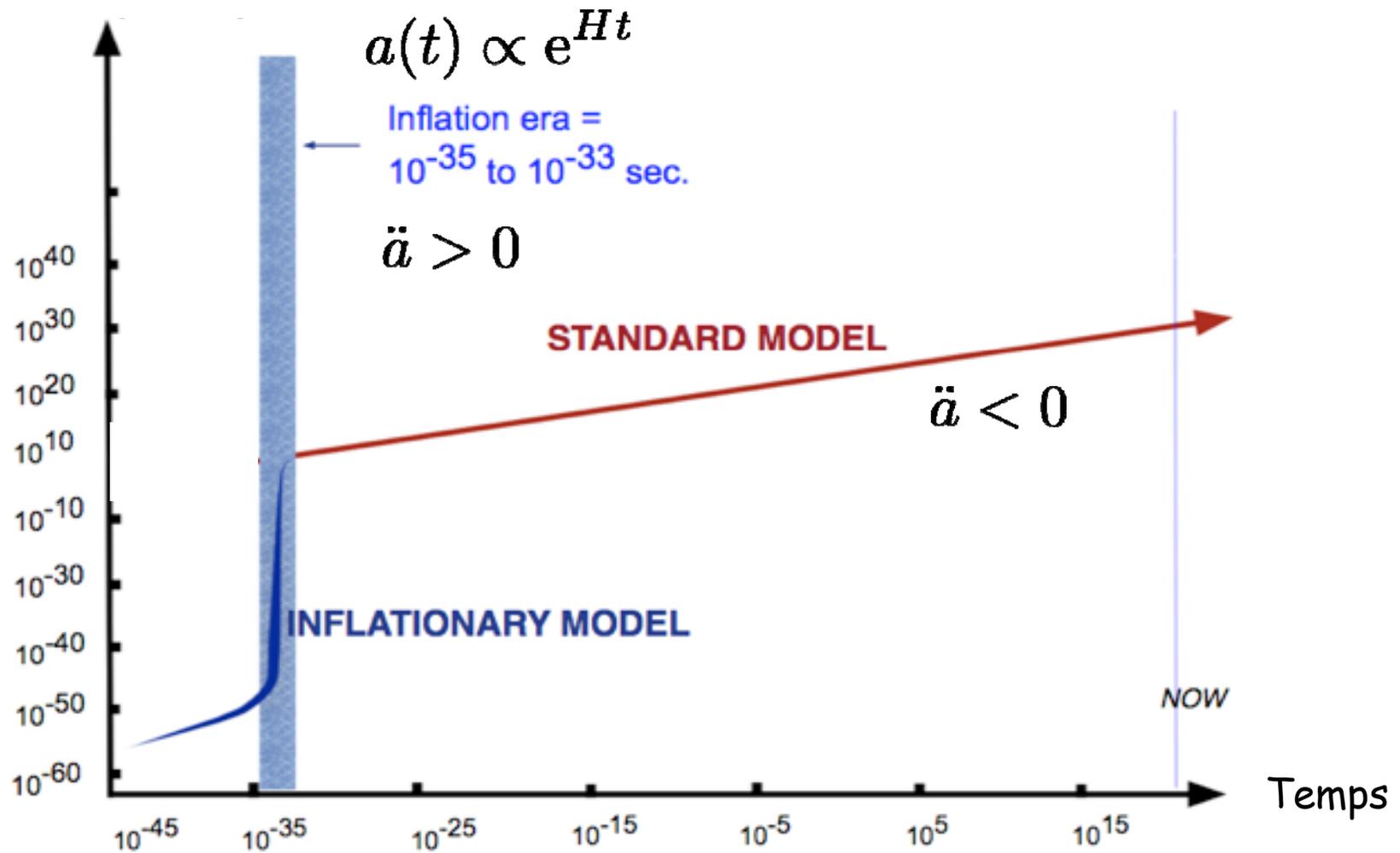
L'inflation est une phase d'expansion acceleree et exponentielle ayant eu lieu dans l'univers primordial, a de tres hautes energies



L'inflation ne remplace pas le modele standard de la cosmologie (le modele dit du "Big Bang chaud"), elle le complete



Facteur d'échelle  $a(t)$





L'échelle d'énergie à laquelle l'inflation a eu lieu n'est que très peu contrainte

$$10^{-2} \text{ GeV} < \rho^{1/4} < 10^{16} \text{ GeV}$$

Echelle de nucleosynthese

Echelle de grande unification

**Remarque:** une contrainte sur la densité d'énergie est aussi une contrainte sur le taux d'expansion

$$H^2 = \left( \frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{\rho}{3M_{\text{Pl}}^2}$$



Le modèle standard, malgré des succès impressionnants, a des aspects qu'il est difficile de comprendre et/ou qui semblent très peu naturels :

- Problème de la platitude
- Problème de l'horizon
- Origine des galaxies et des anisotropies du rayonnement cosmologique de fond
- etc ...

Toutes ces questions sont liées aux conditions initiales dont il est nécessaire de faire le postulat pour que fonctionne le modèle standard. Ce dernier n'est pas en contradiction avec les observations (au contraire!) mais les conditions initiales (nous) paraissent "artificielles"

**L'inflation résoud ces difficultés**



- ❑ Qu'est-ce que la théorie de l'inflation?
  
- ❑ Comment réaliser une phase d'inflation?
  
- ❑ Quelle est l'origine des grandes structures et des anisotropies du rayonnement cosmologique de fond? Réponse donnée par la théorie de l'inflation.
  
- ❑ L'inflation et les données récentes du satellite Planck



La dynamique de l'univers est contrôlée par la gravitation, i.e. par les équations d'Einstein

$$G_{\mu\nu}[g_{\mu\nu}] = \frac{8\pi G}{c^4} \sum_{i=1}^N T_{\mu\nu}^{(i)}$$

Géométrie ←

↓  
Matière



La dynamique de l'univers est contrôlée par la gravitation, i.e. par les équations d'Einstein

$$G_{\mu\nu}[g_{\mu\nu}] = \frac{8\pi G}{c^4} \sum_{i=1}^N T_{\mu\nu}^{(i)} \longrightarrow \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{1}{6M_{\text{Pl}}^2} (\rho + 3p)$$

Géométrie ←

↓  
Matière



La dynamique de l'univers est contrôlée par la gravitation, i.e. par les équations d'Einstein

$$G_{\mu\nu}[g_{\mu\nu}] = \frac{8\pi G}{c^4} \sum_{i=1}^N T_{\mu\nu}^{(i)} \quad \longrightarrow \quad \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{1}{6M_{\text{Pl}}^2} (\rho + 3p)$$

Géométrie ←

↓  
Matière

**La pression doit être négative!**



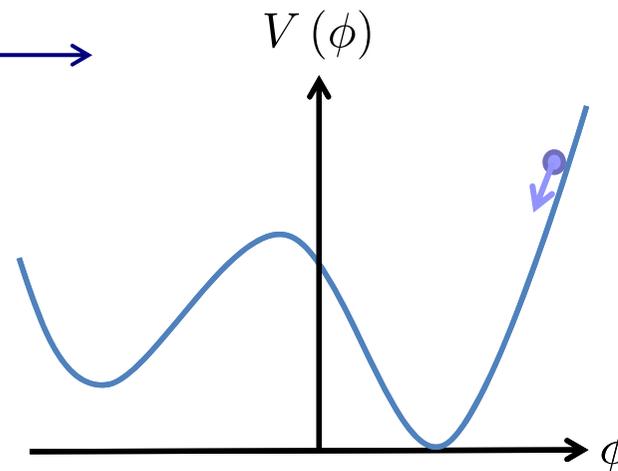
La dynamique de l'univers est contrôlée par la gravitation, i.e. par les équations d'Einstein

$$G_{\mu\nu}[g_{\mu\nu}] = \frac{8\pi G}{c^4} \sum_{i=1}^N T_{\mu\nu}^{(i)} \quad \longrightarrow \quad \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{1}{6M_{\text{Pl}}^2} (\rho + 3p)$$

Géometrie ←

La pression doit être négative!

- Aux grandes énergies, on doit décrire la matière à l'aide de la théorie des champs
- Univers homogène et isotrope: particule de spin zero, ie champ scalaire "l'inflaton"





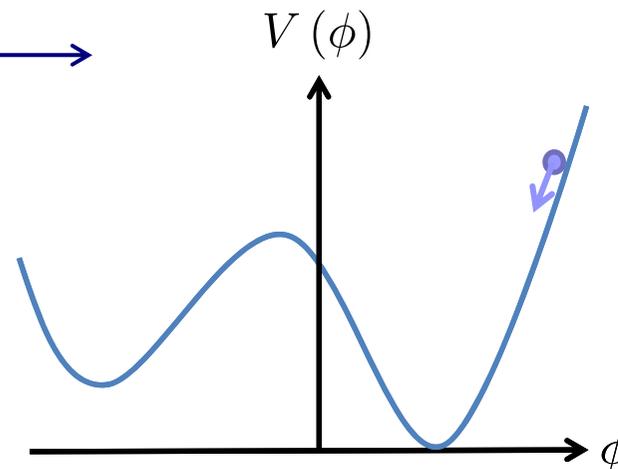
La dynamique de l'univers est contrôlée par la gravitation, i.e. par les équations d'Einstein

$$G_{\mu\nu}[g_{\mu\nu}] = \frac{8\pi G}{c^4} \sum_{i=1}^N T_{\mu\nu}^{(i)} \quad \longrightarrow \quad \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{1}{6M_{\text{Pl}}^2} (\rho + 3p)$$

Géometrie ←

La pression doit être négative!

- Aux grandes énergies, on doit décrire la matière à l'aide de la théorie des champs
- Univers homogène et isotrope: particule de spin zero, ie champ scalaire "l'inflaton"



$$\rho = \frac{\dot{\phi}^2}{2} + V(\phi)$$
$$p = \frac{\dot{\phi}^2}{2} - V(\phi)$$



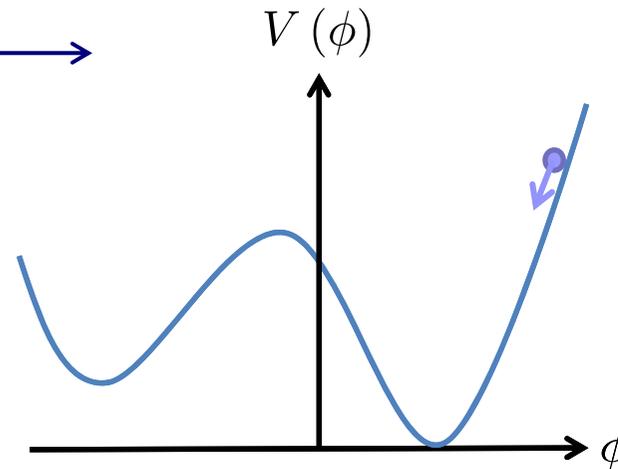
La dynamique de l'univers est contrôlée par la gravitation, i.e. par les équations d'Einstein

$$G_{\mu\nu}[g_{\mu\nu}] = \frac{8\pi G}{c^4} \sum_{i=1}^N T_{\mu\nu}^{(i)} \quad \longrightarrow \quad \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{1}{6M_{\text{Pl}}^2} (\rho + 3p)$$

Géométrie ←

La pression doit être négative!

