

L'Univers comme laboratoire pour la physique fondamentale

Ruth Durrer

Department of Theoretical Physics
Geneva University
Switzerland



novembre 3, 2010

- 1 Introduction
- 2 Matière noire
- 3 L'histoire thermique de l'univers
 - La recombinaison
 - La nucléosynthèse
 - Neutrini
 - Transitions de phase
- 4 Inflation
- 5 Conclusions

La dernière fois nous avons vu que des mesures cosmologiques (distances et redshift des supernovae etc.) peuvent mener à de nouvelles connaissances sur la physique fondamentale \Rightarrow énergie sombre.

La dernière fois nous avons vu que des mesures cosmologiques (distances et redshift des supernovae etc.) peuvent mener à de nouvelles connaissances sur la physique fondamentale \Rightarrow énergie sombre.

Est-ce

- une constante cosmologique/énergie du vide?
- champ scalaire (quintessence, k-essence)?
- Modification de la relativité générale à basse énergie?

La dernière fois nous avons vu que des mesures cosmologiques (distances et redshift des supernovae etc.) peuvent mener à de nouvelles connaissances sur la physique fondamentale \Rightarrow énergie sombre.

Est-ce

- une constante cosmologique/énergie du vide?
- champ scalaire (quintessence, k-essence)?
- Modification de la relativité générale à basse énergie?

Aujourd'hui je vous présente d'autres instances où des observations cosmologiques nous fournissent des informations sur la physique fondamentale:

- Matière noire

La dernière fois nous avons vu que des mesures cosmologiques (distances et redshift des supernovae etc.) peuvent mener à de nouvelles connaissances sur la physique fondamentale \Rightarrow énergie sombre.

Est-ce

- une constante cosmologique/énergie du vide?
- champ scalaire (quintessence, k-essence)?
- Modification de la relativité générale à basse énergie?

Aujourd'hui je vous présente d'autres instances où des observations cosmologiques nous fournissent des informations sur la physique fondamentale:

- Matière noire
- Nucléosynthèse

La dernière fois nous avons vu que des mesures cosmologiques (distances et redshift des supernovae etc.) peuvent mener à de nouvelles connaissances sur la physique fondamentale \Rightarrow énergie sombre.

Est-ce

- une constante cosmologique/énergie du vide?
- champ scalaire (quintessence, k-essence)?
- Modification de la relativité générale à basse énergie?

Aujourd'hui je vous présente d'autres instances où des observations cosmologiques nous fournissent des informations sur la physique fondamentale:

- Matière noire
- Nucléosynthèse
- Neutrini

La dernière fois nous avons vu que des mesures cosmologiques (distances et redshift des supernovae etc.) peuvent mener à de nouvelles connaissances sur la physique fondamentale \Rightarrow énergie sombre.

Est-ce

- une constante cosmologique/énergie du vide?
- champ scalaire (quintessence, k-essence)?
- Modification de la relativité générale à basse énergie?

Aujourd'hui je vous présente d'autres instances où des observations cosmologiques nous fournissent des informations sur la physique fondamentale:

- Matière noire
- Nucléosynthèse
- Neutrini
- Transitions de phase à haute température

La dernière fois nous avons vu que des mesures cosmologiques (distances et redshift des supernovae etc.) peuvent mener à de nouvelles connaissances sur la physique fondamentale \Rightarrow énergie sombre.

Est-ce

- une constante cosmologique/énergie du vide?
- champ scalaire (quintessence, k-essence)?
- Modification de la relativité générale à basse énergie?

Aujourd'hui je vous présente d'autres instances où des observations cosmologiques nous fournissent des informations sur la physique fondamentale:

- Matière noire
- Nucléosynthèse
- Neutrini
- Transitions de phase à haute température
- Baryogenèse

La dernière fois nous avons vu que des mesures cosmologiques (distances et redshift des supernovae etc.) peuvent mener à de nouvelles connaissances sur la physique fondamentale \Rightarrow énergie sombre.

Est-ce

- une constante cosmologique/énergie du vide?
- champ scalaire (quintessence, k-essence)?
- Modification de la relativité générale à basse énergie?

Aujourd'hui je vous présente d'autres instances où des observations cosmologiques nous fournissent des informations sur la physique fondamentale:

- Matière noire
- Nucléosynthèse
- Neutrini
- Transitions de phase à haute température
- Baryogenèse
- Inflation

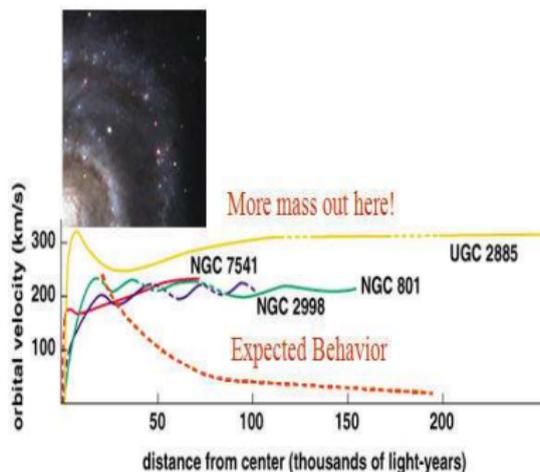
- Le premier a postuler l'existence de matière noire a été l'astronome suisse **Fritz Zwicky**. Il a réalisé que le fait que les amas de galaxies sont gravitationnellement liés demande qu'ils contiennent env. 100 fois plus de masse que celle qui est dans les étoiles (HPA, 1933).
- Dans les années 70, l'astronome américaine **Vera Rubin** a démontré que aussi les galaxies sont dominées par de la matière noire qui contribue env. 10 fois plus à leur masse que les étoiles.



Rubin a trouvé que les courbes de rotation de particules tests (astres, atomes d'hydrogène) autour des galaxies ne montrent pas le comportement attendu

$$v^2 = \frac{GM}{r}, \quad v \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$$

mais $v = \text{constante}$. La loi de Kepler demande alors que $M \propto r$.



- Ces découvertes ne contiennent aucune information sur la nature de la matière noire sauf qu'elle n'émet pas des photons visibles.

- Ces découvertes ne contiennent aucune information sur la nature de la matière noire sauf qu'elle n'émet pas des photons visibles.
- Les observations des rayons X ont montré qu'une partie (env. 10%) de la matière noire dans les amas est en forme de gaz chaude qui émet des rayons X.

- Ces découvertes ne contiennent aucune information sur la nature de la matière noire sauf qu'elle n'émet pas des photons visibles.
- Les observations des rayons X ont montré qu'une partie (env. 10%) de la matière noire dans les amas est en forme de gaz chaude qui émet des rayons X.
- Les estimations de la masse totale (par effet lentille et autre) donnent $h^2 \Omega_m \simeq 0.14$

- Ces découvertes ne contiennent aucune information sur la nature de la matière noire sauf qu'elle n'émet pas des photons visibles.
- Les observations des rayons X ont montré qu'une partie (env. 10%) de la matière noire dans les amas est en forme de gaz chaude qui émet des rayons X.
- Les estimations de la masse totale (par effet lentille et autre) donnent $h^2\Omega_m \simeq 0.14$
- Par contre, les calculs de la nucléosynthèse et les mesures des anisotropies du CMB (fond cosmique micro-onde) demandent $h^2\Omega_b \simeq 0.02$

- Ces découvertes ne contiennent aucune information sur la nature de la matière noire sauf qu'elle n'émet pas des photons visibles.
- Les observations des rayons X ont montré qu'une partie (env. 10%) de la matière noire dans les amas est en forme de gaz chaude qui émet des rayons X.
- Les estimations de la masse totale (par effet lentille et autre) donnent $h^2\Omega_m \simeq 0.14$
- Par contre, les calculs de la nucléosynthèse et les mesures des anisotropies du CMB (fond cosmique micro-onde) demandent $h^2\Omega_b \simeq 0.02$
- La plus grande partie (env. 85%) de la matière dans l'univers est non-baryonique.

Particules stables qui ne couplent pas au photon.

- Neutrini (ne peuvent pas être liés dans les galaxies naines). ζ

Particules stables qui ne couplent pas au photon.

- Neutrini (ne peuvent pas être liés dans les galaxies naines). $\frac{1}{2}$
- Neutrino stérile qui est plus massive mais moins abondant ?

Particules stables qui ne couplent pas au photon.

- Neutrini (ne peuvent pas être liés dans les galaxies naines). $\frac{1}{2}$
- Neutrino stérile qui est plus massive mais moins abondant ?
- Neutralino (particule stable de la super-symétrie \Rightarrow LHC) ?

Particules stables qui ne couplent pas au photon.

