

Cosmologie Moderne

Cours 13-14



J.-Ch. Hamilton, APC
hamilton@apc.univ-paris7.fr

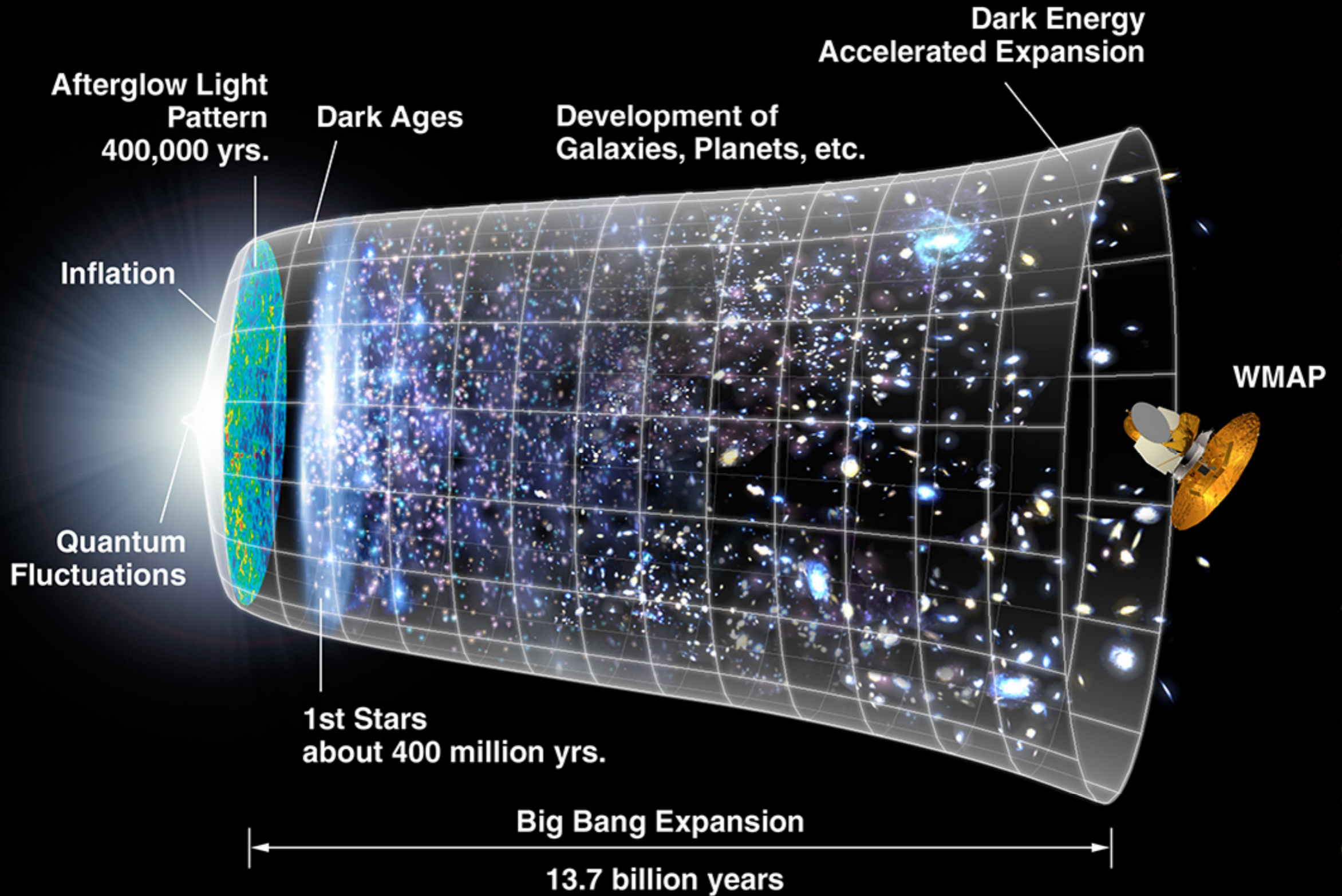


Plan du cours

- Vue d'ensemble de la cosmologie
 - ★ Échelles
 - ★ Les piliers de la cosmologie
 - ★ L'Univers de Friedman-Lemaître
 - ★ Histoire thermique de l'Univers
- La cosmologie observationnelle aujourd'hui
 - ★ Distances en cosmologie
 - ★ La formation des structures
 - ★ La matière noire
 - ★ Energie sombre: Tests cosmologiques (SNIa, CMB et les autres...)
- Le futur de la cosmologie
 - ★ L'inflation
 - ★ Univers primordial
 - ★ Multivers ?



Le fond diffus cosmologique



Découplage Matière-rayonnement

- Noyaux, électrons et photons
 - ★ Interactions continues
 - ★ Équilibre thermodynamique
 - ★ Libre parcours moyen des photons court
 - ★ Univers opaque

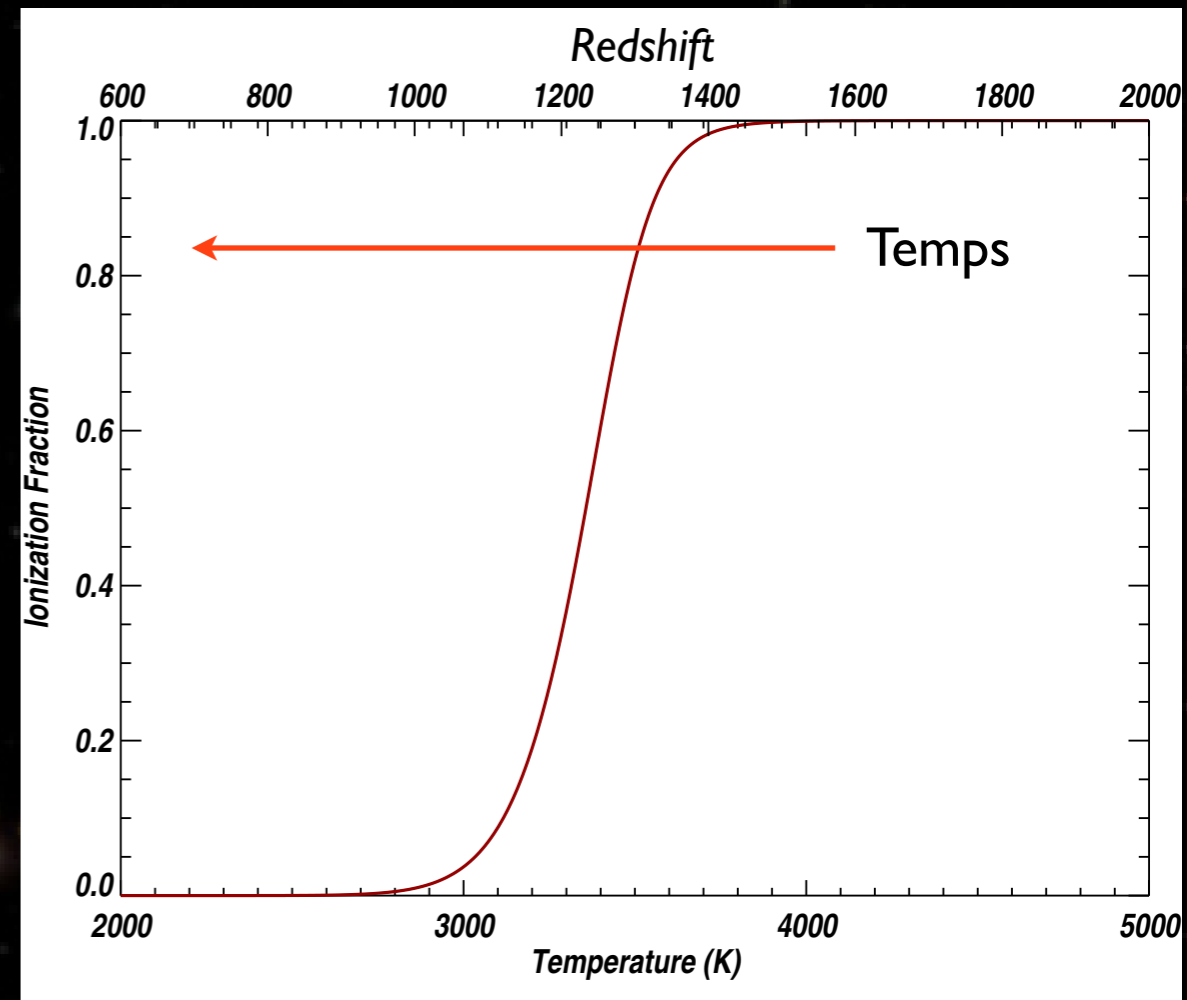


- La température baisse

- ★ $T < 13.6 \text{ eV} - 3000\text{K}$
- ★ Électrons et noyaux forment des atomes
- ★ Les photons n'interagissent plus
- ★ Univers transparent