- Aux grandes énergies, on doit décrire la matière à l'aide de la théorie des champs
- Univers homogène et isotrope: particule de spin zero, ie champ scalaire "l'inflaton"



$$\left. \begin{aligned} \rho &= \frac{\dot{\phi}^2}{2} + V(\phi) \\ p &= \frac{\dot{\phi}^2}{2} - V(\phi) \end{aligned} \right\}$$

$$V(\phi) \gg \frac{\dot{\phi}^2}{2} \Rightarrow p < 0$$

Le potentiel doit être plat



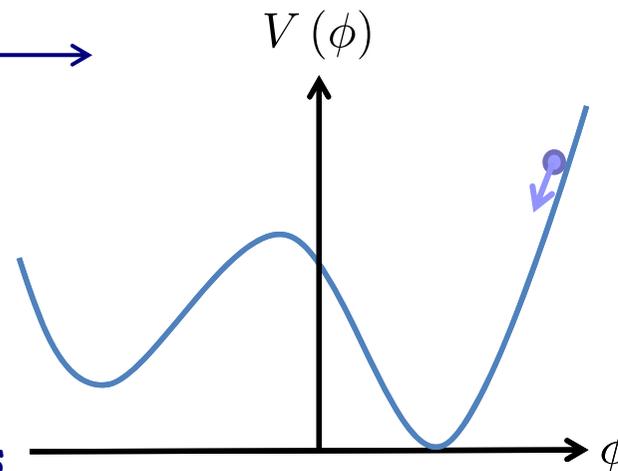
La dynamique de l'univers est contrôlée par la gravitation, i.e. par les équations d'Einstein

$$G_{\mu\nu}[g_{\mu\nu}] = \frac{8\pi G}{c^4} \sum_{i=1}^N T_{\mu\nu}^{(i)} \quad \longrightarrow \quad \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{1}{6M_{\text{Pl}}^2} (\rho + 3p)$$

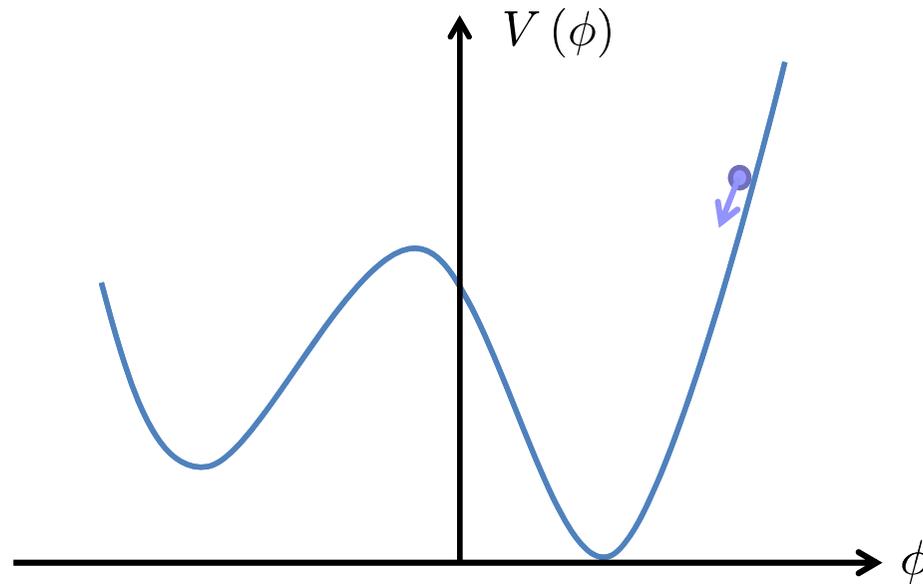
Géometrie ←

La pression doit être négative!

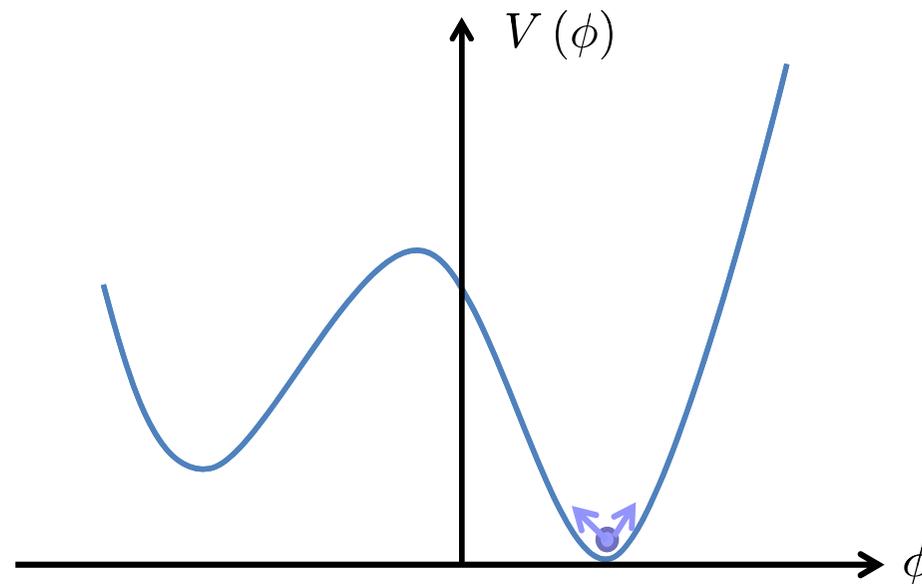
- Aux grandes énergies, on doit décrire la matière à l'aide de la théorie des champs
- Univers homogène et isotrope: particule de spin zero, ie champ scalaire "l'inflaton"
- Lien avec la physique des particules à des énergies inaccessibles au LHC!!



- Nature physique de l'inflaton ... Higgs ou autre champ?
- Quelle est la forme du potentiel de l'inflaton?



On doit arreter la phase d'inflation car sinon le modele du Big Bang chaud (et ses succes) ne pourrait prendre place

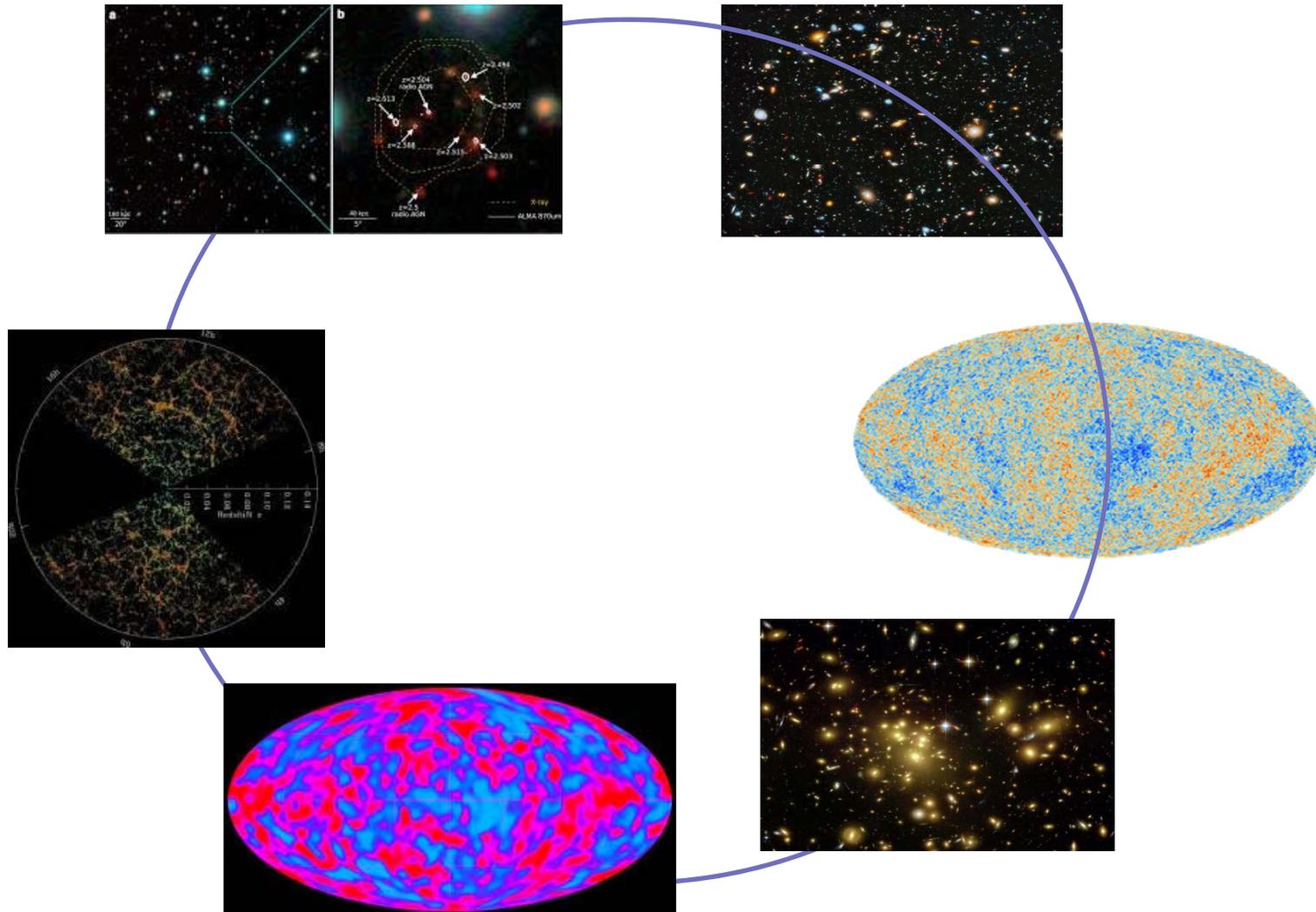


- 1- Quand le potentiel n'est plus assez plat, l'inflation s'arrete
- 2- Le champ se met alors a osciller et a se desintegrer
- 3- Les produits de desintegration thermalise et on commence le modele du Big Bang chaud
- 4- C'est la phase de rechauffement caracterise par la temperature de rechauffement

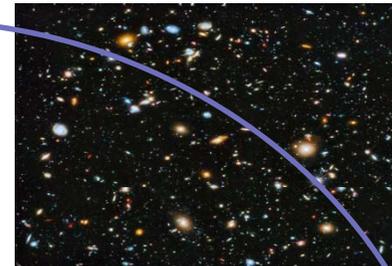
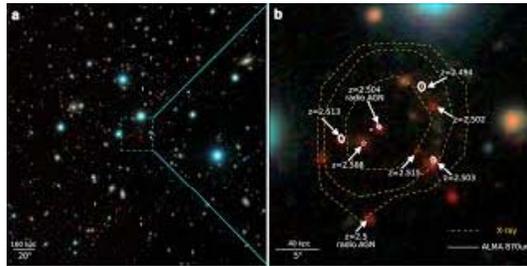


- ❑ Qu'est-ce que la théorie de l'inflation?
  