- Neutrini (ne peuvent pas être liés dans les galaxies naines). $\frac{1}{2}$
- Neutrino stérile qui est plus massive mais moins abondant ?
- Neutralino (particule stable de la super-symétrie \Rightarrow LHC) ?
- Axion (particule stable hypothétique pour résoudre le 'strong CP problem') ?

Particules stables qui ne couplent pas au photon.

- Neutrini (ne peuvent pas être liés dans les galaxies naines). $\frac{1}{2}$
- Neutrino stérile qui est plus massive mais moins abondant ?
- Neutralino (particule stable de la super-symétrie \Rightarrow LHC) ?
- Axion (particule stable hypothétique pour résoudre le 'strong CP problem') ?
- Trous noirs primordiaux ?

Particules stables qui ne couplent pas au photon.

- Neutrini (ne peuvent pas être liés dans les galaxies naines). $\frac{1}{2}$
- Neutrino stérile qui est plus massive mais moins abondant ?
- Neutralino (particule stable de la super-symétrie \Rightarrow LHC) ?
- Axion (particule stable hypothétique pour résoudre le 'strong CP problem') ?
- Trous noirs primordiaux ?
- Wimpzillas ?

Particules stables qui ne couplent pas au photon.

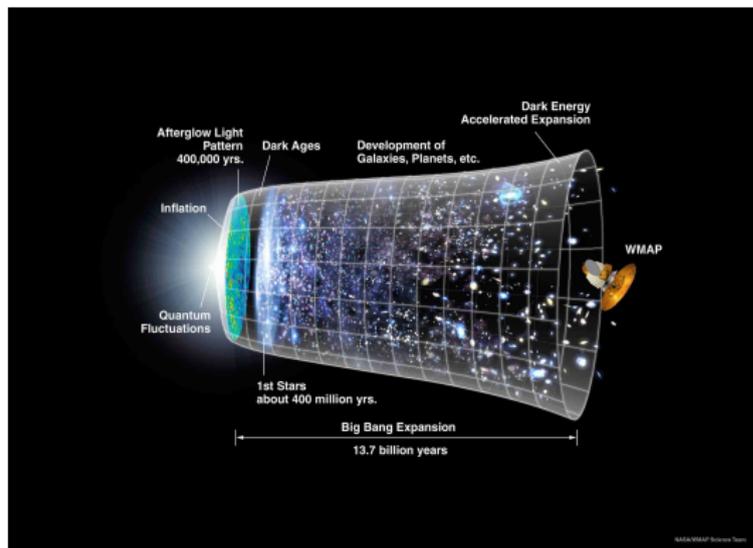
- Neutrini (ne peuvent pas être liés dans les galaxies naines). $\frac{1}{2}$
- Neutrino stérile qui est plus massive mais moins abondant ?
- Neutralino (particule stable de la super-symétrie \Rightarrow LHC) ?
- Axion (particule stable hypothétique pour résoudre le 'strong CP problem') ?
- Trous noirs primordiaux ?
- Wimpzillas ?
- Gravitinos ?

Particules stables qui ne couplent pas au photon.

- Neutrini (ne peuvent pas être liés dans les galaxies naines). $\frac{1}{2}$
- Neutrino stérile qui est plus massive mais moins abondant ?
- Neutralino (particule stable de la super-symétrie \Rightarrow LHC) ?
- Axion (particule stable hypothétique pour résoudre le 'strong CP problem') ?
- Trous noirs primordiaux ?
- Wimpzillas ?
- Gravitinos ?

Tous les candidats nécessitent de la physique en dehors du modèle standard.

Dans le passé l'univers n'a pas seulement été beaucoup plus dense qu'aujourd'hui mais aussi beaucoup plus chaud.

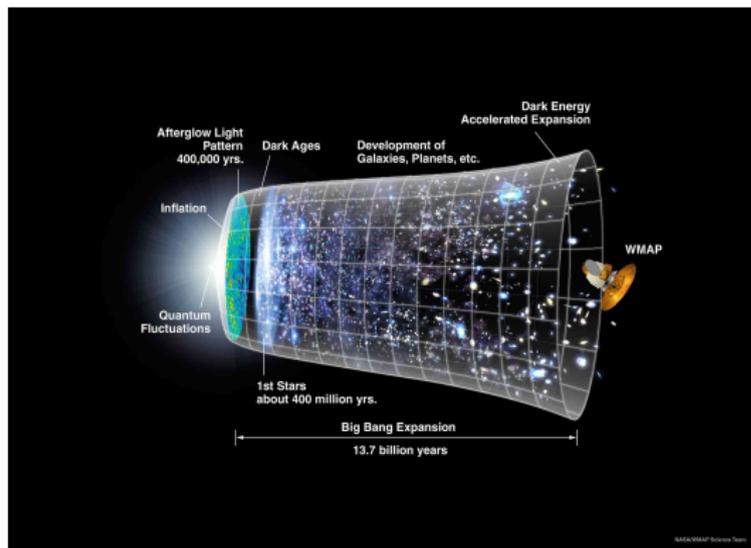


Les événements les plus marquants dans l'univers chaud:

- La recombinaison (des électrons et protons en hydrogène neutre).

Age de l'Univers: $t_0 \simeq 13.7$ milliards d'années

Dans le passé l'univers n'a pas seulement été beaucoup plus dense qu'aujourd'hui mais aussi beaucoup plus chaud.

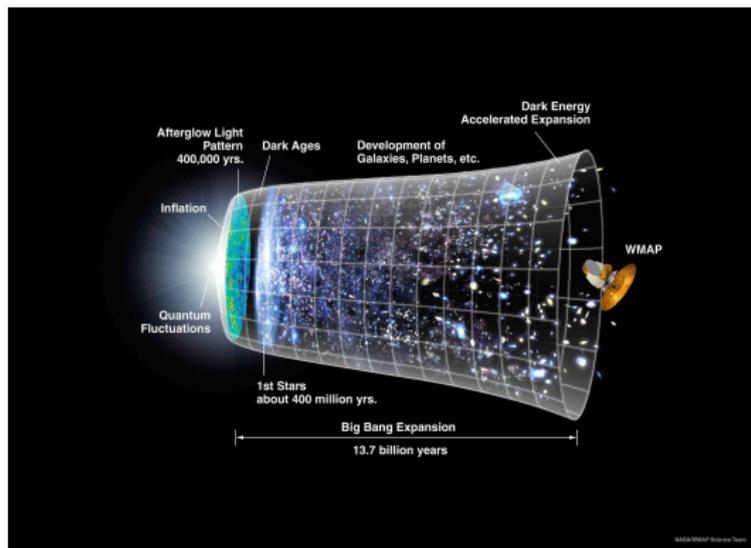


Les événements les plus marquants dans l'univers chaud:

- La recombinaison (des électrons et protons en hydrogène neutre).
- La nucléosynthèse (formation d'hélium,...)

Age de l'Univers: $t_0 \simeq 13.7$ milliards d'années

Dans le passé l'univers n'a pas seulement été beaucoup plus dense qu'aujourd'hui mais aussi beaucoup plus chaud.

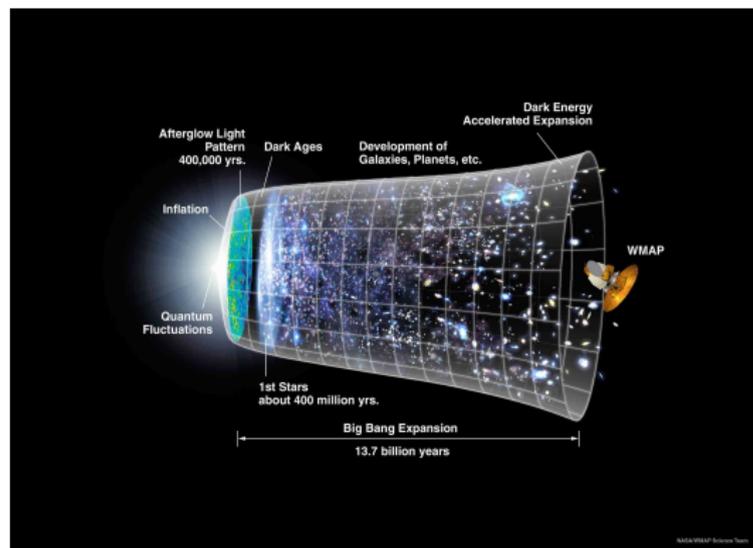


Les événements les plus marquants dans l'univers chaud:

- La recombinaison (des électrons et protons en hydrogène neutre).
- La nucléosynthèse (formation d'hélium,...)
- Transitions de phases?

Age de l'Univers: $t_0 \simeq 13.7$ milliards d'années

Dans le passé l'univers n'a pas seulement été beaucoup plus dense qu'aujourd'hui mais aussi beaucoup plus chaud.



Les événements les plus marquants dans l'univers chaud:

- La recombinaison (des électrons et protons en hydrogène neutre).
- La nucléosynthèse (formation d'hélium,...)
- Transitions de phases?
- L'inflation ?