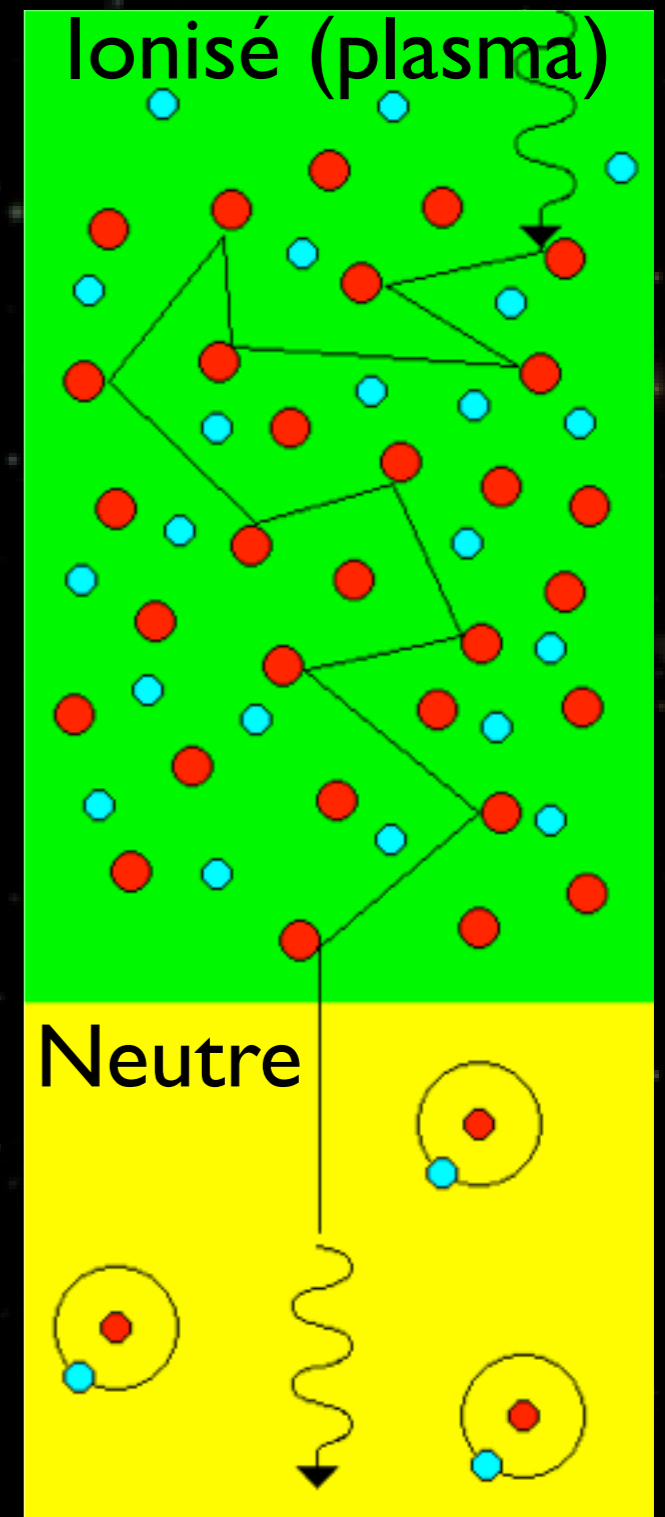
- Émission du fond diffus cosmologique

- ★ 3000 K à $z=1000$
- ★ 3 K aujourd'hui
- ★ Rayonnement sur tout le ciel
- ★ Photographie de l'Univers à $z=1000$
 - endroits plus denses = plus chauds
 - endroits moins denses = moins chauds



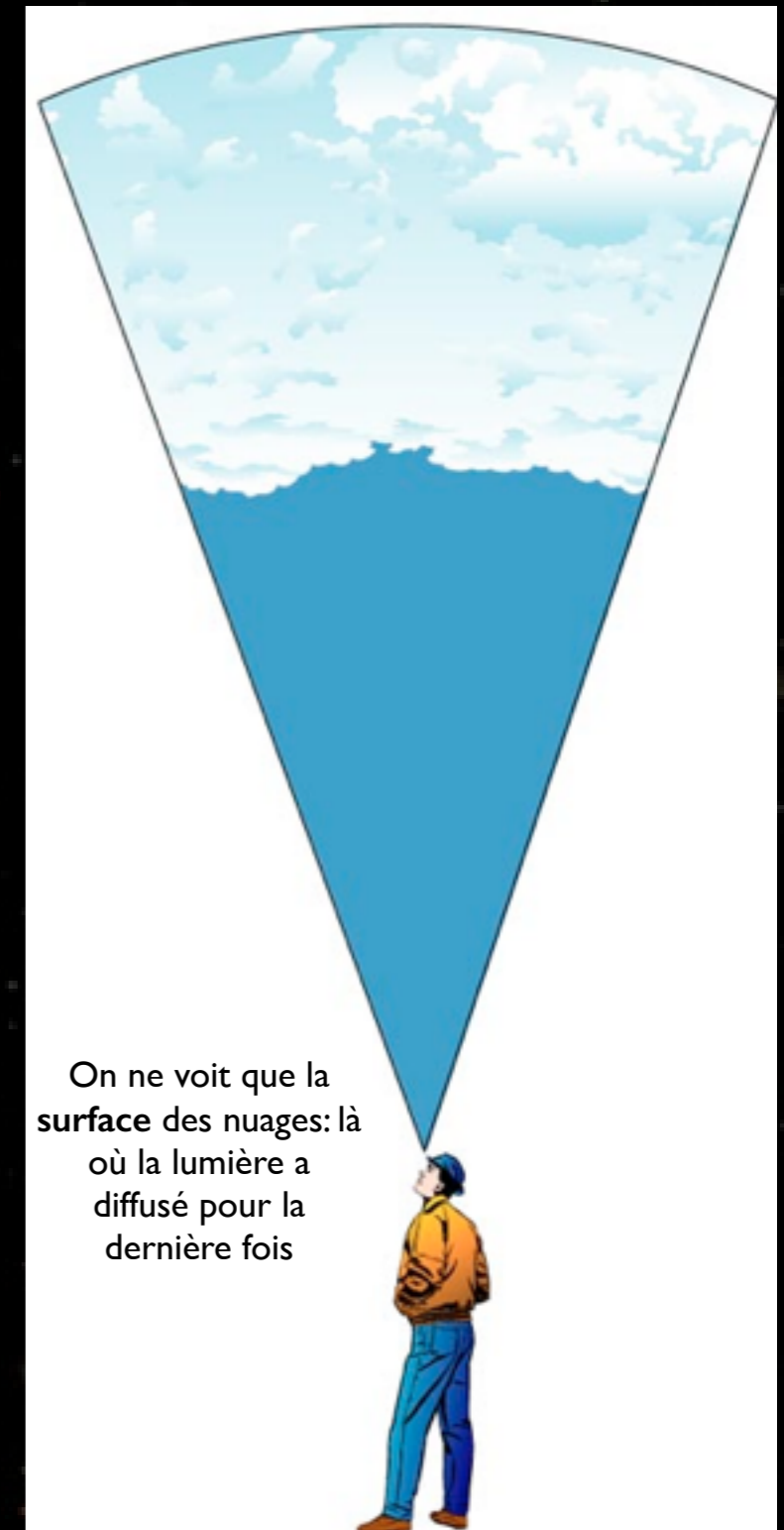
Découplage Matière-rayonnement

- **Noyaux, électrons et photons**
 - ★ Interactions continues
 - ★ Équilibre thermodynamique
 - ★ Libre parcours moyen des photons court
 - ★ Univers opaque
- **La température baisse**
 - ★ $T < 13.6 \text{ eV} - 3000\text{K}$
 - ★ Électrons et noyaux forment des atomes
 - ★ Les photons n'interagissent plus
 - ★ Univers transparent
- **Émission du fond diffus cosmologique**
 - ★ 3000 K à $z=1000$
 - ★ 3 K aujourd'hui
 - ★ Rayonnement sur tout le ciel
 - ★ Photographie de l'Univers à $z=1000$
 - endroits plus denses = plus chauds
 - endroits moins denses = moins chauds