- ❑ Comment réaliser une phase d'inflation?
  
- ❑ *Quelle est l'origine des grandes structures et des anisotropies du rayonnement cosmologique de fond? Réponse donnée par la théorie de l'inflation.*
  
- ❑ L'inflation et les données récentes du satellite Planck

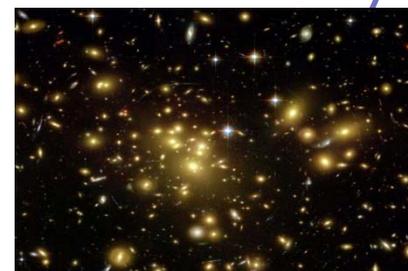
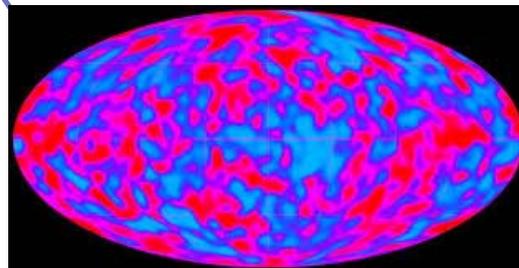
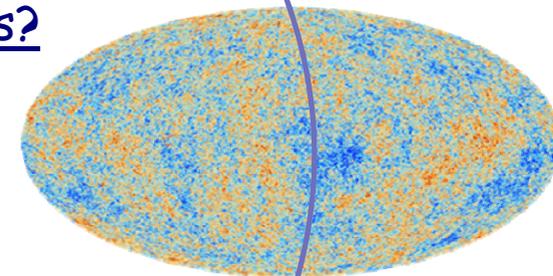
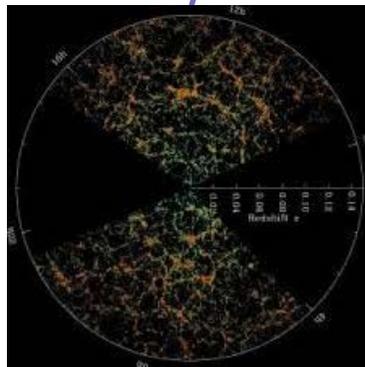
Il y a des inhomogeneites dans l'Univers: galaxies, amas de galaxies, anisotropies du rayonnement cosmologique de fond...



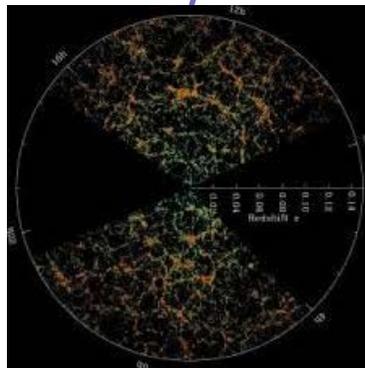
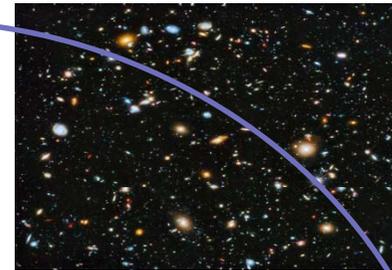
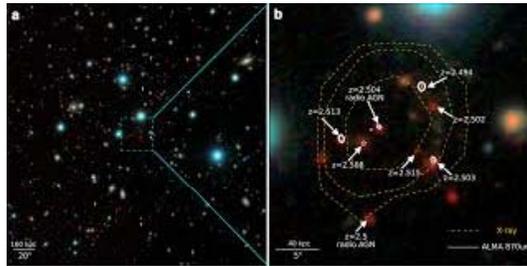
Il y a des inhomogeneites dans l'Univers: galaxies, amas de galaxies, anisotropies du rayonnement cosmologique de fond...



Comment croissent elles?

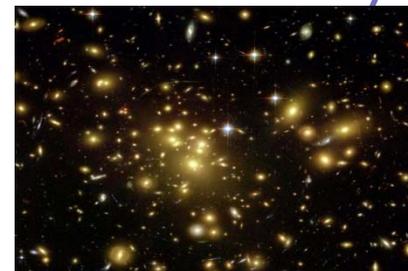
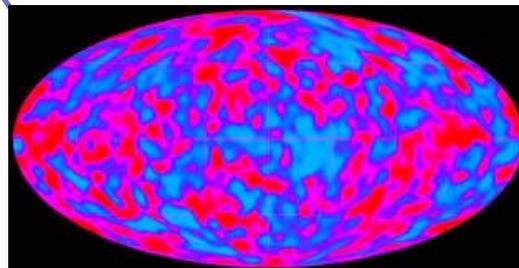
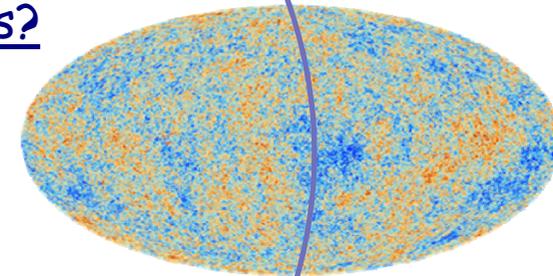


Il y a des inhomogeneites dans l'Univers: galaxies, amas de galaxies, anisotropies du rayonnement cosmologique de fond...



Comment croissent elles?

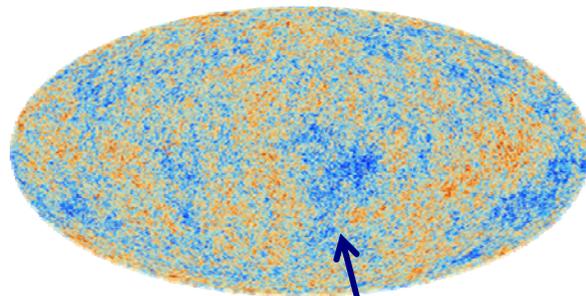
Quelle est leur source?



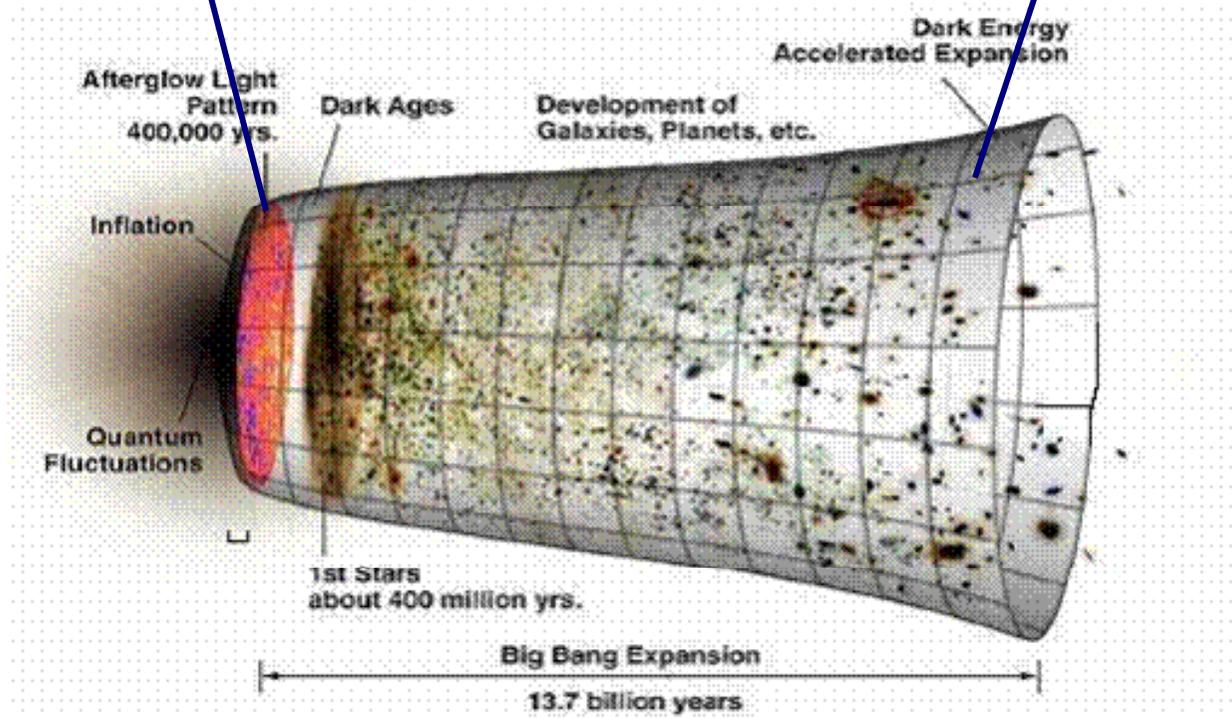
# Quelle est l'origine des fluctuations cosmologiques?



Le mécanisme responsable de l'amplification des perturbations est l'instabilité gravitationnelle ...



Effondrement gravitationnel





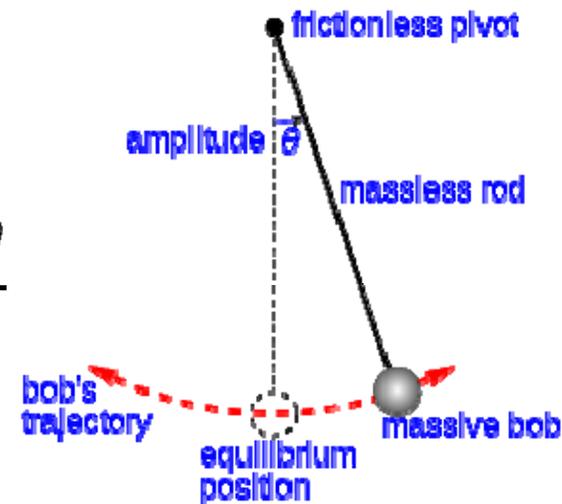
- Selon la théorie de l'inflation, les anisotropies du rayonnement de fond et les galaxies ne sont que des fluctuations quantiques amplifiées à des échelles astrophysiques.