Age de l'Univers: $t_0 \simeq 13.7$ milliards d'années

A $T_{\text{dec}} \simeq 3000\text{K}$ l'univers s'est refroidi suffisamment pour que l'hydrogène neutre devienne stable.

A $T_{\text{dec}} \simeq 3000\text{K}$ l'univers s'est refroidi suffisamment pour que l'hydrogène neutre devienne stable.

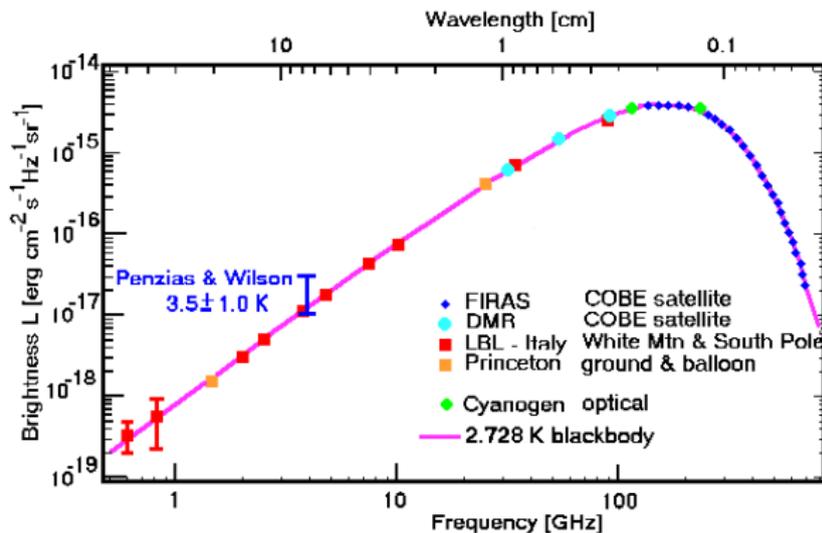
A partir de ce moment, l'univers devient transparent pour les photons cosmiques.

A $T_{\text{dec}} \simeq 3000\text{K}$ l'univers s'est refroidi suffisamment pour que l'hydrogène neutre devienne stable.

A partir de ce moment, l'univers devient transparent pour les photons cosmiques. Ceux-ci évoluent seulement par l'expansion de l'univers,

$$\nu_0 = \nu_{\text{dec}} / (1 + z_{\text{dec}}) \quad \Rightarrow \quad T_0 = T_{\text{dec}} / (1 + z_{\text{dec}})$$

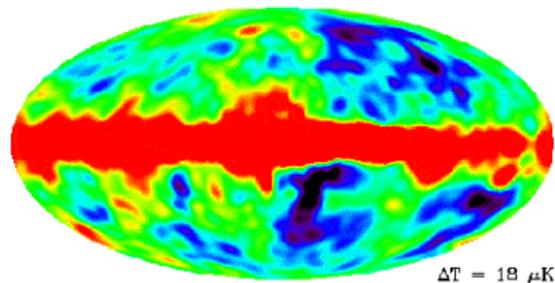
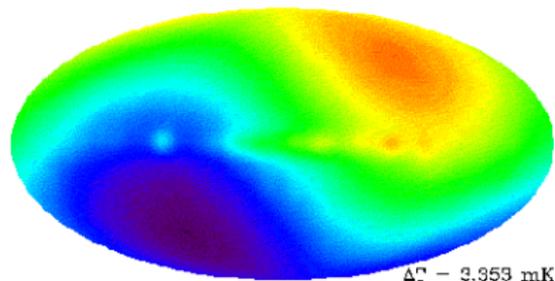
Le fond cosmique micro-onde: le spectre



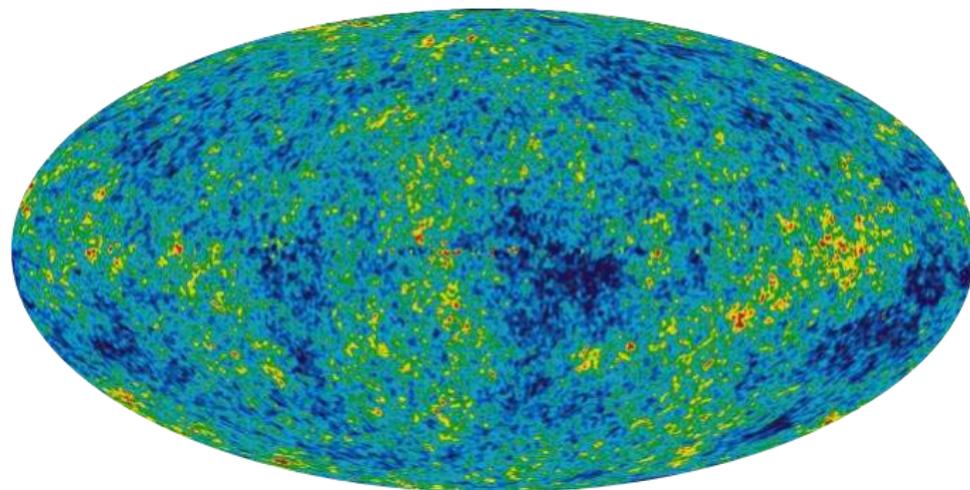
Fixen et al. (1996) Prix Nobel 1978 pour Penzias et Wilson et 2006 pour Mather

$$T_0 = 2.728\text{K} \simeq -270.5^\circ\text{C}$$

Le fond cosmique micro-onde: les anisotropies

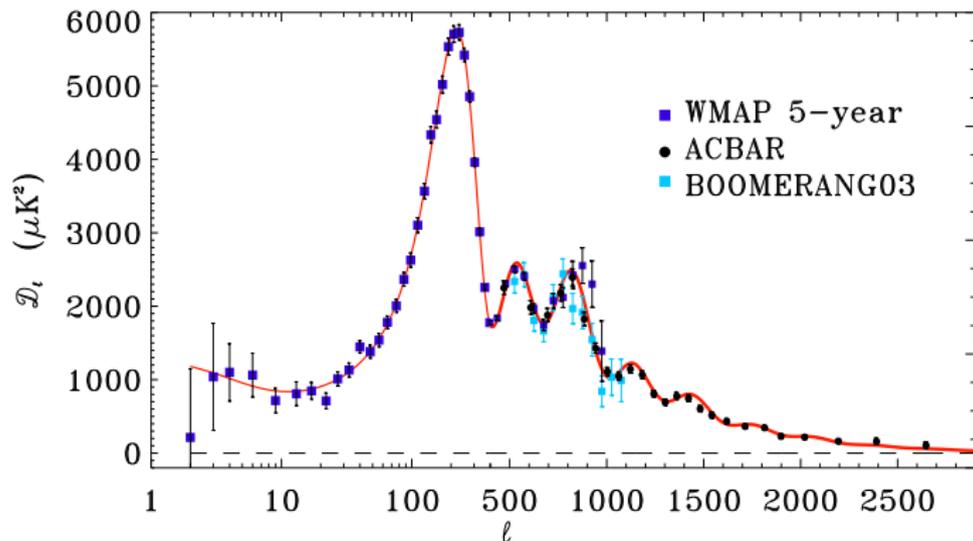


Smoot et al. (1999), Prix Nobel 2006



-200 $T(\mu\text{K})$ +200 WMAP 5-year

Hinshaw et al. (2008)



Reichardt et al.

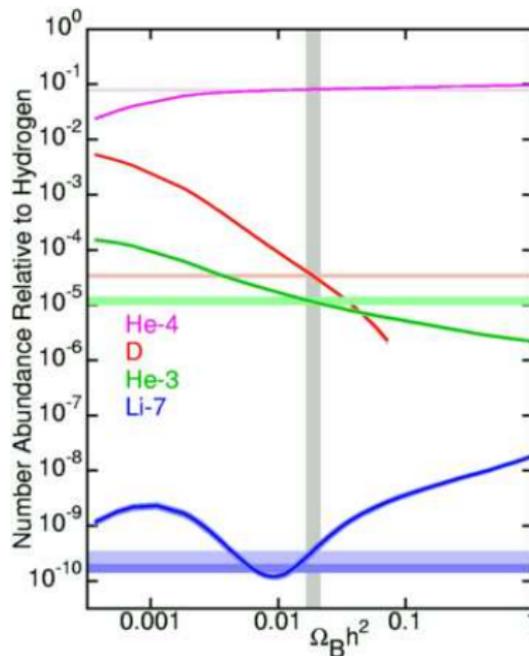
(2008) $\ell = 200$ correspond à env. 1° .

(Ceci est environ le double de la taille angulaire de la pleine lune (et du soleil).)