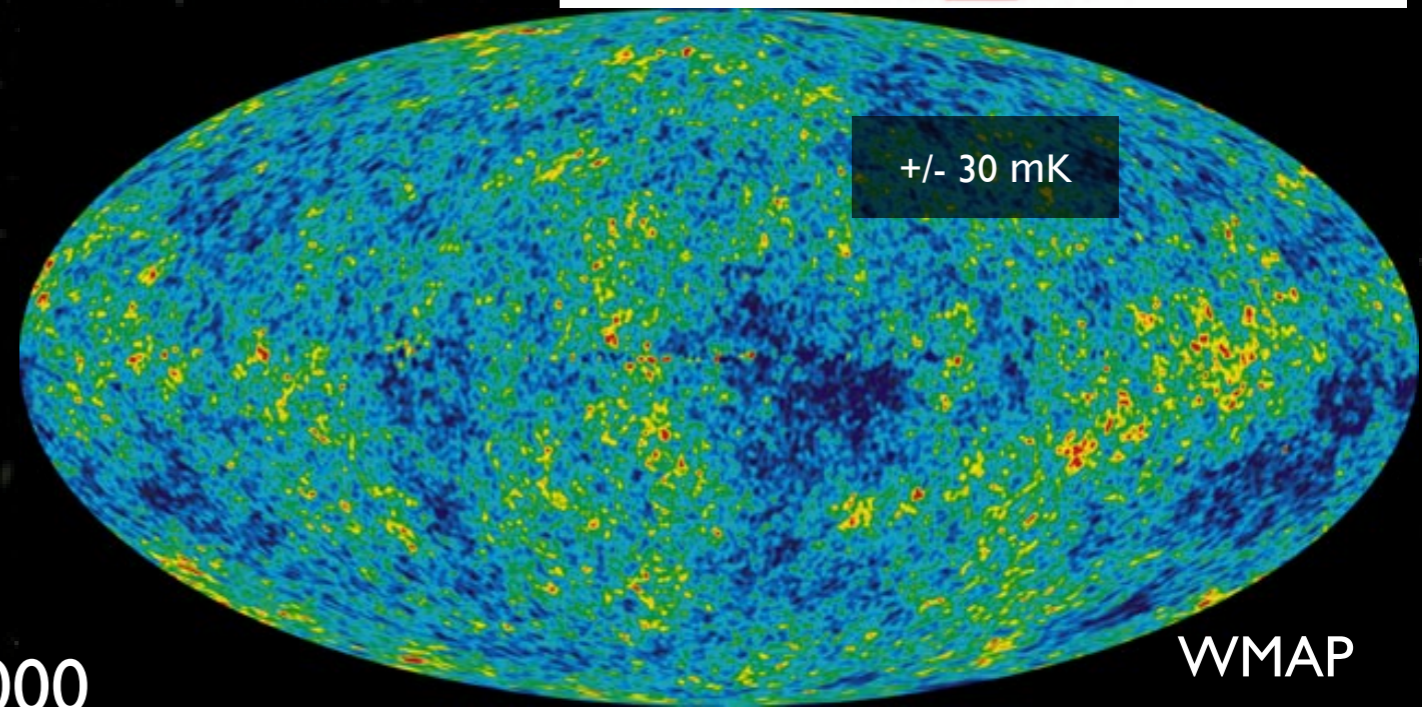
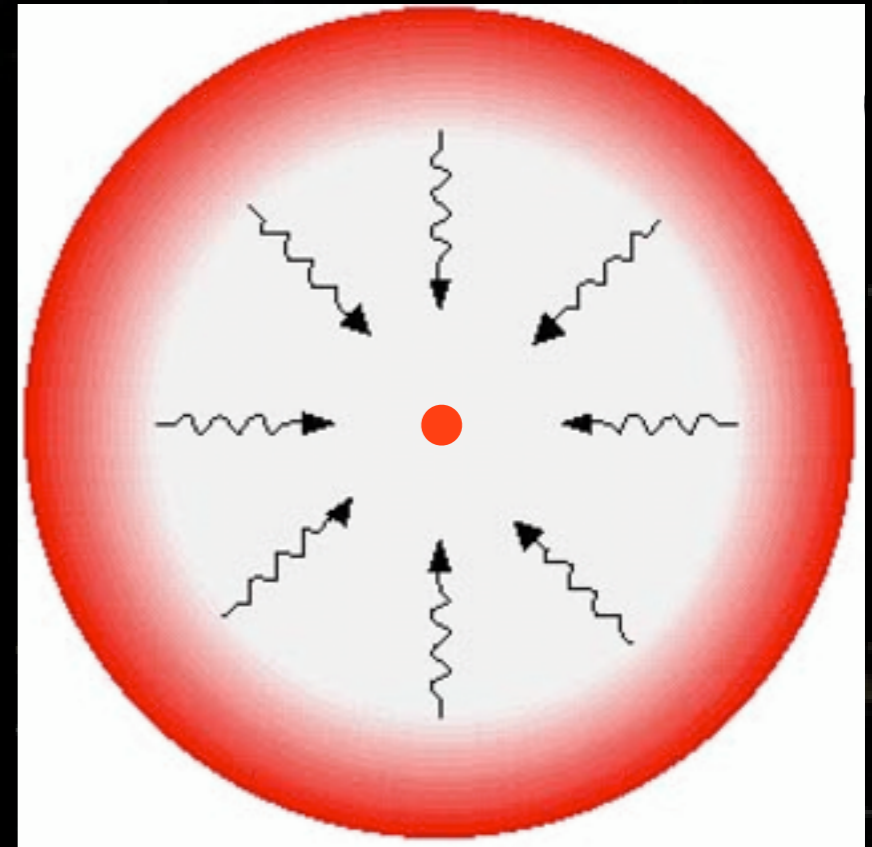
Découplage Matière-rayonnement

- **Noyaux, électrons et photons**
 - ★ Interactions continues
 - ★ Équilibre thermodynamique
 - ★ Libre parcours moyen des photons court
 - ★ Univers opaque
- **La température baisse**
 - ★ $T < 13.6 \text{ eV} - 3000\text{K}$
 - ★ Électrons et noyaux forment des atomes
 - ★ Les photons n'interagissent plus
 - ★ Univers transparent
- **Émission du fond diffus cosmologique**
 - ★ 3000 K à $z=1000$
 - ★ 3 K aujourd'hui
 - ★ Rayonnement sur tout le ciel
 - ★ Photographie de l'Univers à $z=1000$
 - endroits plus denses = plus chauds
 - endroits moins denses = moins chauds



Découplage Matière-rayonnement

- Noyaux, électrons et photons
 - ★ Interactions continues
 - ★ Équilibre thermodynamique
 - ★ Libre parcours moyen des photons court
 - ★ Univers opaque
- La température baisse
 - ★ $T < 13.6 \text{ eV} - 3000 \text{ K}$
 - ★ Électrons et noyaux forment des atomes
 - ★ Les photons n'interagissent plus
 - ★ Univers transparent
- Émission du fond diffus cosmologique
 - ★ 3000 K à $z=1000$
 - ★ 3 K aujourd'hui
 - ★ Rayonnement sur tout le ciel
 - ★ Photographie de l'Univers à $z=1000$
 - endroits plus denses = plus chauds
 - endroits moins denses = moins chauds



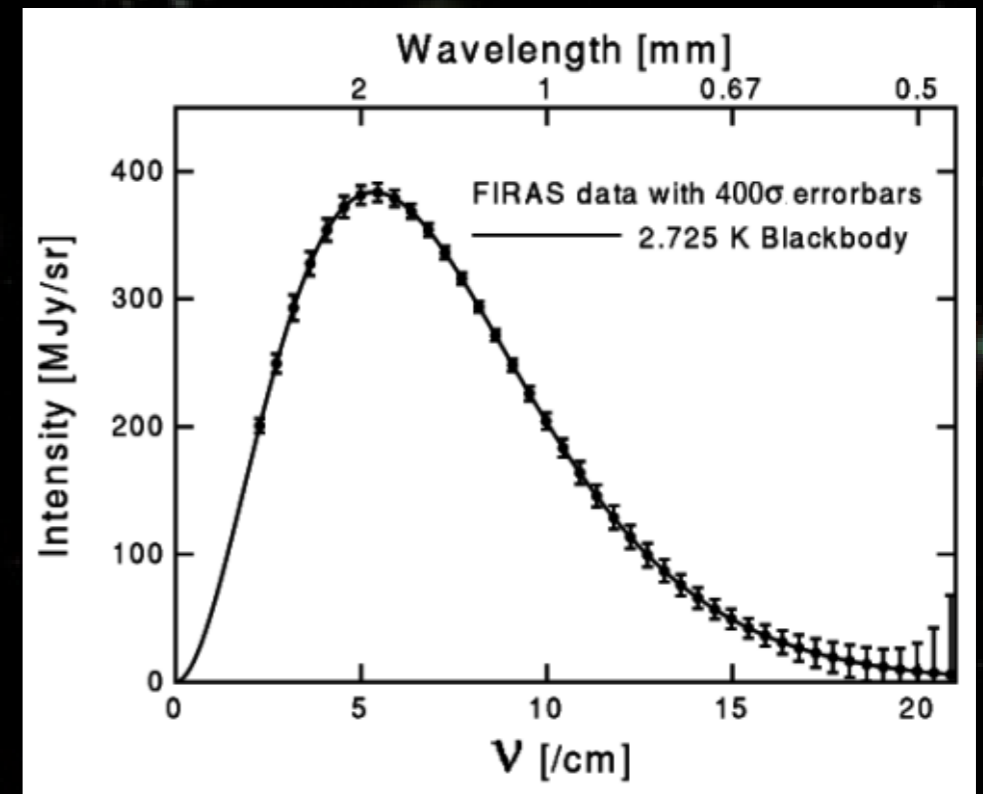
Le fond diffus cosmologique (CMB)

- Relique du découplage matière-rayonnement
 - ★ Prédit par G. Gamow (1948)
 - ★ Découvert par A. Penzias & R. Wilson (1965)
- Rayonnement isotrope
 - ★ “corps noir” parfait à 2.728K
 - ★ plutôt millimétrique que micro-onde
 - ★ 400 photons/cm³
 - ★ Devrait conserver la trace des fluctuations primordiales
- Prix Nobel :
 - ★ 1978 : Penzias & Wilson
 - ★ 2006 : Smoot & Mather : COBE