Mécanique classique:

$$\langle E \rangle = 0$$

Mécanique quantique:

$$\langle E \rangle = \frac{\hbar\omega}{2}$$



- Deux types de fluctuations:

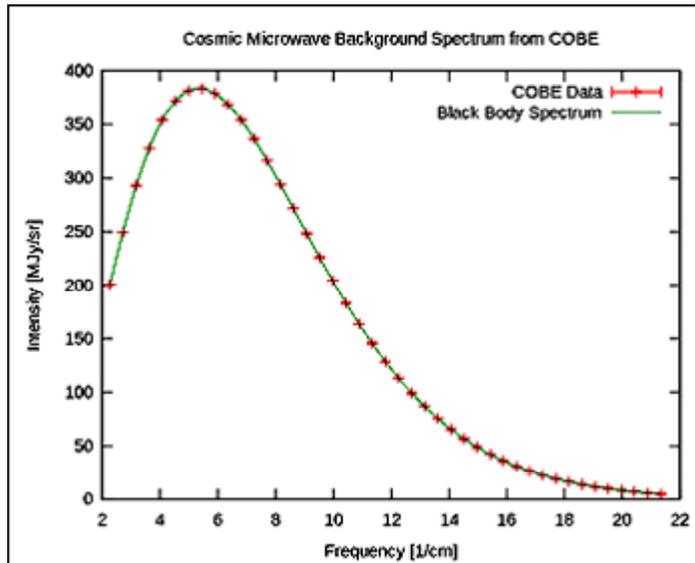
- Fluctuations du champ scalaire inflaton : perturbations scalaires
- Fluctuations du champ gravitationnel: perturbations tensorielles (i.e. ondes gravitationnelles)



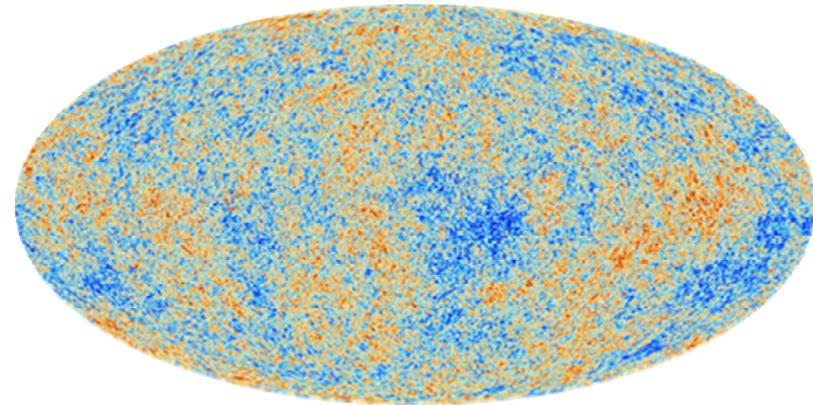
Les fluctuations quantiques sont placées dans un état comprimé (squeezed state), le même type d'état que ceux produits en, eg, optique quantique!

$$|\Psi_{\mathbf{k}}\rangle = \frac{1}{\cosh r_{\mathbf{k}}} \sum_{n=0}^{+\infty} e^{2in\varphi_{\mathbf{k}}} (-1)^n \tanh^n r_{\mathbf{k}} |n_{\mathbf{k}}, n_{-\mathbf{k}}\rangle$$

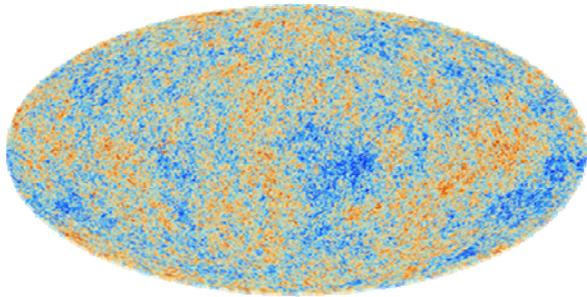
Le CMB est le corps noir le plus précis jamais produit dans la Nature



Les anisotropies du CMB représentent l'état le plus comprimé jamais produit dans la Nature

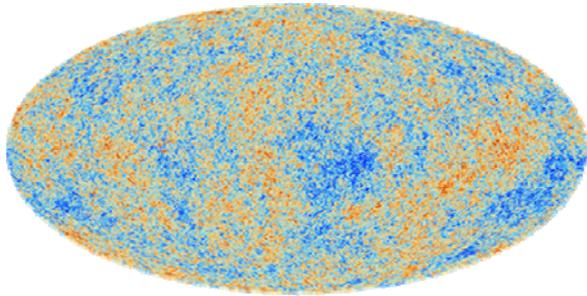


$$r_{\mathbf{k}} = \mathcal{O}(10^2)$$



= fluctuations pendant l'inflation  
+  
fluctuations du modèle du Big Bang chaud

connu

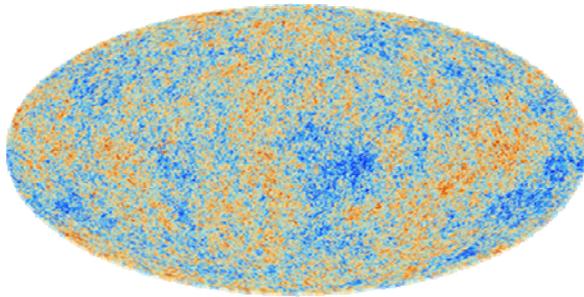


= fluctuations pendant l'inflation  
+  
fluctuations du modèle du Big Bang chaud

connu

Les propriétés des fluctuations peuvent être décrites en terme de spectre de puissance (fonction de corrélation a deux points)

# Quelle est l'origine des fluctuations cosmologiques?

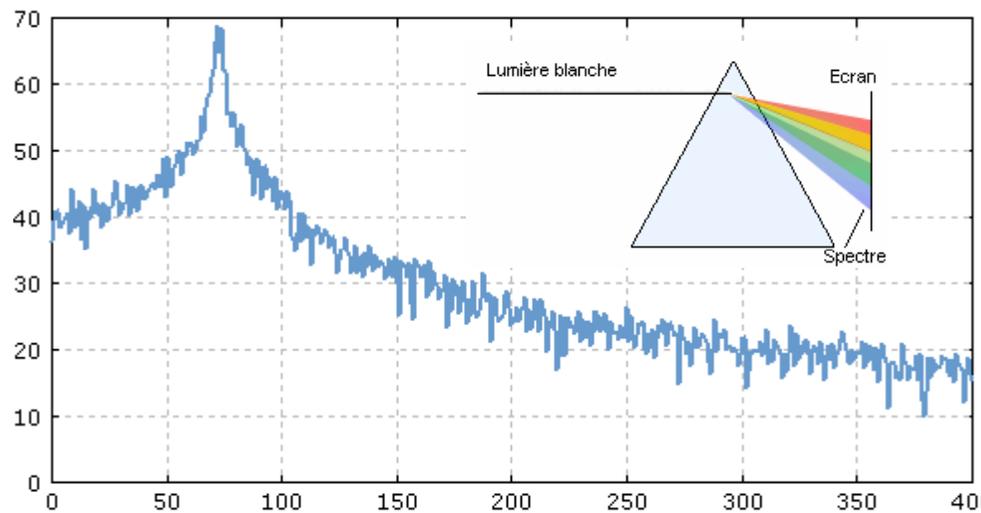


= fluctuations pendant l'inflation  
+  
fluctuations du modèle du Big Bang chaud

connu

Les propriétés des fluctuations peuvent être décrites en terme de spectre de puissance (fonction de corrélation a deux points)

Puissance:  $\ln P(k)$



$$\ln k \sim \ln \left( \frac{1}{\lambda} \right)$$



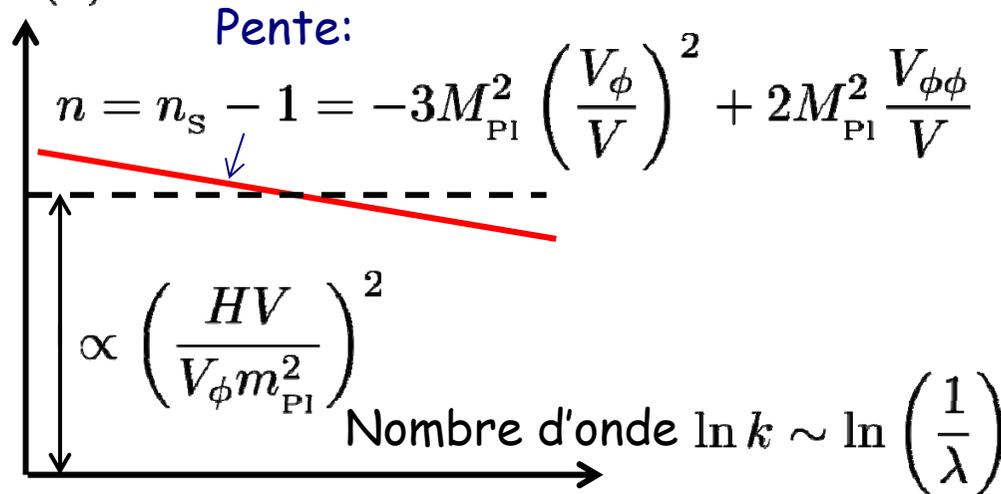
Spectre de puissance des fluctuations cosmologiques prédit par la théorie de l'inflation

$$P(k) = Ak^n \longrightarrow \ln [P(k)] = \ln (A) + n \ln k$$

Scalaire

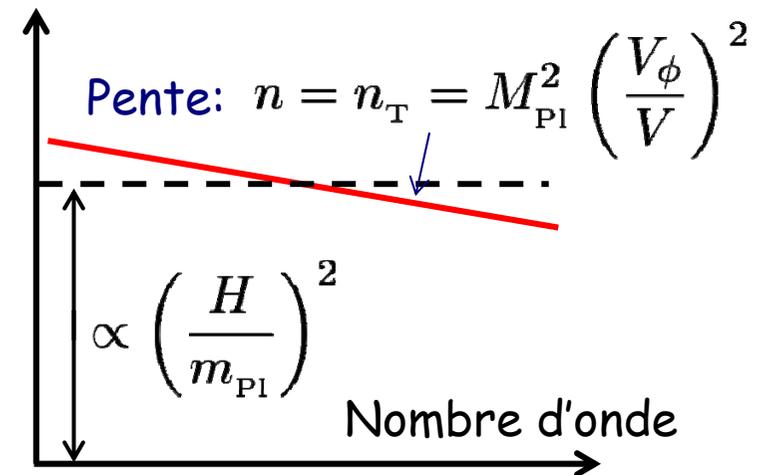
Puissance

$\ln P(k)$



Ondes gravitationnelles

Puissance



Amplitude des scalaires vs ondes gravitationnelles

$$r = \frac{T}{S} = 8M_{\text{Pl}}^2 \left(\frac{V_\phi}{V}\right)^2 < 1$$



- ❑ Qu'est-ce que la théorie de l'inflation?
  
- ❑ Comment réaliser une phase d'inflation?
  
- ❑ Quelle est l'origine des grandes structures et des anisotropies du rayonnement cosmologique de fond? Réponse donnée par la théorie de l'inflation.
  