\Rightarrow pics 'acoustiques'. ($\theta \simeq 180^\circ/\ell$)

La nucléosynthèse

A $T_{\text{nuc}} \simeq 0.08\text{MeV} \simeq 10^9\text{K}$ le deutérium ($p + n$) devient stable. A ce moment pratiquement tous les neutrons encore présents dans l'univers sont 'brûlés' en He^4 . Il restent des traces de deutérium, de hélium³ et de Li^7 . Leur abondance dépend fortement de la densité baryonique.



- a $T \simeq 1.4\text{MeV} \simeq 1.6 \times 10^{10}\text{K}$, les interactions faibles ne sont plus suffisamment actives et les neutrini ne sont plus en équilibre thermique avec le reste de la matière (baryons, électrons, positrons, photons, matière noire).

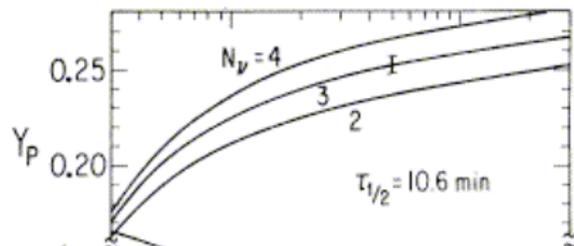
- a $T \simeq 1.4\text{MeV} \simeq 1.6 \times 10^{10}\text{K}$, les interactions faibles ne sont plus suffisamment actives et les neutrini ne sont plus en équilibre thermique avec le reste de la matière (baryons, électrons, positrons, photons, matière noire).
- Par la suite leur interaction est purement gravitationnelle. Ils ne sont ne créés ni détruits mais perdent de l'énergie par l'expansion de l'univers (décalage vers le rouge).

- a $T \simeq 1.4\text{MeV} \simeq 1.6 \times 10^{10}\text{K}$, les interactions faibles ne sont plus suffisamment actives et les neutrini ne sont plus en équilibre thermique avec le reste de la matière (baryons, électrons, positrons, photons, matière noire).
- Par la suite leur interaction est purement gravitationnelle. Ils ne sont ni créés ni détruits mais perdent de l'énergie par l'expansion de l'univers (décalage vers le rouge).
- Un fond de neutrini avec une 'température' $T_\nu = 1.9\text{K}$ devrait exister dans l'univers.

- a $T \simeq 1.4\text{MeV} \simeq 1.6 \times 10^{10}\text{K}$, les interactions faibles ne sont plus suffisamment actives et les neutrini ne sont plus en équilibre thermique avec le reste de la matière (baryons, électrons, positrons, photons, matière noire).
- Par la suite leur interaction est purement gravitationnelle. Ils ne sont ne créés ni détruits mais perdent de l'énergie par l'expansion de l'univers (décalage vers le rouge).
- Un fond de neutrini avec une 'température' $T_\nu = 1.9\text{K}$ devrait exister dans l'univers.
- Même si ces neutrini ont une densité d'environ $100/\text{cm}^3$ ils ne sont pas détectés de façon directe parce qu'ils interagissent si faiblement.

Les neutrini sont par contre 'observés' de façon indirecte par leurs effets gravitationnelles:

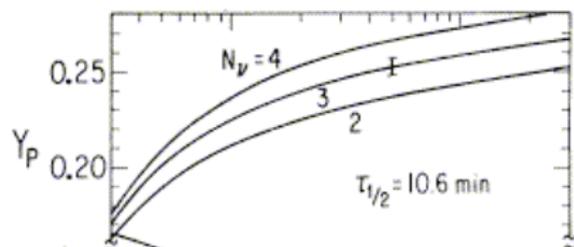
- Ils contribuent à l'expansion de l'univers qui est relevant pour l'abondance d'hélium-4. $\Rightarrow N_\nu$ (nombre d'espèces de neutrini relativistes à $T \simeq 0.1\text{MeV}$).



(Sarkar et al. '06)

Les neutrini sont par contre 'observés' de façon indirecte par leurs effets gravitationnelles:

- Ils contribuent à l'expansion de l'univers qui est relevant pour l'abondance d'hélium-4. $\Rightarrow N_\nu$ (nombre d'espèces de neutrini relativistes à $T \simeq 0.1\text{MeV}$).



(Sarkar et al. '06)

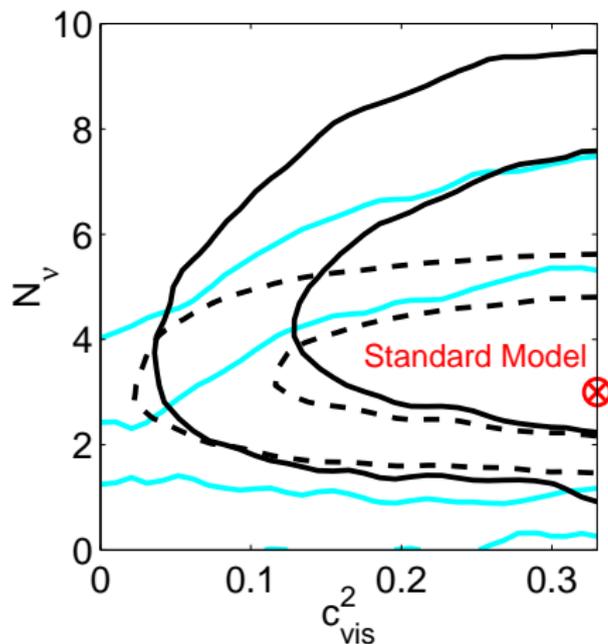
$$\Rightarrow \boxed{N_\nu \simeq 3 \pm 1}$$

- Ceci est relevante pour toute espèce de particules relativistes avec abondance thermique à $T \simeq 0.1\text{MeV}$.

Les neutrini sont par contre 'observés' de façon indirecte par leurs effets gravitationnelles:

Ils contribuent aux anisotropies du fond cosmique micro-onde (CMB) ou l'on peut même mesurer des conséquence du fait que les neutrini ne forment pas un gaz parfait mais ce sont des particules sans collisions.

($c_{vis} = 0$ fluide parfait, $c_{vis}^2 = 1/3$, particules relativistes sans collisions.)



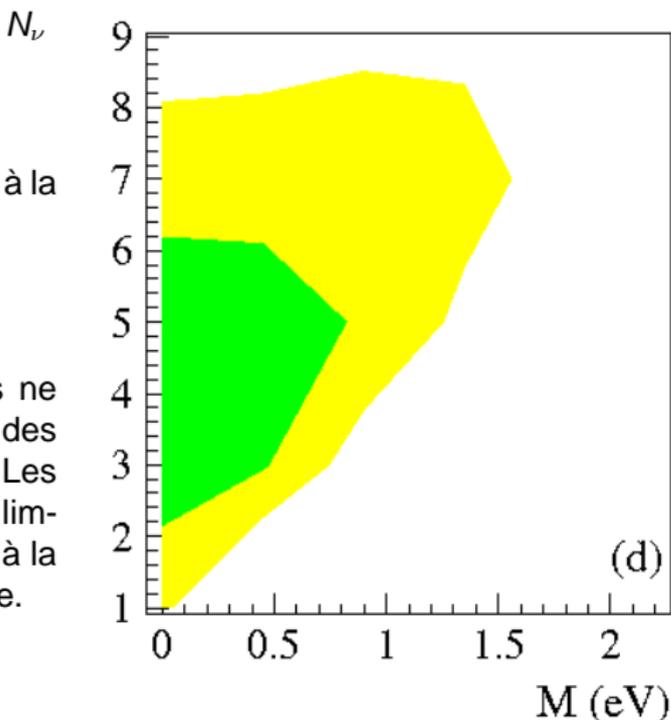
(Melchiorri & Trotta, 2004)

Des neutrini massifs contribuent à la densité de la matière noire,

$$\Omega_{m\nu} h^2 = \frac{m_\nu}{94 \text{eV}}.$$

Comme ils sont très légers, ils ne participent pas à la formation des structures à petites échelles. Les structures à petite échelle donc limitent la contribution des neutrini à la matière noire et alors leur masse.

$$m_\nu \leq 1 \text{eV}$$



Pendant l'expansion et le refroidissement l'univers a baissé sa température par maintes ordres de grandeurs.

- La transition QCD, $T_c \simeq 100\text{MeV} \simeq 10^{12}\text{K}$:
Les quarks et gluons confinent en hadrons, les protons et neutrons se forment.

Pendant l'expansion et le refroidissement l'univers a baissé sa température par maintes ordres de grandeurs.

- La transition QCD, $T_c \simeq 100\text{MeV} \simeq 10^{12}\text{K}$:
Les quarks et gluons confinent en hadrons, les protons et neutrons se forment.
- La transition électrofaible, $T_c \simeq 100\text{GeV} \simeq 10^{15}\text{K}$:
Les bosons W^\pm et Z deviennent massifs, seul le photon reste sans masse \Rightarrow les interactions 'faibles' deviennent faibles.