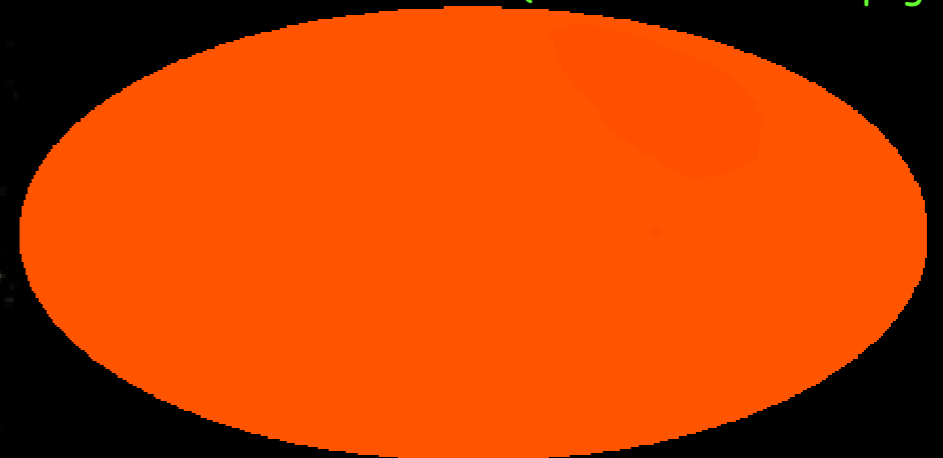


Le fond diffus cosmologique (CMB)

- Relique du découplage matière-rayonnement
 - ★ Prédit par G. Gamow (1948)
 - ★ Découvert par A. Penzias & R. Wilson (1965)
- Rayonnement isotrope
 - ★ “corps noir” parfait à 2.728K
 - ★ plutôt millimétrique que micro-onde
 - ★ 400 photons/cm³
 - ★ Devrait conserver la trace des fluctuations primordiales
- Prix Nobel :
 - ★ 1978 : Penzias & Wilson
 - ★ 2006 : Smoot & Mather : COBE

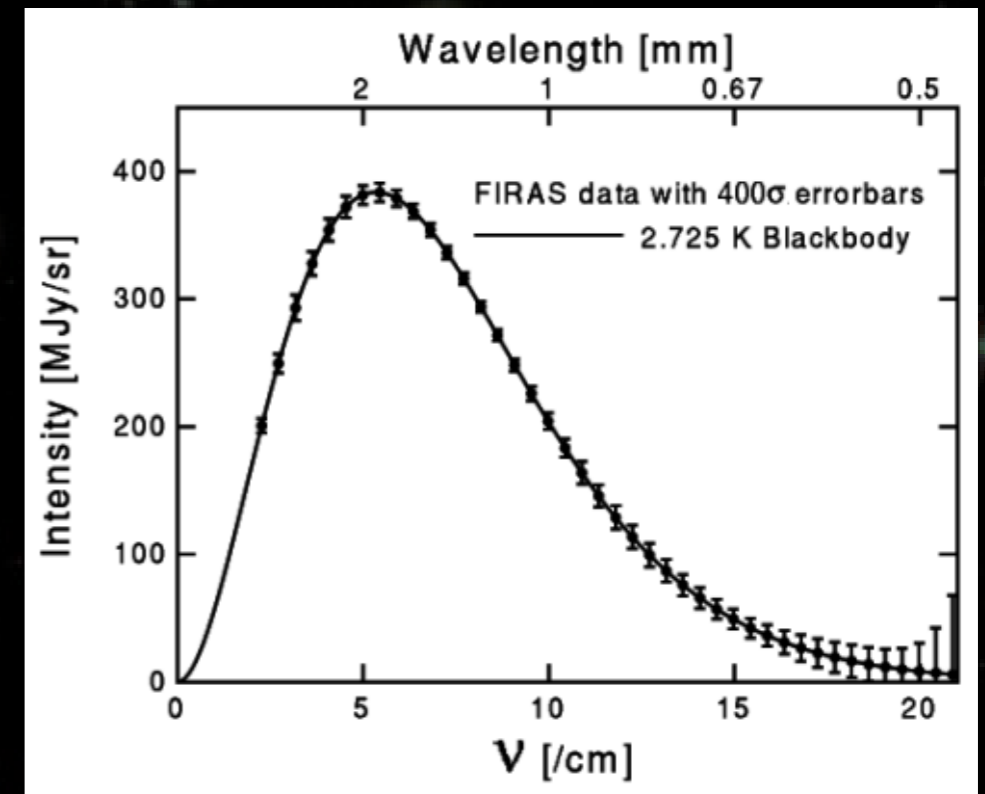


(COBE/DMR homepage)

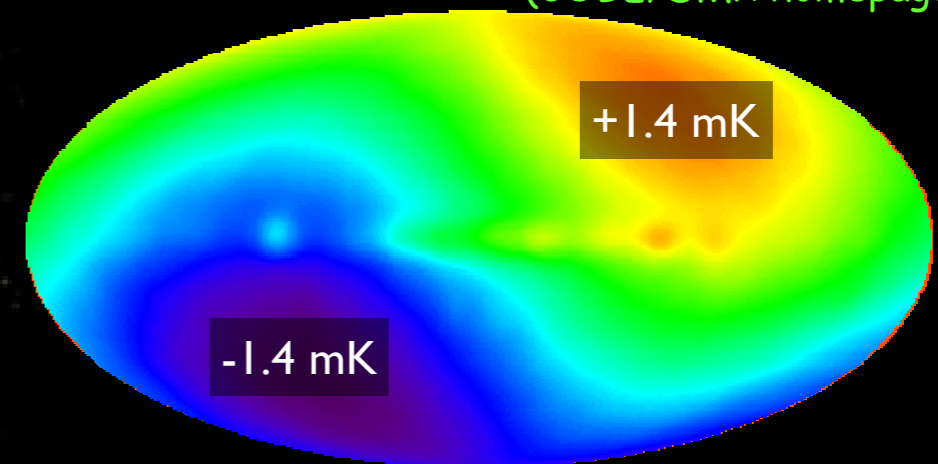


Le fond diffus cosmologique (CMB)

- Relique du découplage matière-rayonnement
 - ★ Prédit par G. Gamow (1948)
 - ★ Découvert par A. Penzias & R. Wilson (1965)
- Rayonnement isotrope
 - ★ “corps noir” parfait à 2.728K
 - ★ plutôt millimétrique que micro-onde
 - ★ 400 photons/cm³
 - ★ Devrait conserver la trace des fluctuations primordiales
- Prix Nobel :
 - ★ 1978 : Penzias & Wilson
 - ★ 2006 : Smoot & Mather : COBE

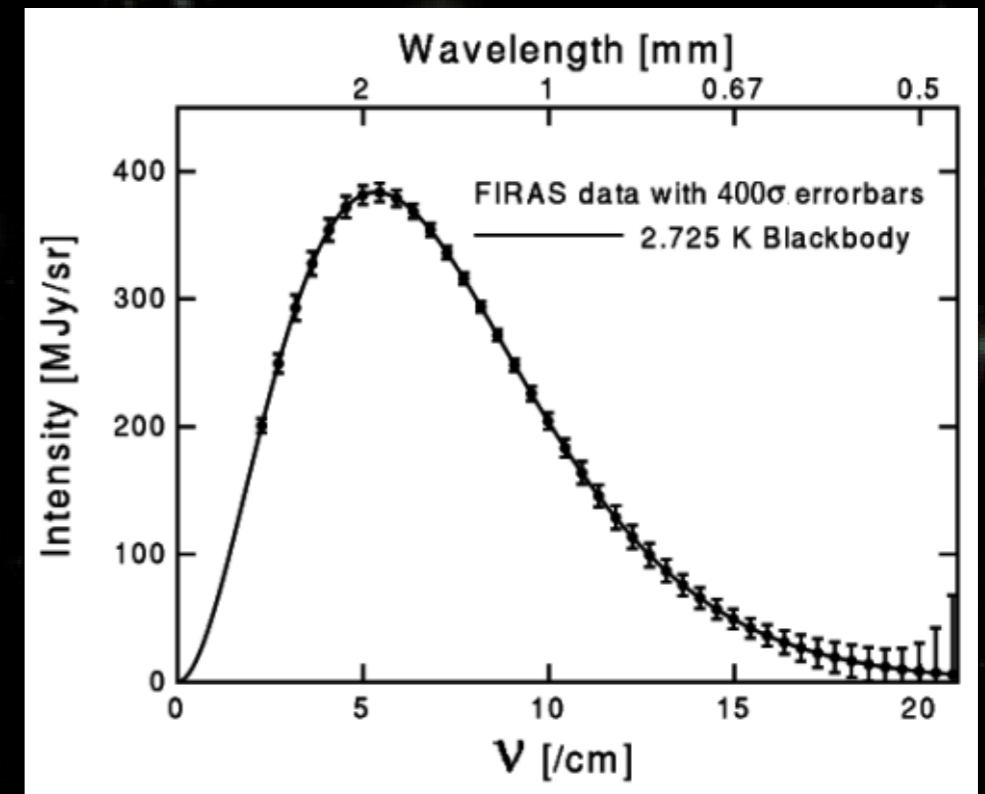


(COBE/DMR homepage)