- ❑ L'inflation et les données récentes du satellite Planck

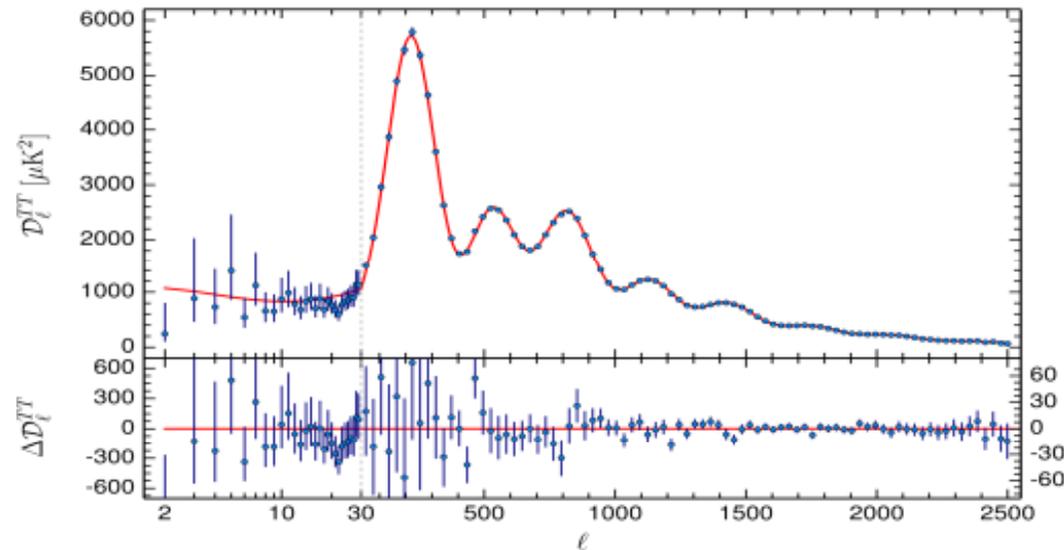


## L'inflation est parfaitement compatible avec toutes les données astrophysiques

- L'Univers est spatialement plat

$$\Omega_{\kappa} = -0.040^{+0.038}_{-0.041}$$

- Les fluctuations ont une phase cohérente



- Les perturbations sont Gaussiennes

$$f_{\text{NL}}^{\text{loc}} = 0.8 \pm 5$$

- Le spectre de puissance a la forme d'une loi de puissance

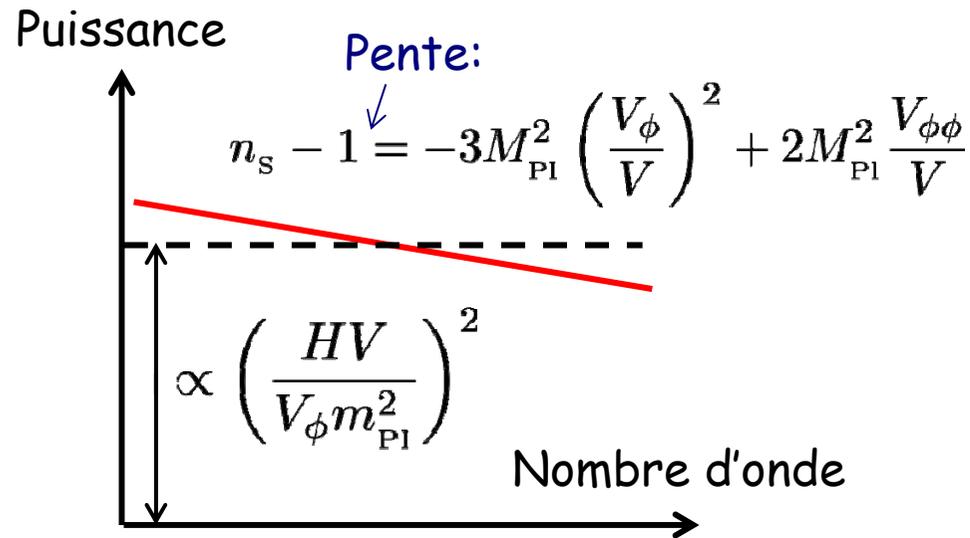
- Le fond d'ondes gravitationnelles n'a pas (encore?) été détecté



Resultats de Planck

Scalaire

1- Amplitude



$$\left(\frac{HV}{V_\phi m_{\text{Pl}}^2}\right)^2 \sim (10^{-5})^2$$

↓

$$\frac{H^2}{m_{\text{Pl}}^2} \propto m_{\text{Pl}}^2 \left(\frac{V_\phi}{V}\right)^2 (10^{-5})^2$$

↓

$$\frac{H^2}{m_{\text{Pl}}^2} < (10^{-5})^2$$

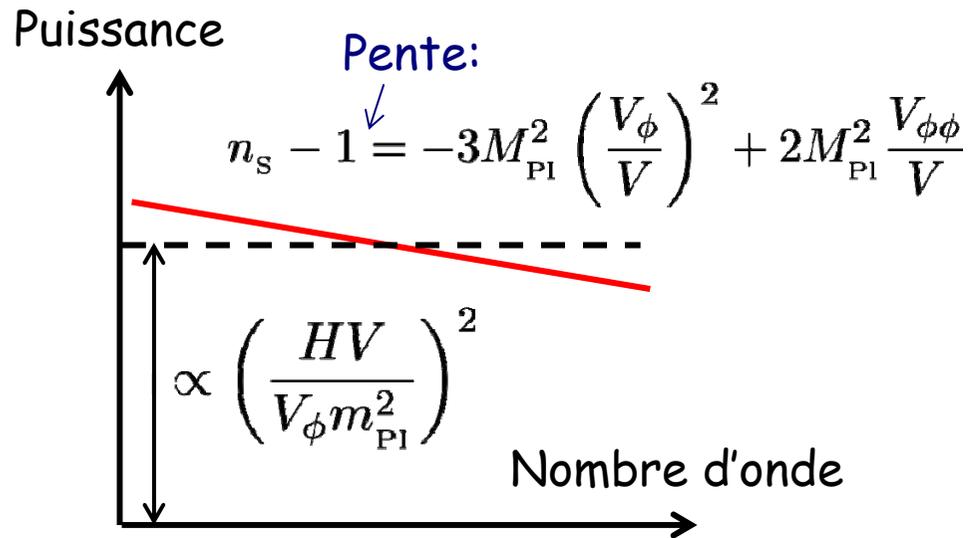
↓

$$H < 10^{16} \text{ GeV}$$



Resultats de Planck

Scalaire



2- Pente du spectre

$$n_s \sim 0.96$$

1- Amplitude

$$\left(\frac{HV}{V_\phi m_{\text{Pl}}^2}\right)^2 \sim (10^{-5})^2$$

$$\downarrow$$

$$\frac{H^2}{m_{\text{Pl}}^2} \propto m_{\text{Pl}}^2 \left(\frac{V_\phi}{V}\right)^2 (10^{-5})^2$$

$$\downarrow$$

$$\frac{H^2}{m_{\text{Pl}}^2} < (10^{-5})^2$$

$$\downarrow$$

$$H < 10^{16} \text{ GeV}$$



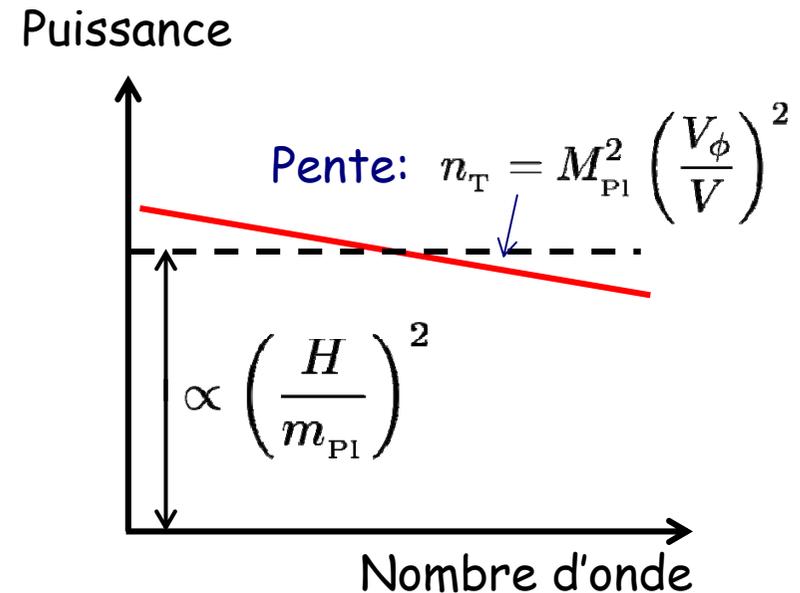
Resultats de Planck

1- Pas de detection (BICEP2 n'etait pas correct)