Pendant l'expansion et le refroidissement l'univers a baissé sa température par maintes ordres de grandeurs.

- La transition QCD, $T_c \simeq 100\text{MeV} \simeq 10^{12}\text{K}$:
Les quarks et gluons confinent en hadrons, les protons et neutrons se forment.
- La transition électrofaible, $T_c \simeq 100\text{GeV} \simeq 10^{15}\text{K}$:
Les bosons W^\pm et Z deviennent massifs, seul le photon reste sans masse \Rightarrow les interactions 'faibles' deviennent faibles.
- super-symétrie? ...

Pendant l'expansion et le refroidissement l'univers a baissé sa température par maintes ordres de grandeurs.

- La transition QCD, $T_c \simeq 100\text{MeV} \simeq 10^{12}\text{K}$:
Les quarks et gluons confinent en hadrons, les protons et neutrons se forment.
- La transition électrofaible, $T_c \simeq 100\text{GeV} \simeq 10^{15}\text{K}$:
Les bosons W^\pm et Z deviennent massifs, seul le photon reste sans masse \Rightarrow les interactions 'faibles' deviennent faibles.
- super-symétrie? ...

Conséquences observables:

- Champs magnétiques

Pendant l'expansion et le refroidissement l'univers a baissé sa température par maintes ordres de grandeurs.

- La transition QCD, $T_c \simeq 100\text{MeV} \simeq 10^{12}\text{K}$:
Les quarks et gluons confinent en hadrons, les protons et neutrons se forment.
- La transition électrofaible, $T_c \simeq 100\text{GeV} \simeq 10^{15}\text{K}$:
Les bosons W^\pm et Z deviennent massifs, seul le photon reste sans masse \Rightarrow les interactions 'faibles' deviennent faibles.
- super-symétrie? ...

Conséquences observables:

- Champs magnétiques
- Ondes gravitationnelles

Pendant l'expansion et le refroidissement l'univers a baissé sa température par maintes ordres de grandeurs.

- La transition QCD, $T_c \simeq 100\text{MeV} \simeq 10^{12}\text{K}$:
Les quarks et gluons confinent en hadrons, les protons et neutrons se forment.
- La transition électrofaible, $T_c \simeq 100\text{GeV} \simeq 10^{15}\text{K}$:
Les bosons W^\pm et Z deviennent massifs, seul le photon reste sans masse \Rightarrow les interactions 'faibles' deviennent faibles.
- super-symétrie? ...

Conséquences observables:

- Champs magnétiques
- Ondes gravitationnelles
- Trous noirs primordiales

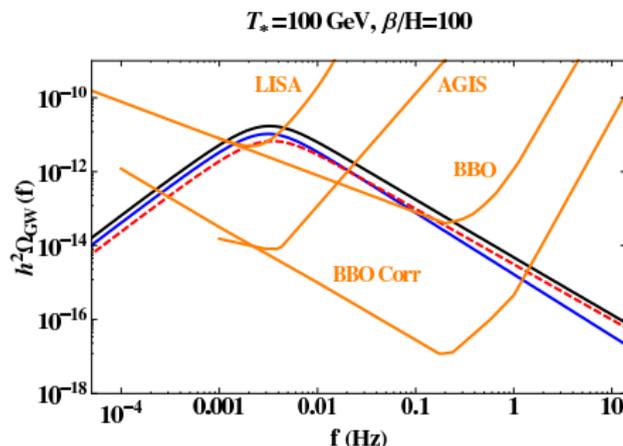
Pendant l'expansion et le refroidissement l'univers a baissé sa température par maintes ordres de grandeurs.

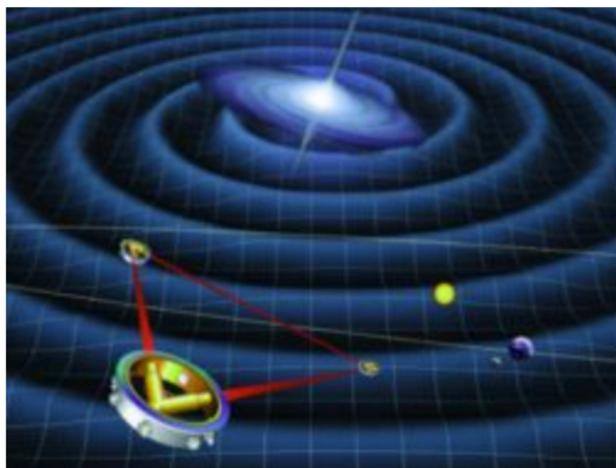
- La transition QCD, $T_c \simeq 100\text{MeV} \simeq 10^{12}\text{K}$:
Les quarks et gluons confinent en hadrons, les protons et neutrons se forment.
- La transition électrofaible, $T_c \simeq 100\text{GeV} \simeq 10^{15}\text{K}$:
Les bosons W^\pm et Z deviennent massifs, seul le photon reste sans masse \Rightarrow les interactions 'faibles' deviennent faibles.
- super-symétrie? ...

Conséquences observables:

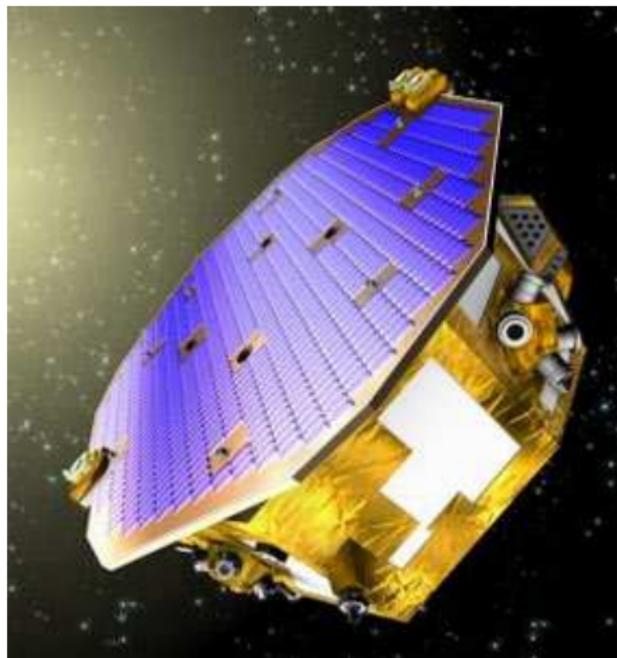
- Champs magnétiques
- Ondes gravitationnelles
- Trous noirs primordiales

(Caprini, Durrer & Servant, 2009)





Le LISA satellite projet (impression artistique). Lancement >2017.



The LISA pathfinder satellite (the real thing). Lancement prévu 2011.

- Notre système solaire ne consiste pratiquement que de baryons (matière, protons et neutrons), il contient que très peu d'anti-matière.

- Notre système solaire ne consiste pratiquement que de baryons (matière, protons et neutrons), il contient que très peu d'anti-matière.
- De même pour notre galaxie et tout l'univers observable.

- Notre système solaire ne consiste pratiquement que de baryons (matière, protons et neutrons), il contient que très peu d'anti-matière.
- De même pour notre galaxie et tout l'univers observable.
- Cette asymétrie baryonique, est-elle une condition initiale?

- Notre système solaire ne consiste pratiquement que de baryons (matière, protons et neutrons), il contient que très peu d'anti-matière.
- De même pour notre galaxie et tout l'univers observable.
- Cette asymétrie baryonique, est-elle une condition initiale?
- Sinon, comment l'expliquer?

- Notre système solaire ne consiste pratiquement que de baryons (matière, protons et neutrons), il contient que très peu d'anti-matière.
- De même pour notre galaxie et tout l'univers observable.
- Cette asymétrie baryonique, est-elle une condition initiale?
- Sinon, comment l'expliquer?

Pour générer une anisotropie baryonique dans l'évolution de l'univers les trois conditions de Sakharov doivent être satisfaites:

- Notre système solaire ne consiste pratiquement que de baryons (matière, protons et neutrons), il contient que très peu d'anti-matière.
- De même pour notre galaxie et tout l'univers observable.
- Cette asymétrie baryonique, est-elle une condition initiale?
- Sinon, comment l'expliquer?

Pour générer une anisotropie baryonique dans l'évolution de l'univers les trois conditions de Sakharov doivent être satisfaites:

- Brisure de la symétrie baryonique (standard model ✓).

- Notre système solaire ne consiste pratiquement que de baryons (matière, protons et neutrons), il contient que très peu d'anti-matière.
- De même pour notre galaxie et tout l'univers observable.
- Cette asymétrie baryonique, est-elle une condition initiale?
- Sinon, comment l'expliquer?