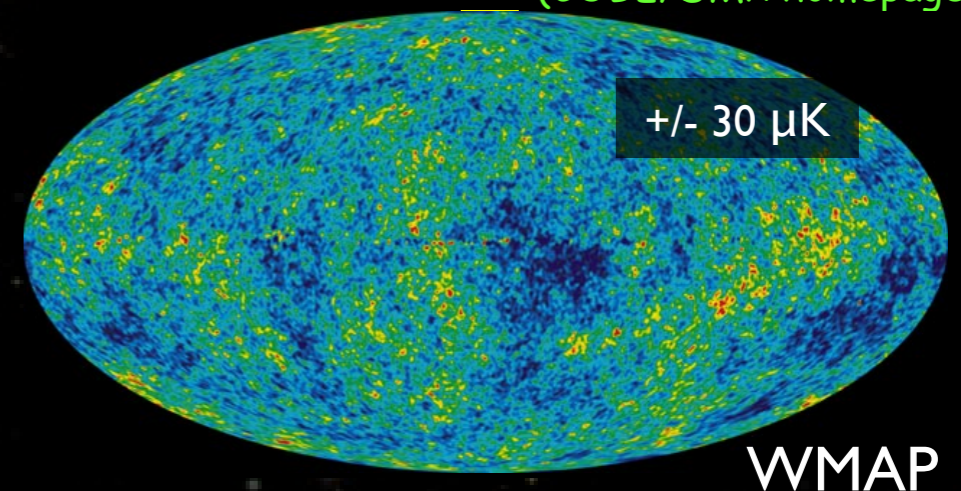


Le fond diffus cosmologique (CMB)

- Relique du découplage matière-rayonnement
 - ★ Prédit par G. Gamow (1948)
 - ★ Découvert par A. Penzias & R. Wilson (1965)
- Rayonnement isotrope
 - ★ “corps noir” parfait à 2.728K
 - ★ plutôt millimétrique que micro-onde
 - ★ 400 photons/cm³
 - ★ Devrait conserver la trace des fluctuations primordiales
- Prix Nobel :
 - ★ 1978 : Penzias & Wilson
 - ★ 2006 : Smoot & Mather : COBE



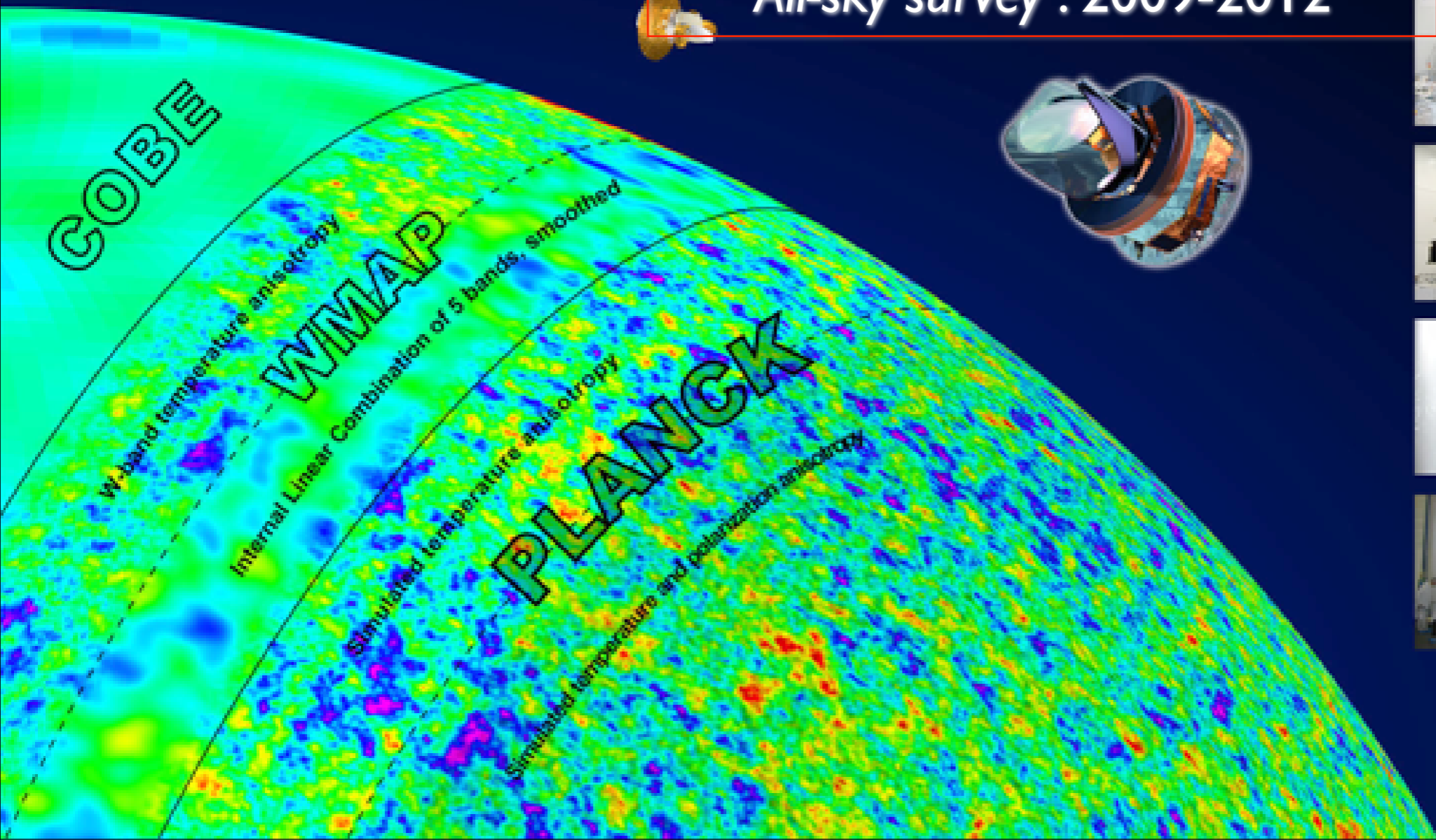
(COBE/DMR homepage)





PLANCK
SIMULATION

Lancé le 14 mai 2009
Température : 100 mK
1st light survey 13-26 août 2009
All-sky survey : 2009-2012



Relier les anisotropies du CMB aux fluctuations primordiales

- Développement en harmoniques sphériques

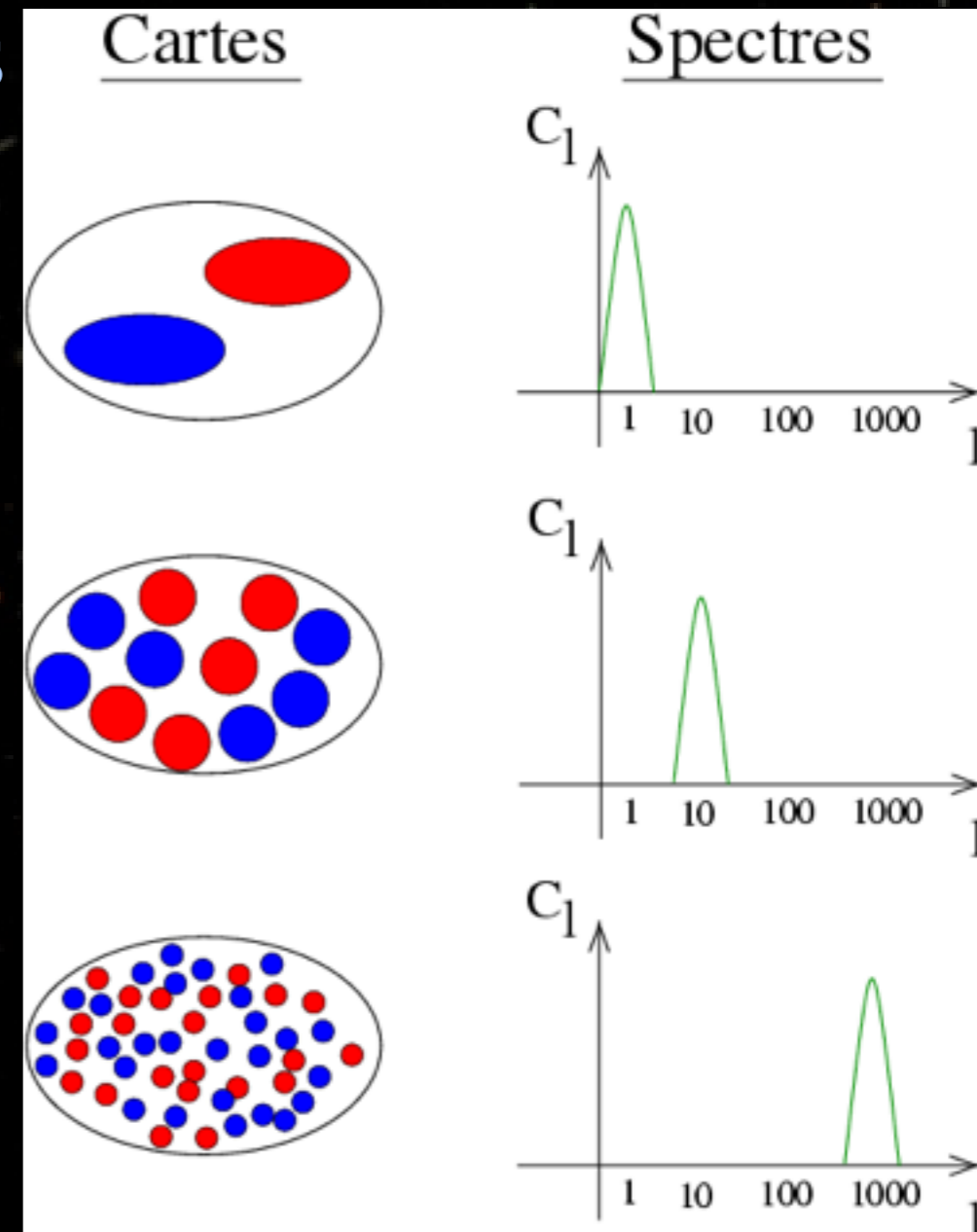
$$\frac{\Delta T}{T}(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi)$$