Ondes gravitationnelles

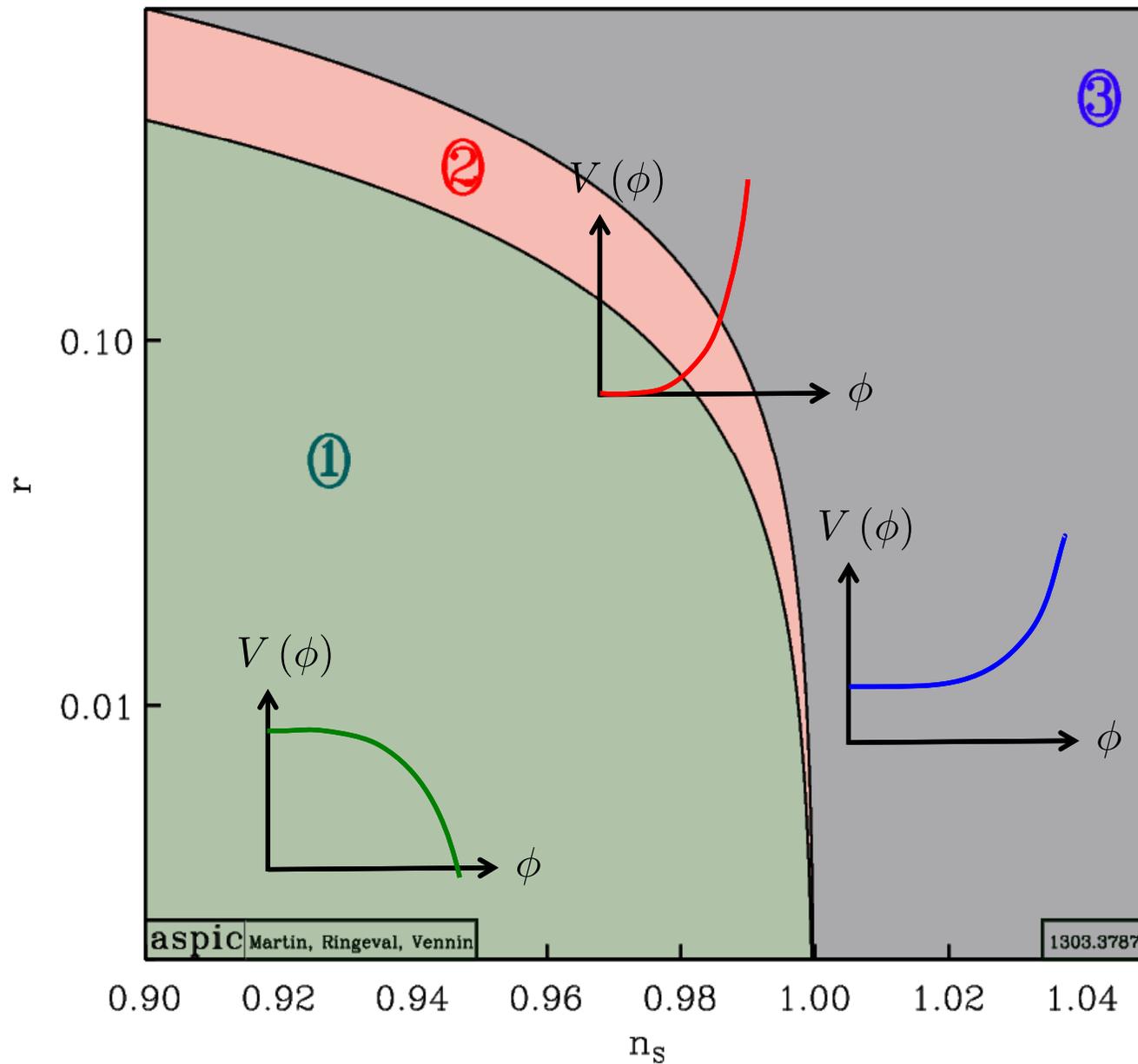
2- Borne superieure sur r

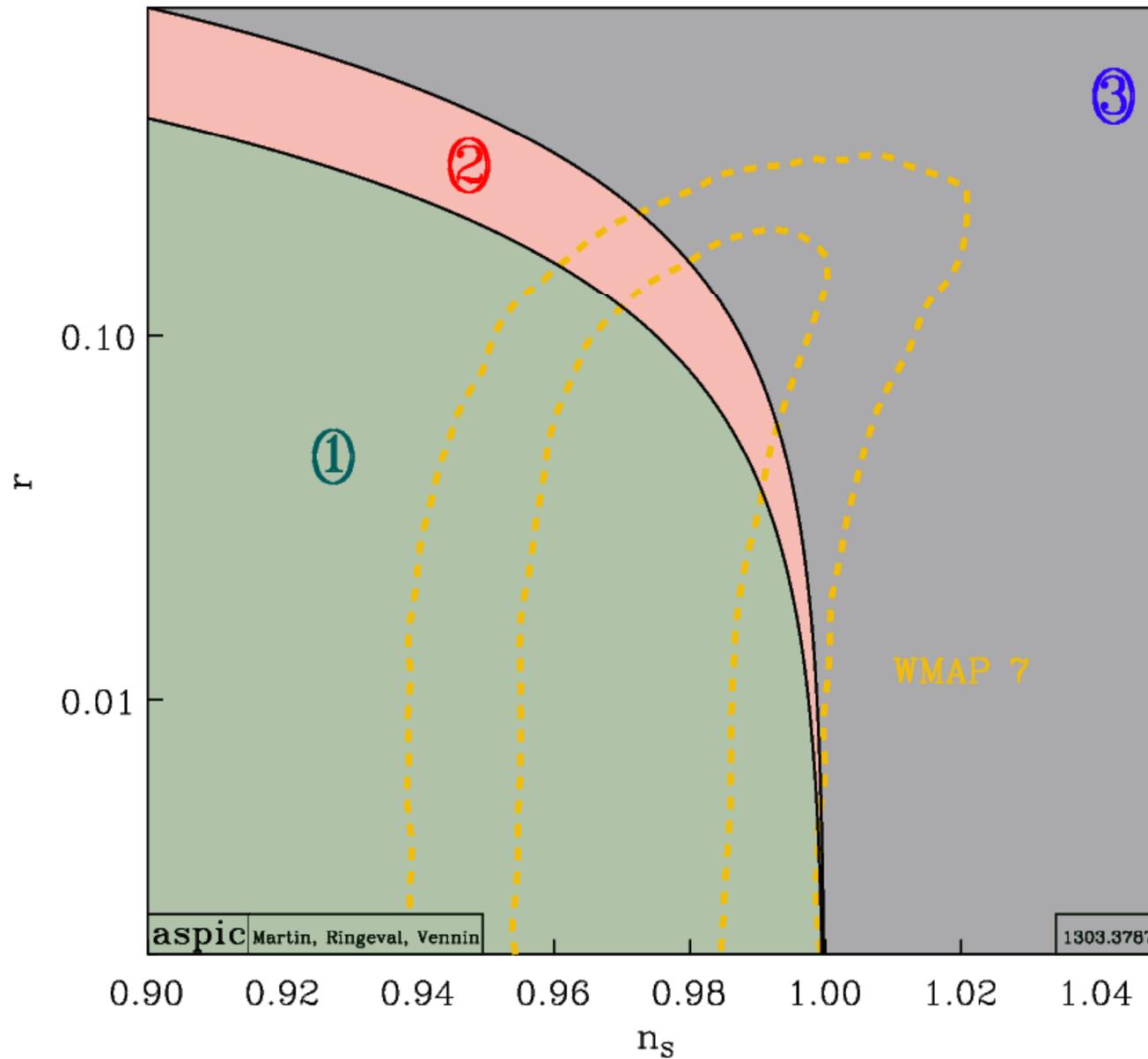
$$r < 0.1$$

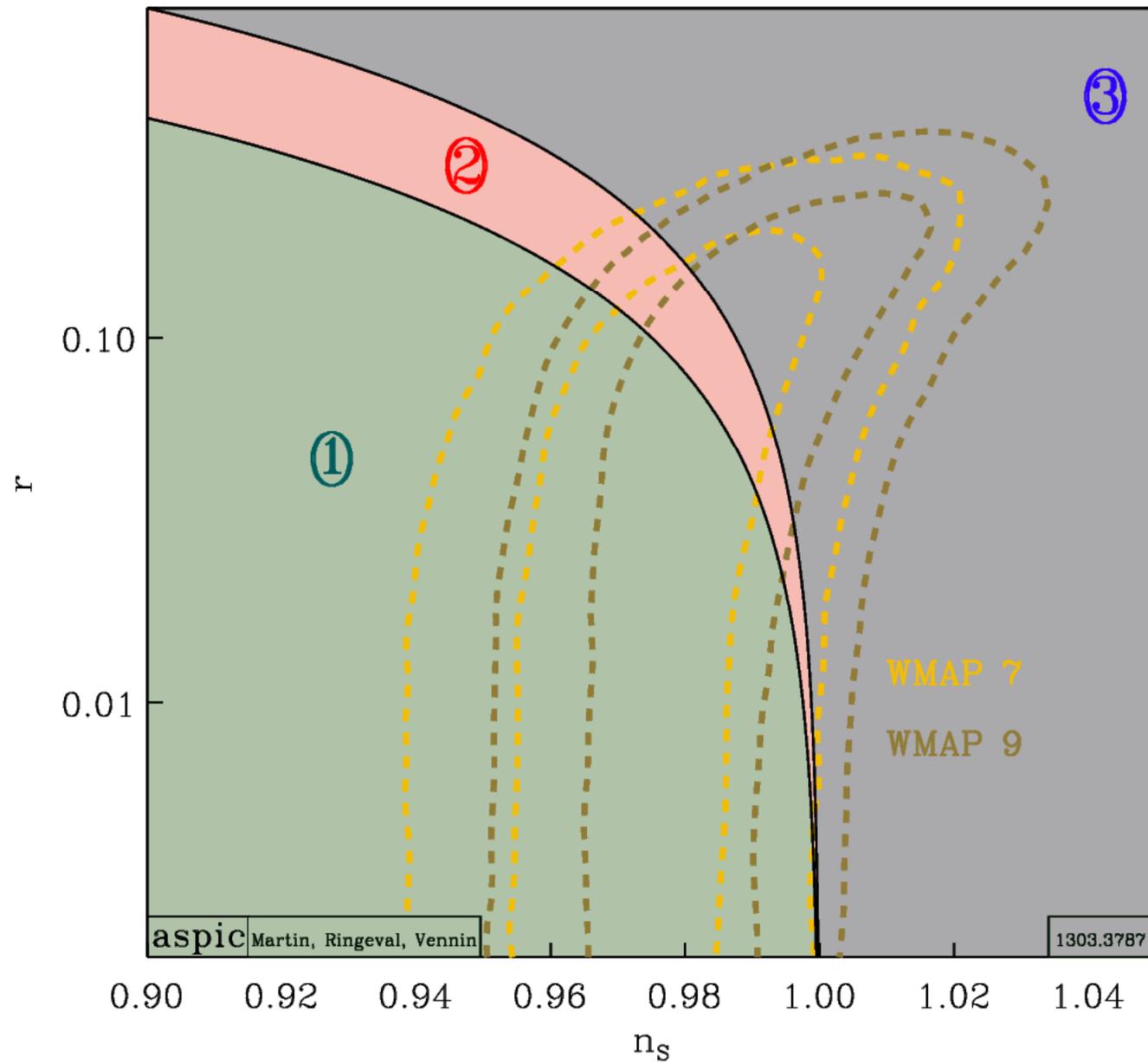


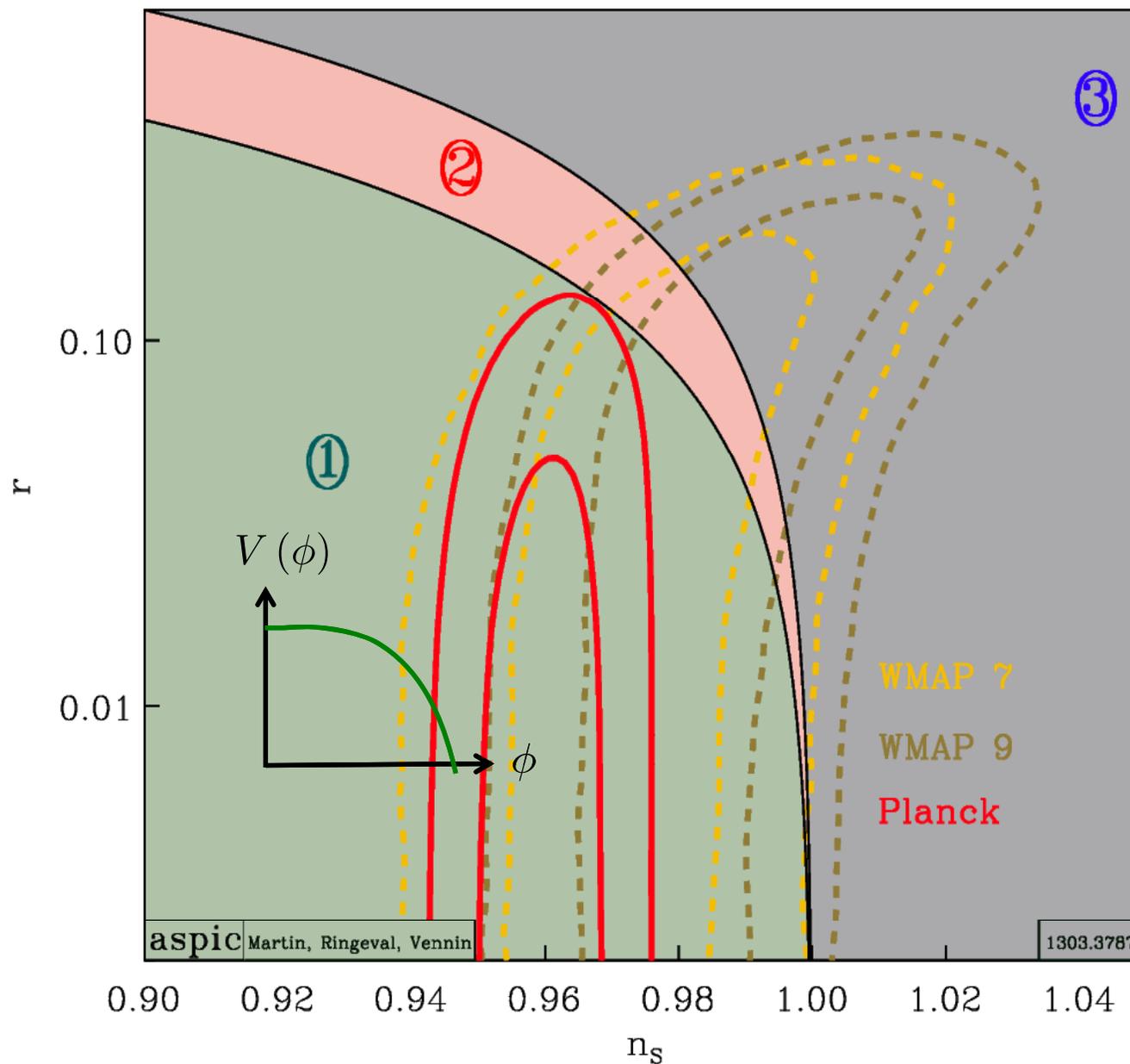
Amplitude des scalaires vs ondes gravitationnelles