Pour générer une anisotropie baryonique dans l'évolution de l'univers les trois conditions de Sakharov doivent être satisfaites:

- Brisure de la symétrie baryonique (standard model ✓).
- Brisure des symétries C et CP (standard model ✓).

- Notre système solaire ne consiste pratiquement que de baryons (matière, protons et neutrons), il contient que très peu d'anti-matière.
- De même pour notre galaxie et tout l'univers observable.
- Cette asymétrie baryonique, est-elle une condition initiale?
- Sinon, comment l'expliquer?

Pour générer une anisotropie baryonique dans l'évolution de l'univers les trois conditions de Sakharov doivent être satisfaites:

- Brisure de la symétrie baryonique (standard model ✓).
- Brisure des symétries C et CP (standard model ✓).
- Le plasma cosmique doit quitter l'équilibre thermique (standard model ✗).

- Notre système solaire ne consiste pratiquement que de baryons (matière, protons et neutrons), il contient que très peu d'anti-matière.
- De même pour notre galaxie et tout l'univers observable.
- Cette asymétrie baryonique, est-elle une condition initiale?
- Sinon, comment l'expliquer?

Pour générer une anisotropie baryonique dans l'évolution de l'univers les trois conditions de Sakharov doivent être satisfaites:

- Brisure de la symétrie baryonique (standard model ✓).
- Brisure des symétries C et CP (standard model ✓).
- Le plasma cosmique doit quitter l'équilibre thermique (standard model ✗).

Avec des légères variations du modèle standard de la physique des particules on peut obtenir une transition de phase électro-faible du premier ordre et donc une déviation de l'équilibre thermique qui permet la formation d'une asymétrie baryonique.

l'inflation adresse des problèmes fondamentaux de la cosmologie

- Singularité ?

l'inflation adresse des problèmes fondamentaux de la cosmologie

- Singularité ?
- Pourquoi notre univers est-il si plat et si grand ?

l'inflation adresse des problèmes fondamentaux de la cosmologie

- Singularité ?
- Pourquoi notre univers est-il si plat et si grand ?
- Pourquoi est-il si vieux ? ($t_0 \simeq 1.4 \times 10^{10}$ années, $t_P \simeq 5.4 \times 10^{-44}$ sec)

l'inflation adresse des problèmes fondamentals de la cosmologie

- Singularité ?
- Pourquoi notre univers est-il si plat et si grand ?
- Pourquoi est-il si vieux ? ($t_0 \simeq 1.4 \times 10^{10}$ années, $t_P \simeq 5.4 \times 10^{-44}$ sec)
- Pourquoi a-t-il une entropie si élevée ? (entropie/baryon $\simeq 10^{10}$)

l'inflation adresse des problèmes fondamentaux de la cosmologie

- Singularité ?
- Pourquoi notre univers est-il si plat et si grand ?
- Pourquoi est-il si vieux ? ($t_0 \simeq 1.4 \times 10^{10}$ années, $t_P \simeq 5.4 \times 10^{-44}$ sec)
- Pourquoi a-t-il une entropie si élevée ? (entropie/baryon $\simeq 10^{10}$)

Une phase inflationnaire adresse ces questions: Pendant l'inflation, la densité d'énergie est dominée par l'énergie potentielle d'un champ scalaire quasiment constant.

l'inflation adresse des problèmes fondamentaux de la cosmologie

- Singularité ?
- Pourquoi notre univers est-il si plat et si grand ?
- Pourquoi est-il si vieux ? ($t_0 \simeq 1.4 \times 10^{10}$ années, $t_P \simeq 5.4 \times 10^{-44}$ sec)
- Pourquoi a-t-il une entropie si élevée ? (entropie/baryon $\simeq 10^{10}$)

Une phase inflationnaire adresse ces questions: Pendant l'inflation, la densité d'énergie est dominée par l'énergie potentielle d'un champ scalaire quasiment constant.

L'équation de Friedmann devient alors

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 \simeq \frac{8\pi G}{3} V \simeq \text{constant} = H^2, \quad \dot{R} = HR.$$

l'inflation adresse des problèmes fondamentaux de la cosmologie

- Singularité ?
- Pourquoi notre univers est-il si plat et si grand ?
- Pourquoi est-il si vieux ? ($t_0 \simeq 1.4 \times 10^{10}$ années, $t_P \simeq 5.4 \times 10^{-44}$ sec)
- Pourquoi a-t-il une entropie si élevée ? (entropie/baryon $\simeq 10^{10}$)

Une phase inflationnaire adresse ces questions: Pendant l'inflation, la densité d'énergie est dominée par l'énergie potentielle d'un champ scalaire quasiment constant.

L'équation de Friedmann devient alors

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 \simeq \frac{8\pi G}{3} V \simeq \text{constant} = H^2, \quad \dot{R} = HR.$$

Avec solution $R(t) \simeq R_0 \exp(Ht)$.

Cette expansion rapide aplatit l'univers et le rend très grand.

l'inflation adresse des problèmes fondamentaux de la cosmologie

- Singularité ?
- Pourquoi notre univers est-il si plat et si grand ?
- Pourquoi est-il si vieux ? ($t_0 \simeq 1.4 \times 10^{10}$ années, $t_P \simeq 5.4 \times 10^{-44}$ sec)
- Pourquoi a-t-il une entropie si élevée ? (entropie/baryon $\simeq 10^{10}$)

Une phase inflationnaire adresse ces questions: Pendant l'inflation, la densité d'énergie est dominée par l'énergie potentielle d'un champ scalaire quasiment constant.

L'équation de Friedmann devient alors

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 \simeq \frac{8\pi G}{3} V \simeq \text{constant} = H^2, \quad \dot{R} = HR.$$

Avec solution $R(t) \simeq R_0 \exp(Ht).$

Cette expansion rapide aplatit l'univers et le rend très grand.

La phase inflationnaire se termine quand le potentiel se désintègre ce qui mène à la production de beaucoup de particules et donc beaucoup d'entropie.

l'inflation adresse des problèmes fondamentaux de la cosmologie

- Singularité ?
- Pourquoi notre univers est-il si plat et si grand ?
- Pourquoi est-il si vieux ? ($t_0 \simeq 1.4 \times 10^{10}$ années, $t_P \simeq 5.4 \times 10^{-44}$ sec)
- Pourquoi a-t-il une entropie si élevée ? (entropie/baryon $\simeq 10^{10}$)

Une phase inflationnaire adresse ces questions: Pendant l'inflation, la densité d'énergie est dominée par l'énergie potentielle d'un champ scalaire quasiment constant.

L'équation de Friedmann devient alors

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 \simeq \frac{8\pi G}{3} V \simeq \text{constant} = H^2, \quad \dot{R} = HR.$$

Avec solution $R(t) \simeq R_0 \exp(Ht).$

Cette expansion rapide aplatit l'univers et le rend très grand.

La phase inflationnaire se termine quand le potentiel se désintègre ce qui mène à la production de beaucoup de particules et donc beaucoup d'entropie.

Mais l'inflation a aussi d'autres conséquences:

Fluctuations inflationnaires

En théorie des champs quantiques, à toute espèce de particules (électron, photon, neutrini, etc) correspond un champ. Ce champ fluctue toujours et les particules ne sont rien d'autres que de telles fluctuations, excitations de leur champ (comme les sons d'une guitare correspondent à des excitations de ses cordes).

En théorie des champs quantiques, à toute espèce de particules (électron, photon, neutrini, etc) correspond un champ. Ce champ fluctue toujours et les particules ne sont rien d'autres que de telles fluctuations, excitations de leur champ (comme les sons d'une guitare correspondent à des excitations de ses cordes).

Mais un champ quantique fluctue même un peu dans le vide (c'est-à-dire en absence de particules).

Fluctuations inflationnaires

En théorie des champs quantiques, à toute espèce de particules (électron, photon, neutrini, etc) correspond un champ. Ce champ fluctue toujours et les particules ne sont rien d'autres que de telles fluctuations, excitations de leur champ (comme les sons d'une guitare correspondent à des excitations de ses cordes).

Mais un champ quantique fluctue même un peu dans le vide (c'est-à-dire en absence de particules).

Pendant une phase inflationnaire, les longueurs d'onde de ces oscillations se dilatent très rapidement en dehors du régime qui est en contact causal.

Fluctuations inflationnaires

En théorie des champs quantiques, à toute espèce de particules (électron, photon, neutrini, etc) correspond un champ. Ce champ fluctue toujours et les particules ne sont rien d'autres que de telles fluctuations, excitations de leur champ (comme les sons d'une guitare correspondent à des excitations de ses cordes).

Mais un champ quantique fluctue même un peu dans le vide (c'est-à-dire en absence de particules).

Pendant une phase inflationnaire, les longueurs d'onde de ces oscillations se dilatent très rapidement en dehors du régime qui est en contact causal.