- Spectre de puissance angulaire

$$C_l = \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^l |a_{lm}|^2$$

- l est l'inverse d'un angle

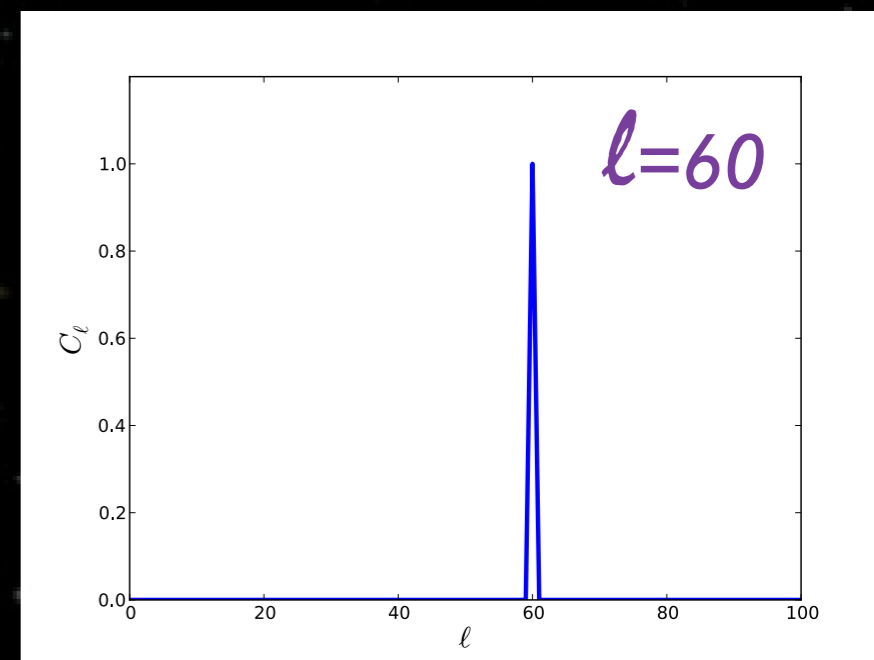
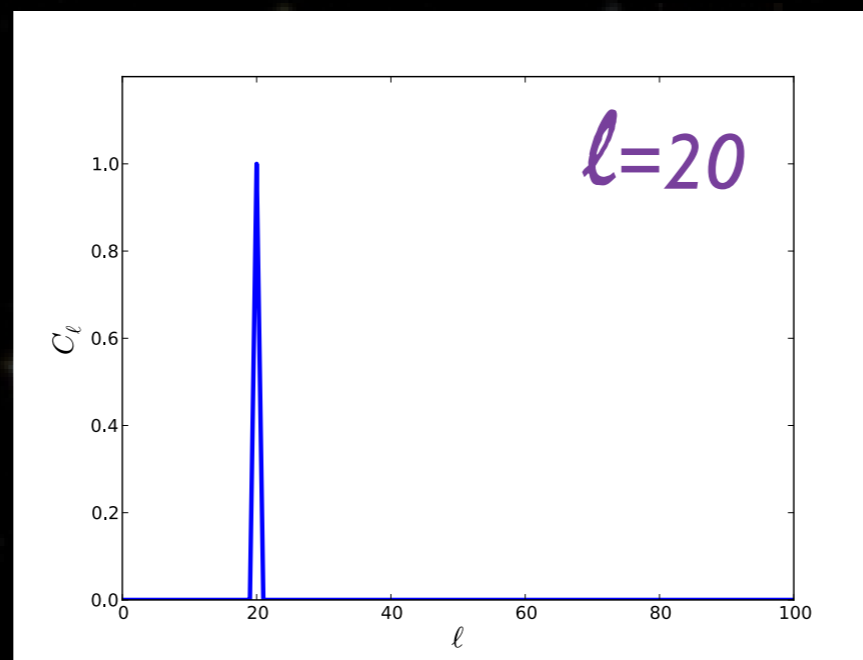
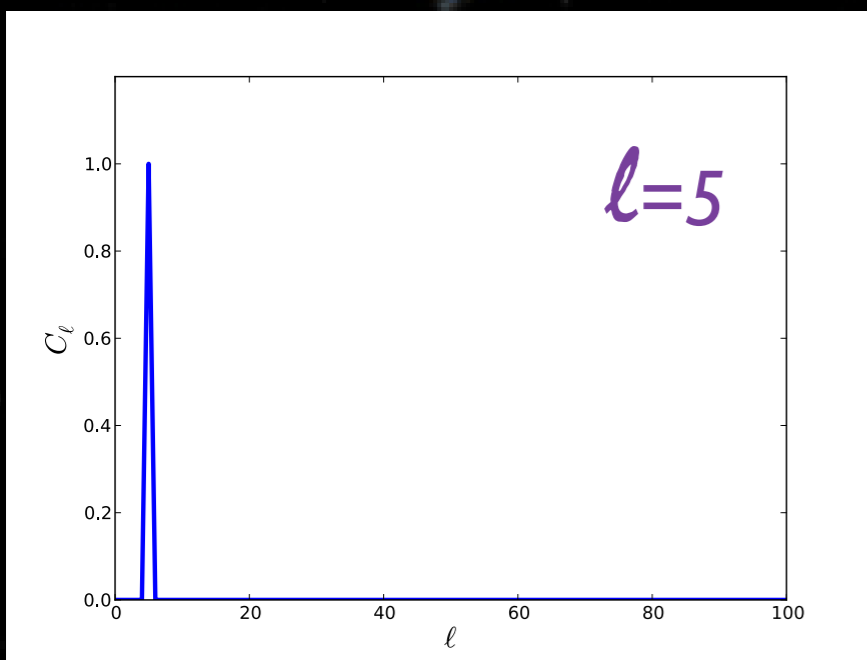
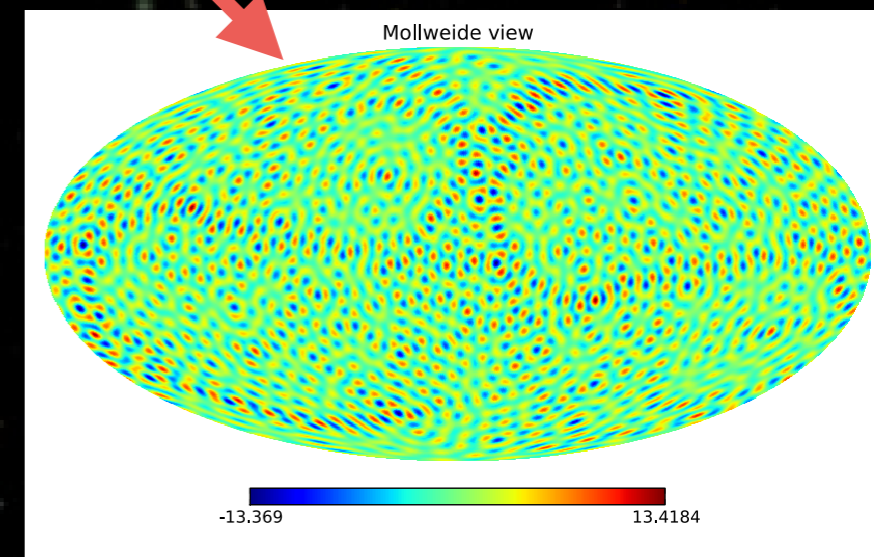
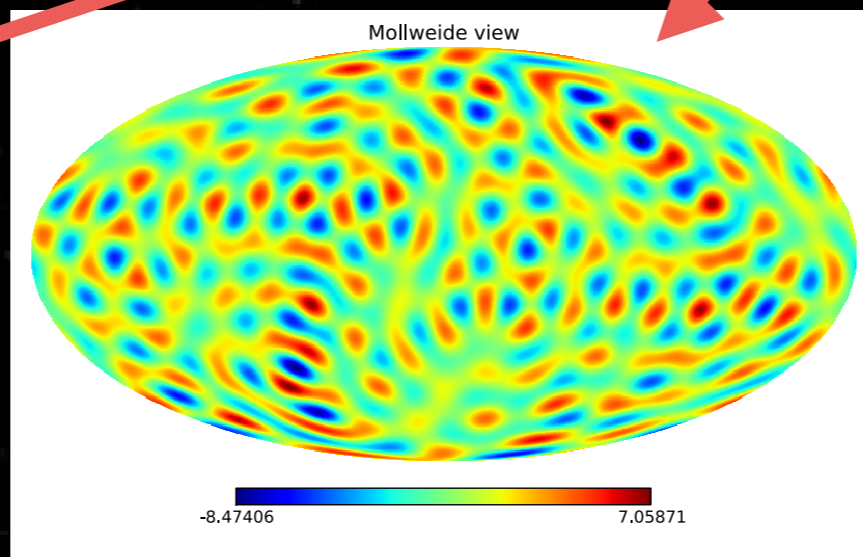
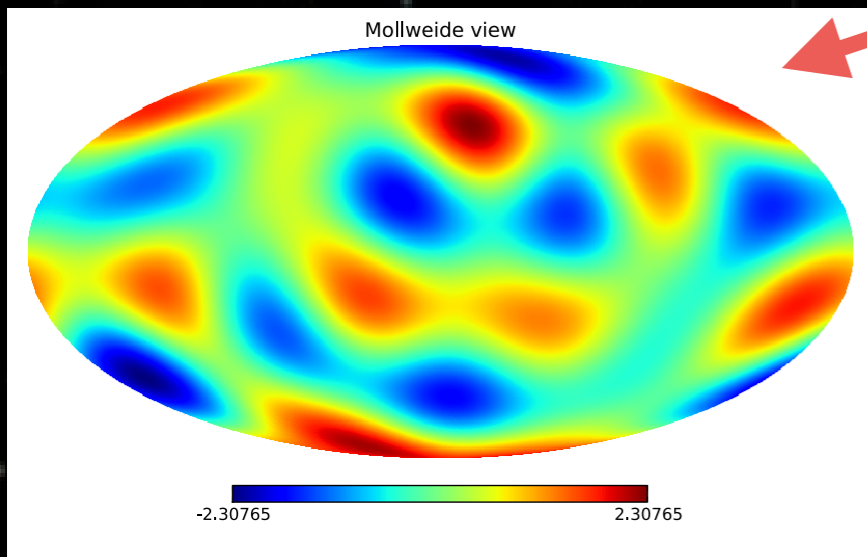
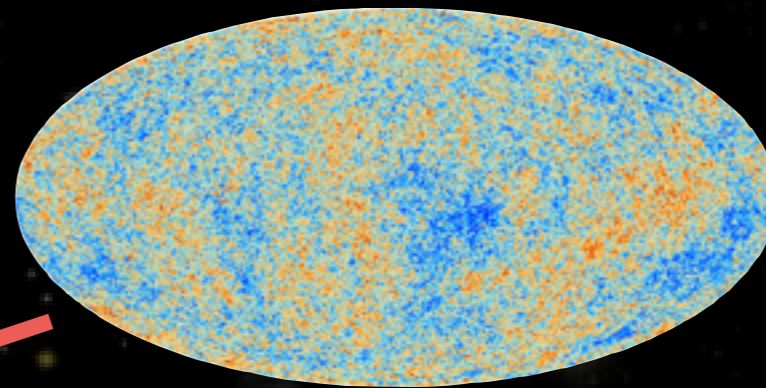
$$l = 200 \leftrightarrow \theta = 1\text{deg.}$$