$$r = \frac{T}{S} = 8M_{\text{Pl}}^2 \left(\frac{V_\phi}{V}\right)^2 < 1$$



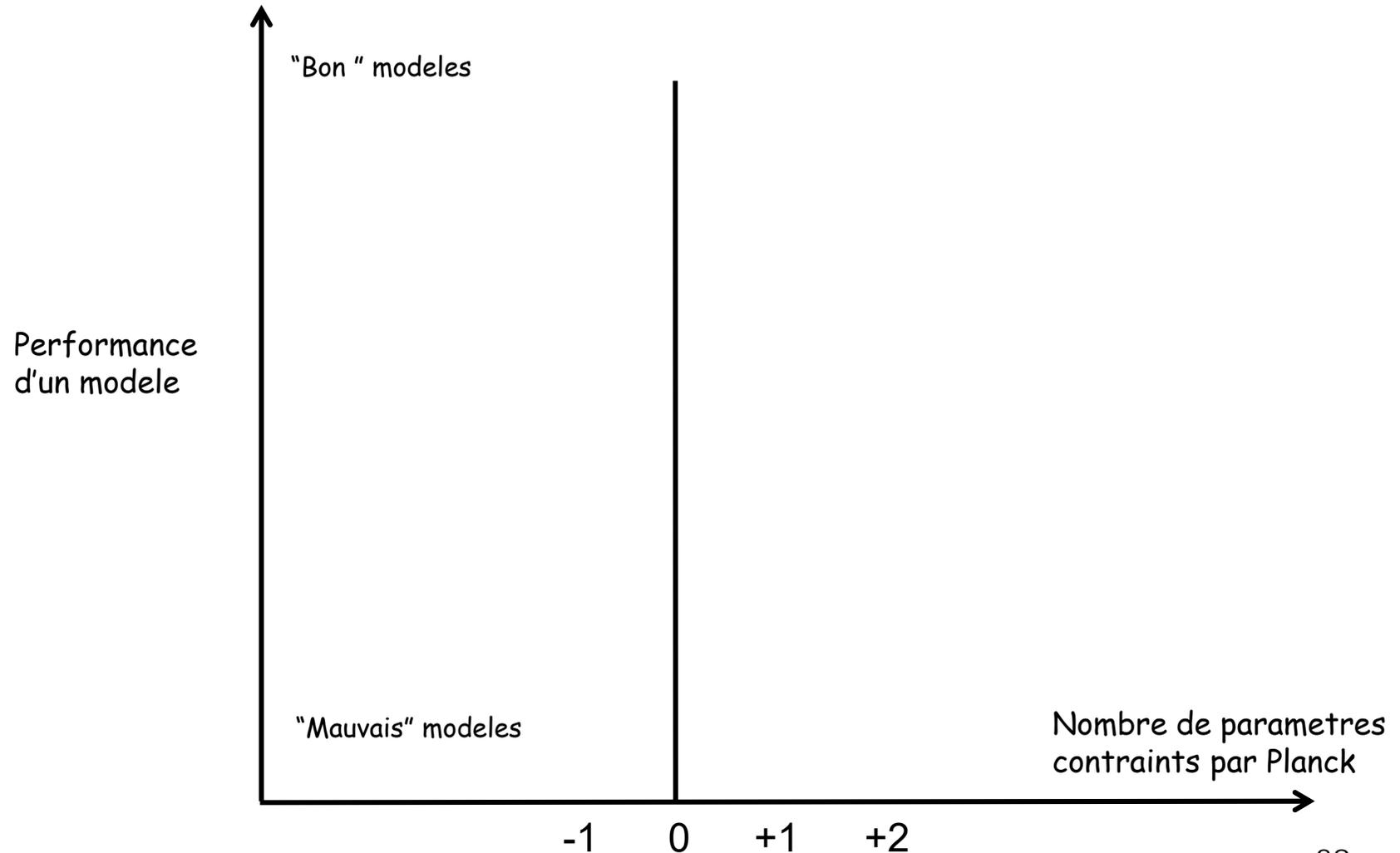






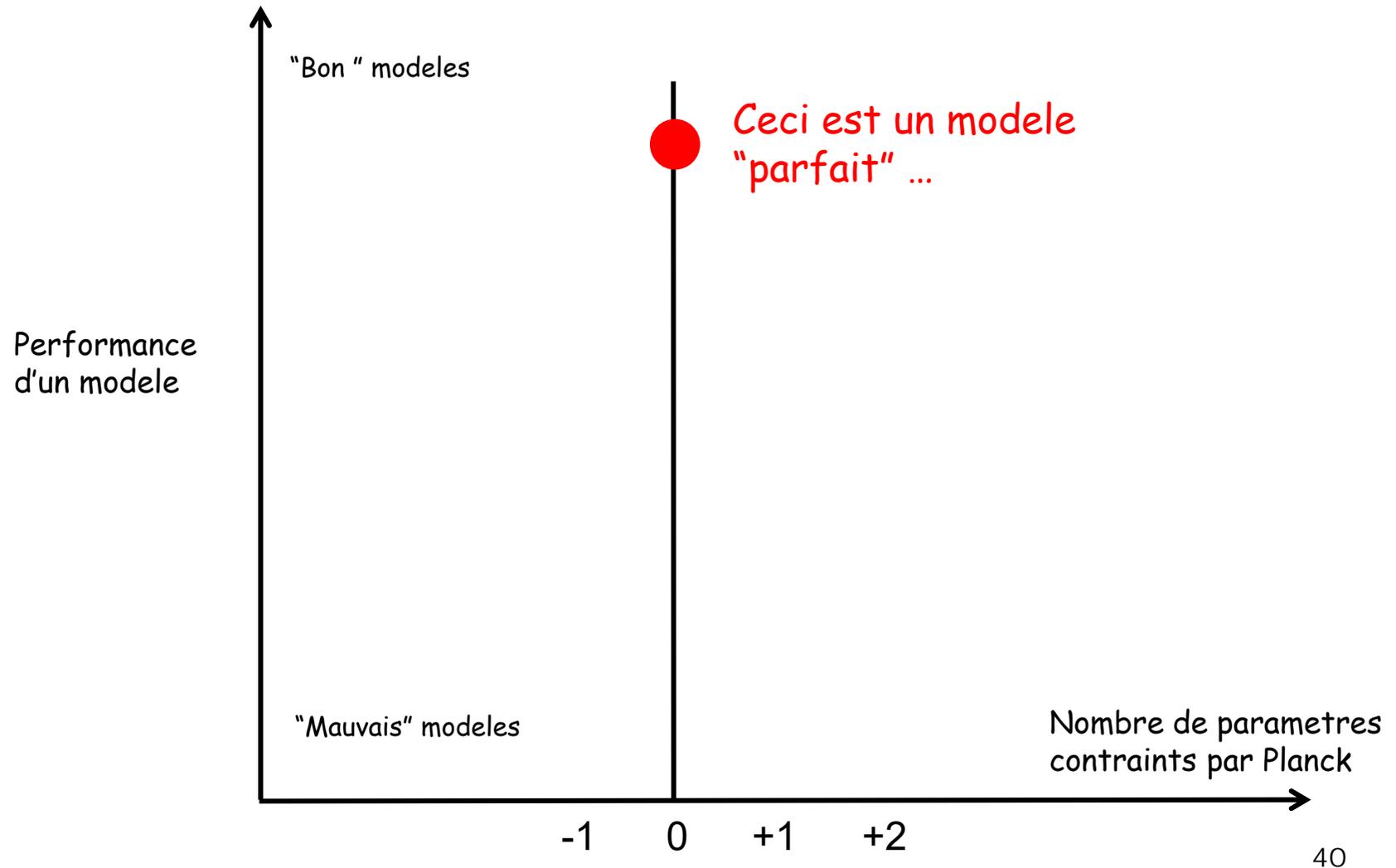


On peut aussi etudier les consequences pour tous les modeles d'inflation proposes depuis 1981 (~ 200)