Après ce moment ils ne sont plus des pures fluctuations du vide mais ils ont une densité d'énergie non-nulle.

Fluctuations inflationnaires

En théorie des champs quantiques, à toute espèce de particules (électron, photon, neutrini, etc) correspond un champ. Ce champ fluctue toujours et les particules ne sont rien d'autres que de telles fluctuations, excitations de leur champ (comme les sons d'une guitare correspondent à des excitations de ses cordes).

Mais un champ quantique fluctue même un peu dans le vide (c'est-à-dire en absence de particules).

Pendant une phase inflationnaire, les longueurs d'onde de ces oscillations se dilatent très rapidement en dehors du régime qui est en contact causal.

Après ce moment ils ne sont plus des pures fluctuations du vide mais ils ont une densité d'énergie non-nulle.

Ceci mène à des fluctuations réelles dans la densité d'énergie et dans la géométrie de l'univers.

Fluctuations inflationnaires

En théorie des champs quantiques, à toute espèce de particules (électron, photon, neutrini, etc) correspond un champ. Ce champ fluctue toujours et les particules ne sont rien d'autres que de telles fluctuations, excitations de leur champ (comme les sons d'une guitare correspondent à des excitations de ses cordes).

Mais un champ quantique fluctue même un peu dans le vide (c'est-à-dire en absence de particules).

Pendant une phase inflationnaire, les longueurs d'onde de ces oscillations se dilatent très rapidement en dehors du régime qui est en contact causal.

Après ce moment ils ne sont plus des pures fluctuations du vide mais ils ont une densité d'énergie non-nulle.

Ceci mène à des fluctuations réelles dans la densité d'énergie et dans la géométrie de l'univers.

Ces fluctuations qui peuvent être calculées en détail, sont à l'origine des structures observées dans l'univers, galaxies, amas de galaxies, filament et anisotropies du CMB.

Fluctuations inflationnaires

En théorie des champs quantiques, à toute espèce de particules (électron, photon, neutrini, etc) correspond un champ. Ce champ fluctue toujours et les particules ne sont rien d'autres que de telles fluctuations, excitations de leur champ (comme les sons d'une guitare correspondent à des excitations de ses cordes).

Mais un champ quantique fluctue même un peu dans le vide (c'est-à-dire en absence de particules).

Pendant une phase inflationnaire, les longueurs d'onde de ces oscillations se dilatent très rapidement en dehors du régime qui est en contact causal.

Après ce moment ils ne sont plus des pures fluctuations du vide mais ils ont une densité d'énergie non-nulle.

Ceci mène à des fluctuations réelles dans la densité d'énergie et dans la géométrie de l'univers.

Ces fluctuations qui peuvent être calculées en détail, sont à l'origine des structures observées dans l'univers, galaxies, amas de galaxies, filament et anisotropies du CMB.

Pour être en accord avec les observations, l'énergie qui correspond au potentiel inflationnaire est env. $V^{1/4} \simeq 10^{16} \text{ GeV} = 10^{12} \times \text{l'énergie maximal du LHC}$.

Fluctuations inflationnaires

En théorie des champs quantiques, à toute espèce de particules (électron, photon, neutrini, etc) correspond un champ. Ce champ fluctue toujours et les particules ne sont rien d'autres que de telles fluctuations, excitations de leur champ (comme les sons d'une guitare correspondent à des excitations de ses cordes).

Mais un champ quantique fluctue même un peu dans le vide (c'est-à-dire en absence de particules).

Pendant une phase inflationnaire, les longueurs d'onde de ces oscillations se dilatent très rapidement en dehors du régime qui est en contact causal.

Après ce moment ils ne sont plus des pures fluctuations du vide mais ils ont une densité d'énergie non-nulle.

Ceci mène à des fluctuations réelles dans la densité d'énergie et dans la géométrie de l'univers.

Ces fluctuations qui peuvent être calculées en détail, sont à l'origine des structures observées dans l'univers, galaxies, amas de galaxies, filament et anisotropies du CMB.

Pour être en accord avec les observations, l'énergie qui correspond au potentiel inflationnaire est env. $V^{1/4} \simeq 10^{16} \text{ GeV} = 10^{12} \times \text{l'énergie maximal du LHC}$.

A l'origine des grandes structures dans l'univers sont des fluctuations quantiques.

Les modèles inflationnaires simples ne prédisent pas seulement des fluctuations scalaires (fluctuations de densité) qui mène à la formation des grandes structures, mais aussi des ondes gravitationnelles.

Les modèles inflationnaires simples ne prédisent pas seulement des fluctuations scalaires (fluctuations de densité) qui mène à la formation des grandes structures, mais aussi des ondes gravitationnelles.

Les ondes gravitationnelles comme les fluctuations scalaires génèrent des anisotropies dans la température du CMB.

Les modèles inflationnaires simples ne prédisent pas seulement des fluctuations scalaires (fluctuations de densité) qui mène à la formation des grandes structures, mais aussi des ondes gravitationnelles.

Les ondes gravitationnelles comme les fluctuations scalaires génèrent des anisotropies dans la température du CMB.

En plus ils génèrent une légère polarisation des photons du CMB.

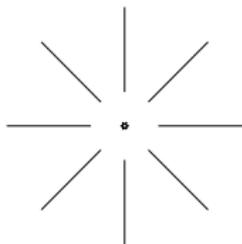
Les modèles inflationnaires simples ne prédisent pas seulement des fluctuations scalaires (fluctuations de densité) qui mène à la formation des grandes structures, mais aussi des ondes gravitationnelles.

Les ondes gravitationnelles comme les fluctuations scalaires génèrent des anisotropies dans la température du CMB.

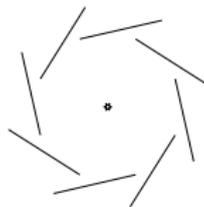
En plus ils génèrent une légère polarisation des photons du CMB.

Les perturbations de densité (scalaires) ne produisent que un type de polarisation (E) tandis que les ondes gravitationnelles (perturbations tensorielles) en produisent un deuxième (B).

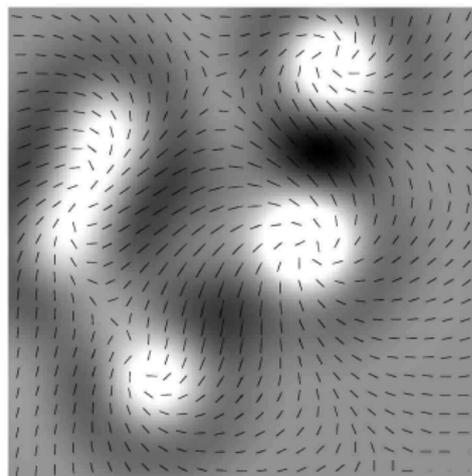
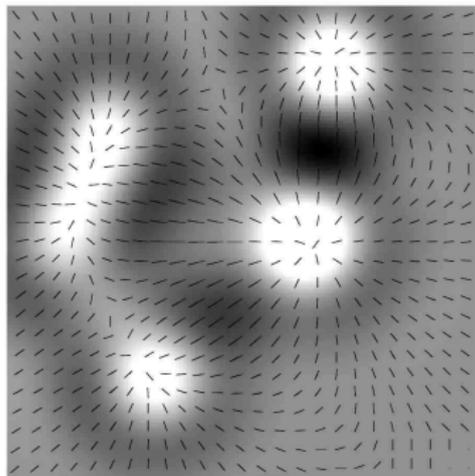
Le défis du satellite Planck



pure E-polarisation (scalaires et ondes grav.)



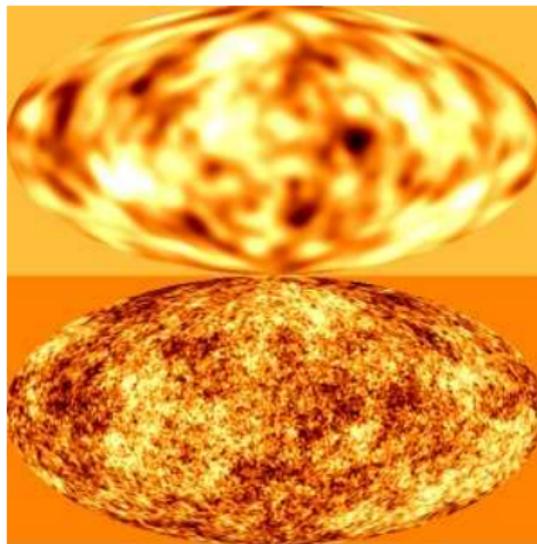
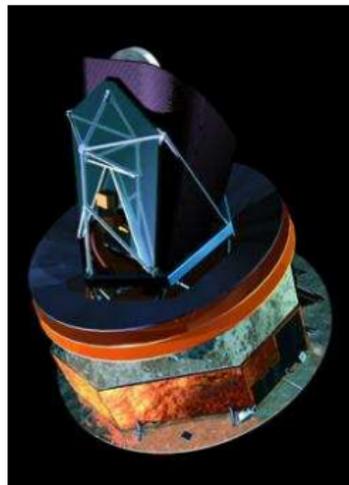
pure B-polarisation (seul ondes grav.)