B. Revenu



Le spectre de puissance C_ℓ

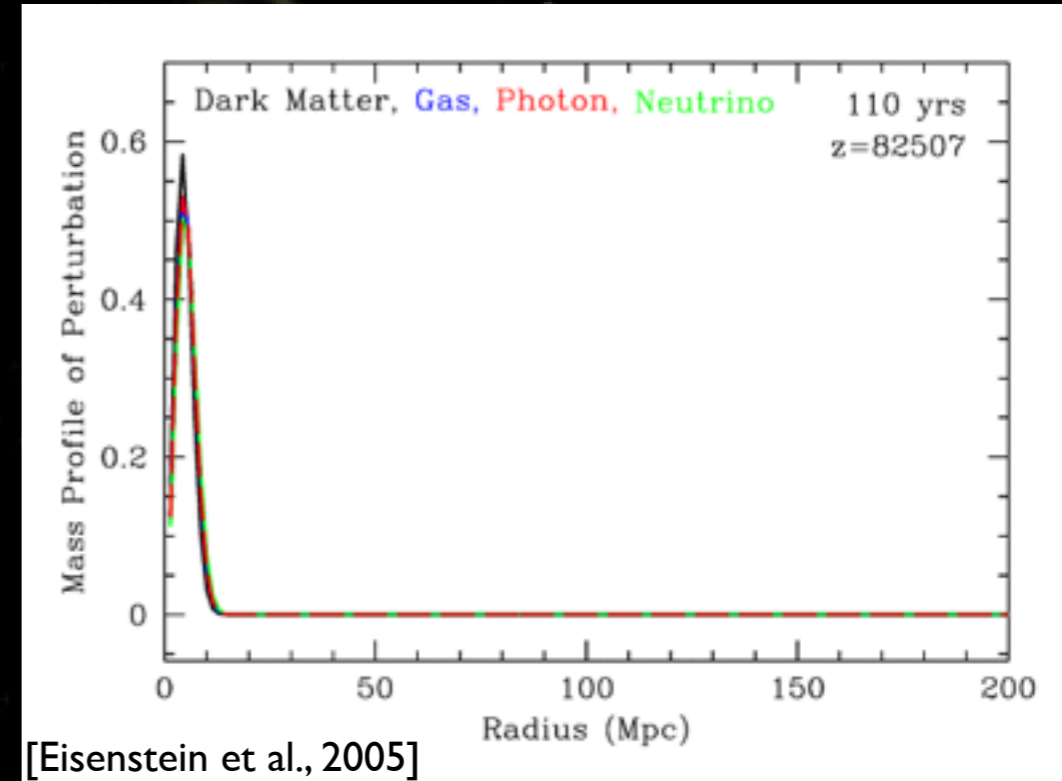


Amplitude des structures en fonction de leur taille angulaire



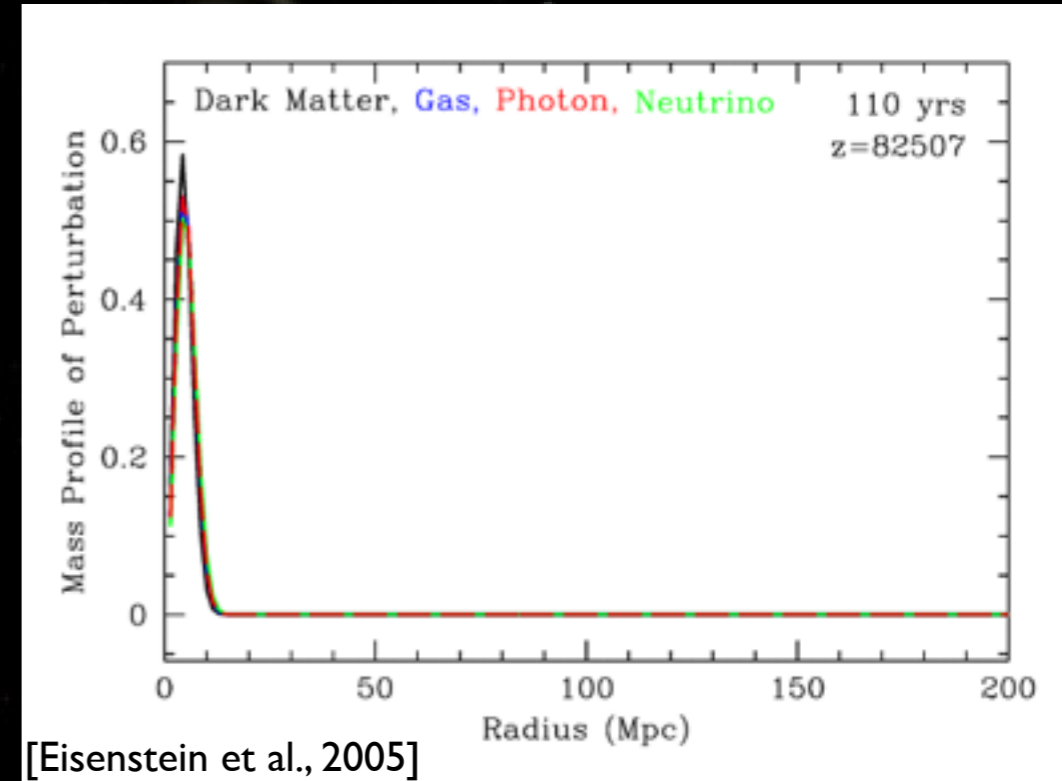
Oscillations acoustiques de baryons

- Univers jeune: ionisé
 - ★ Photons et baryons couplés
 - ★ Propagation d'ondes de pression
- Découplage matière-rayonnement:
Univers neutre
 - ★ Les photons s'échappent (CMB)
 - ★ Baryons: excès à l'horizon sonore (150 Mpc)
 - ★ Matière noire restée au centre
 - ★ Un excès demeure à 150 Mpc