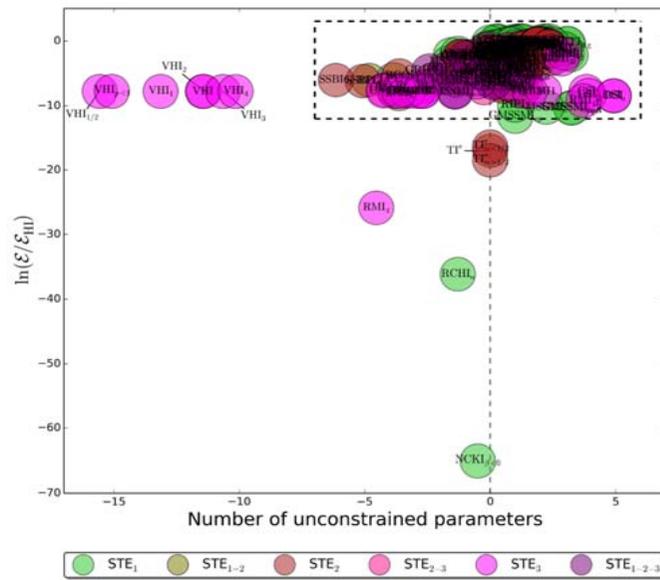
On peut aussi etudier les consequences pour tous les modeles d'inflation proposes depuis 1981 (~ 200)



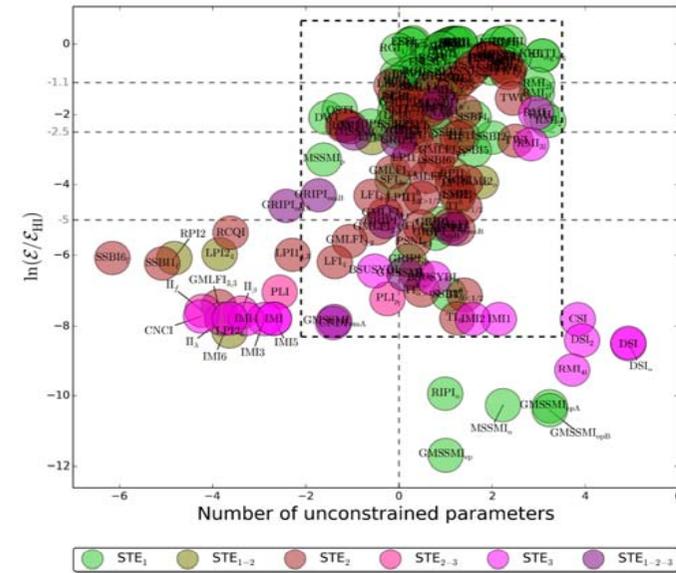
# Inflation dans l'espace performance/complexite



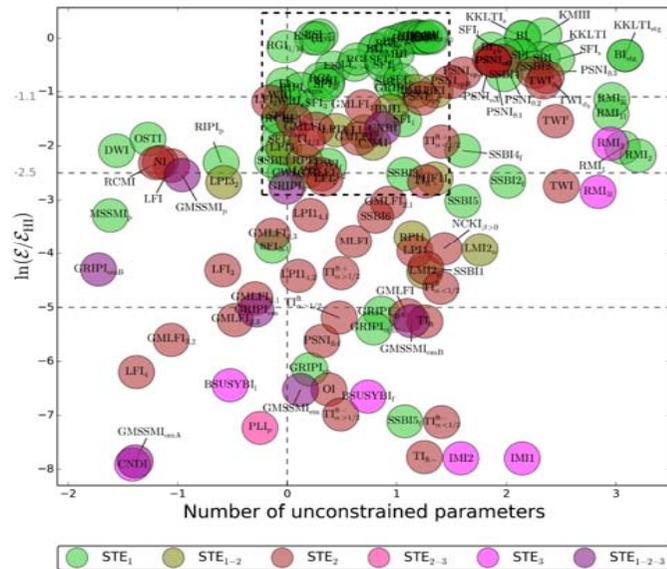
Displayed Models: 193/193



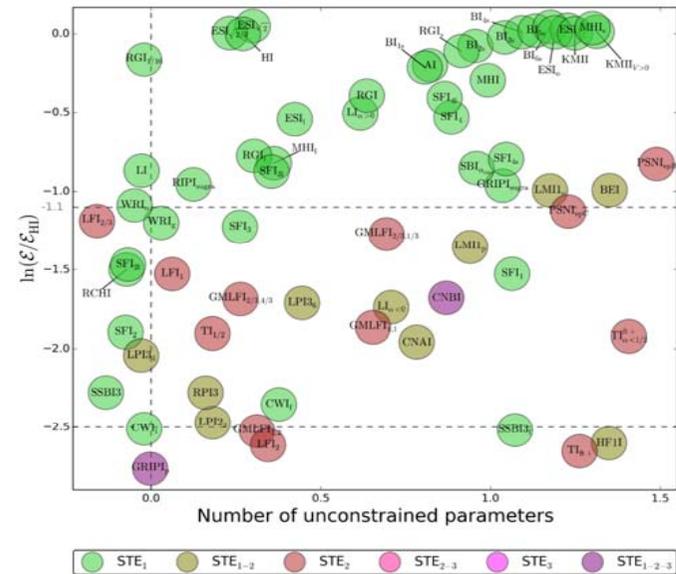
Displayed Models: 180/193



Displayed Models: 151/193



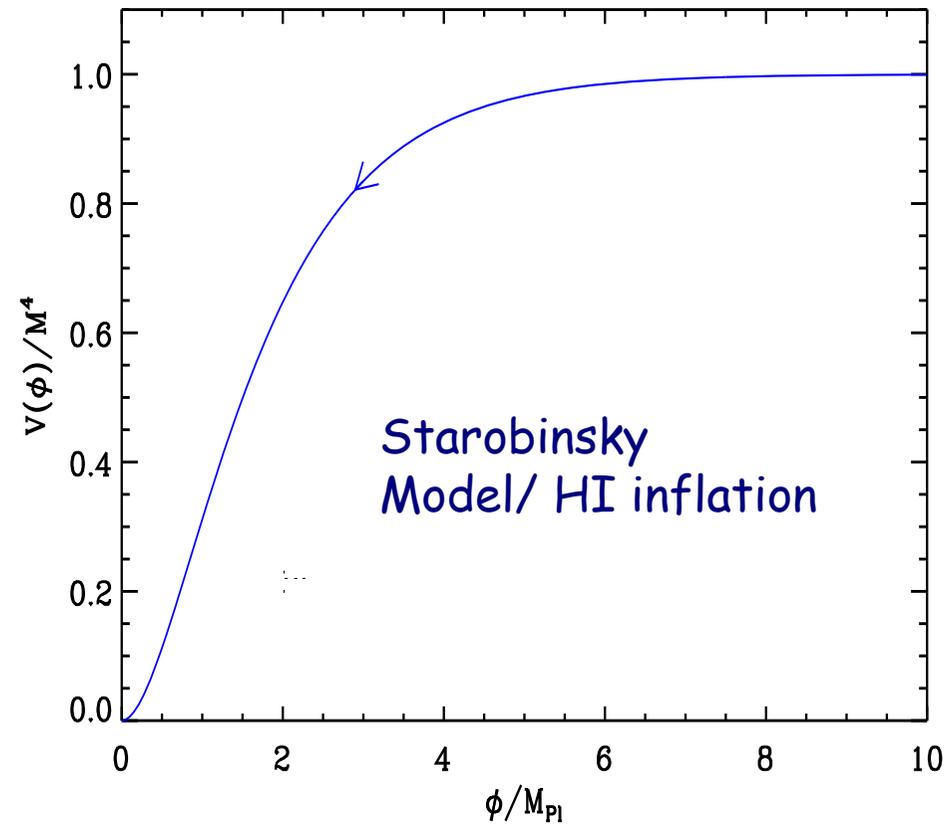
Displayed Models: 66/193





## Plateau inflationary models are the winners!

J. Martin, C. Ringeval R. Trotta & V. Vennin, JCAP1403 (2014), 039, arXiv:1312.3529



$$V(\phi) = M^4 \left(1 - e^{-\sqrt{2/3}\phi/M_{Pl}}\right)^2$$



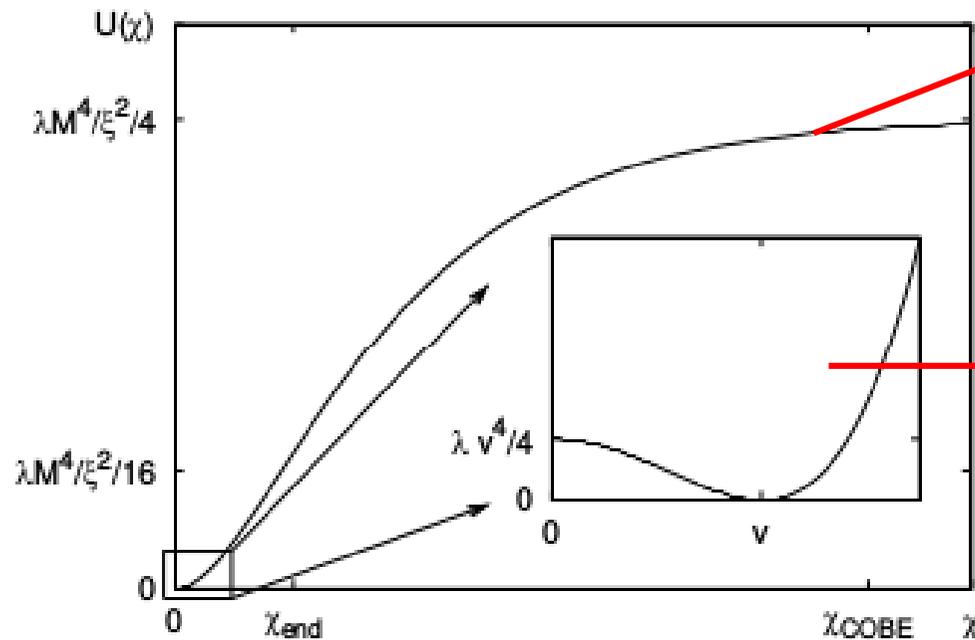
## L'inflaton est peut être le boson de Higgs?

$$\mathcal{L}_{\text{tot}} = \mathcal{L}_{\text{SM}} - \frac{M_{\text{Pl}}^2}{2} R - \xi H^\dagger H R$$

↑  
 Modele standard de la physique  
 des particules

↑  
 Gravite

↑  
 Nouveau terme



**Inflation**

**Brisure  
 electrofaible**



## Conclusions

- ❑ La théorie de l'inflation permet de résoudre certaines difficultés du modèle standard de la cosmologie
- ❑ Elle permet en outre d'expliquer l'origine des grandes structures observées dans notre univers
- ❑ D'un point de vue théorique, elle est remarquable car elle utilise à la fois la relativité générale et la mécanique quantique
- ❑ D'un point de vue observationnel, elle est en très bon accord avec les données. De nos jours, la logique est même renversée: les données sont utilisées pour contraindre l'inflation
- ❑ Questions importantes: échelle d'énergie de l'inflation, nature du champ d'inflation, forme du potentiel etc ...
- ❑ La suite ... probablement détecter les ondes gravitationnelles primordiales

**Cible  $r=10^{-4}$ ; Modèle gagnant (Higgs=inflaton)  $r=10^{-3}$  ...**