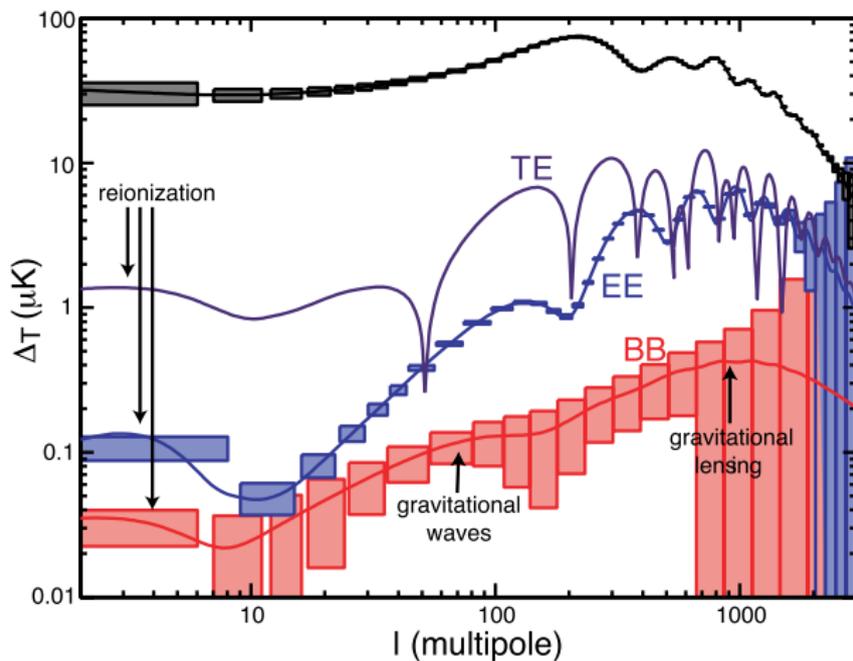
La découverte de cette polarisation B 'the smoking gun of inflation' est un des défis du **satellite Planck** de l'ESA qui a été lancé ce mai 14, 2009 et qui prend des données à l'heure actuelle.

Le défis du satellite Planck

La découverte de cette polarisation B 'the smoking gun of inflation' est un des défis du **satellite Planck** de l'ESA qui a été lancé ce mai 14, 2009 et qui prend des données à l'heure actuelle.

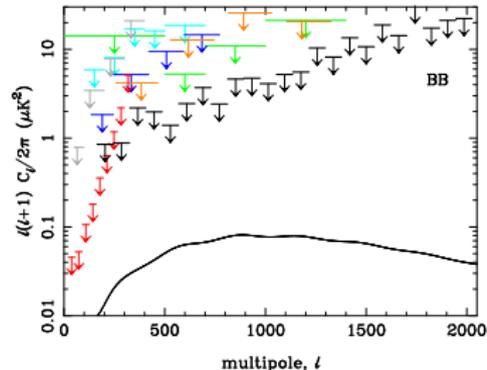
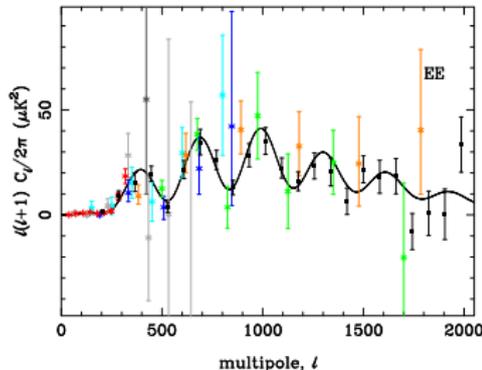
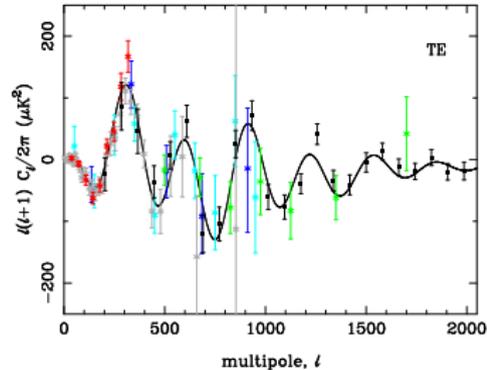
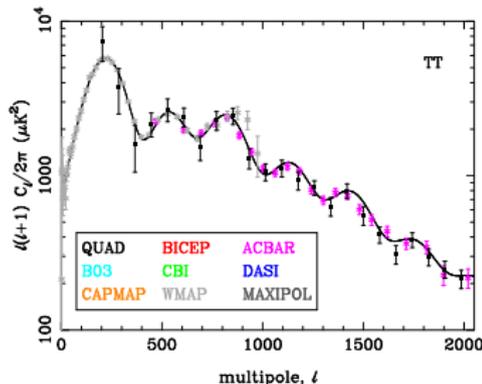
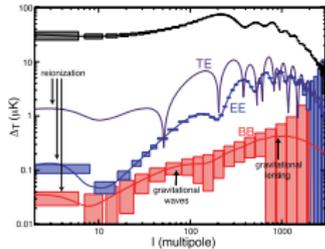


La résolution de Planck comparée à celle de COBE.



Planck forecast

Le défis du satellite Planck



Planck forecast

Résultats actuels (Pryke et al., 2009).

Les observations cosmologiques contiennent des information pas seulement sur l'interaction gravitationnelle mais ils nous donnent aussi des indications sur la physique à haute énergie au delà du modèle standard.

Les observations cosmologiques contiennent des information pas seulement sur l'interaction gravitationnelle mais ils nous donnent aussi des indications sur la physique à haute énergie au delà du modèle standard.

- Limites sur les masses des neutrini et leur nombre.

Les observations cosmologiques contiennent des information pas seulement sur l'interaction gravitationnelle mais ils nous donnent aussi des indications sur la physique à haute énergie au delà du modèle standard.

- Limites sur les masses des neutrini et leur nombre.
- Transitions de phase QCD et électrofaible.

Les observations cosmologiques contiennent des information pas seulement sur l'interaction gravitationnelle mais ils nous donnent aussi des indications sur la physique à haute énergie au delà du modèle standard.

- Limites sur les masses des neutrini et leur nombre.
- Transitions de phase QCD et électrofaible.
- Asymétrie baryonique

Les observations cosmologiques contiennent des information pas seulement sur l'interaction gravitationnelle mais ils nous donnent aussi des indications sur la physique à haute énergie au delà du modèle standard.

- Limites sur les masses des neutrini et leur nombre.
- Transitions de phase QCD et électrofaible.
- Asymétrie baryonique
- Inflation: comment identifier le champ scalaire de l'inflation, ceci correspond à quelle 'particule'?

Les observations cosmologiques contiennent des information pas seulement sur l'interaction gravitationnelle mais ils nous donnent aussi des indications sur la physique à haute énergie au delà du modèle standard.

- Limites sur les masses des neutrini et leur nombre.
- Transitions de phase QCD et électrofaible.
- Asymétrie baryonique
- Inflation: comment identifier le champ scalaire de l'inflation, ceci correspond à quelle 'particule'?
- Dimensions supplémentaires, 'braneworlds'.

Les observations cosmologiques contiennent des information pas seulement sur l'interaction gravitationnelle mais ils nous donnent aussi des indications sur la physique à haute énergie au delà du modèle standard.

- Limites sur les masses des neutrini et leur nombre.
- Transitions de phase QCD et électrofaible.
- Asymétrie baryonique
- Inflation: comment identifier le champ scalaire de l'inflation, ceci correspond à quelle 'particule'?
- Dimensions supplémentaires, 'braneworlds'.
- Conséquences de la théorie des super-cordes pour la cosmologie.

Les observations cosmologiques contiennent des information pas seulement sur l'interaction gravitationnelle mais ils nous donnent aussi des indications sur la physique à haute énergie au delà du modèle standard.

- Limites sur les masses des neutrini et leur nombre.
- Transitions de phase QCD et électrofaible.
- Asymétrie baryonique
- Inflation: comment identifier le champ scalaire de l'inflation, ceci correspond à quelle 'particule'?
- Dimensions supplémentaires, 'braneworlds'.
- Conséquences de la théorie des super-cordes pour la cosmologie.

Pour l'instant, la cosmologie semble le chemin le plus prometteur pour l'accès à la physique de très hautes énergies, $E \gg 10\text{TeV}$.