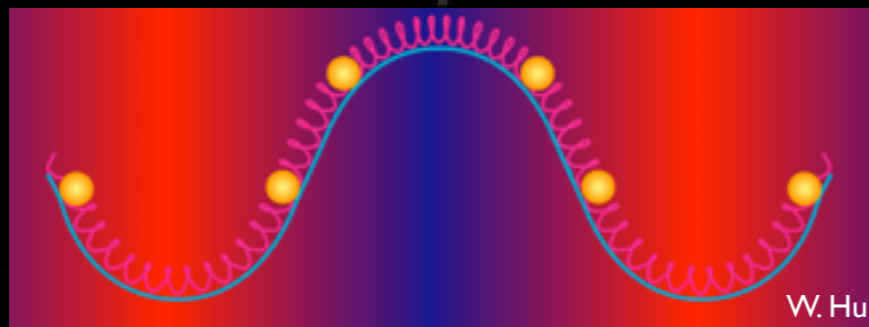
Oscillations acoustiques de baryons

- Univers jeune: ionisé
 - ★ Photons et baryons couplés
 - ★ Propagation d'ondes de pression
- Découplage matière-rayonnement:
Univers neutre
 - ★ Les photons s'échappent (CMB)
 - ★ Baryons: excès à l'horizon sonore (150 Mpc)
 - ★ Matière noire restée au centre
 - ★ Un excès demeure à 150 Mpc

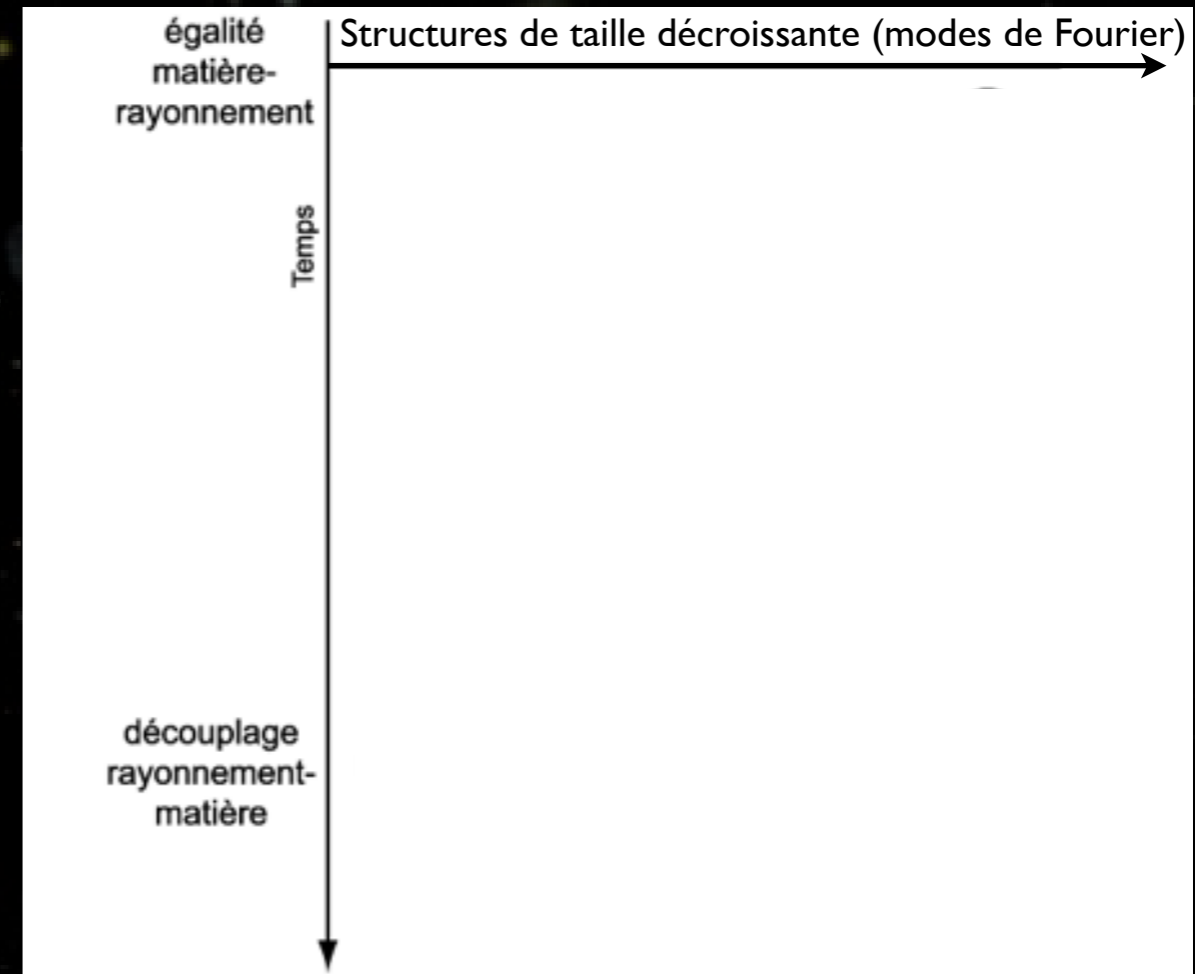


Forme du spectre de puissance

- ★ *L'univers primordial est un fluide couplé photons-matière dominé par le rayonnement*
→ Pas d'effondrement de matière
- ★ *La matière commence à s'effondrer à l'égalité matière-rayonnement*
- ★ *Des ondes acoustiques dues à la pression de radiation se propagent à la vitesse du son ($c/\sqrt{3}$)*

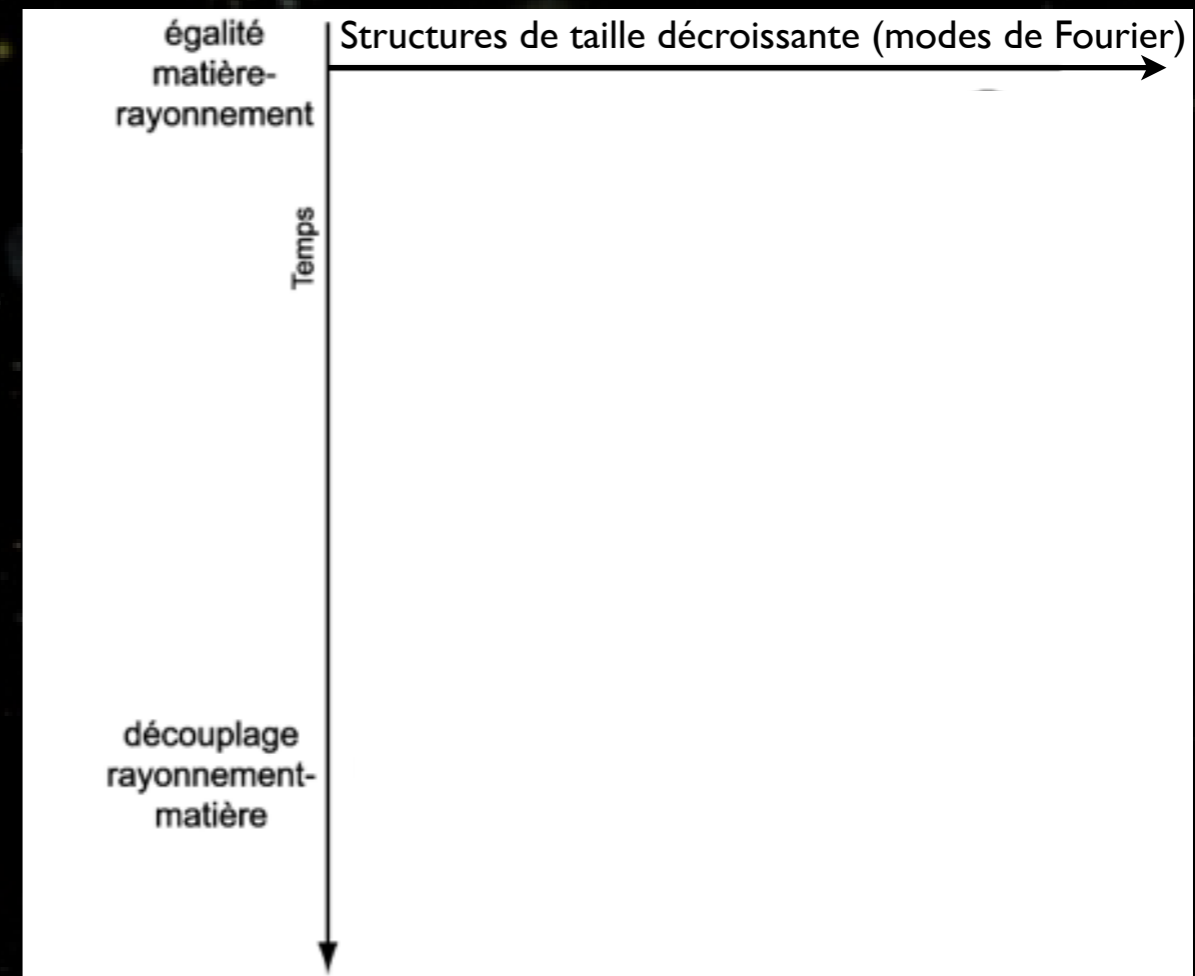


- ★ *les oscillations sont gelées au moment du découplage matière-rayonnement*



Forme du spectre de puissance

- ★ *L'univers primordial est un fluide couplé photons-matière dominé par le rayonnement*
→ Pas d'effondrement de matière
- ★ *La matière commence à s'effondrer à l'égalité matière-rayonnement*
- ★ *Des ondes acoustiques dues à la pression de radiation se propagent à la vitesse du son ($c/\sqrt{3}$)*



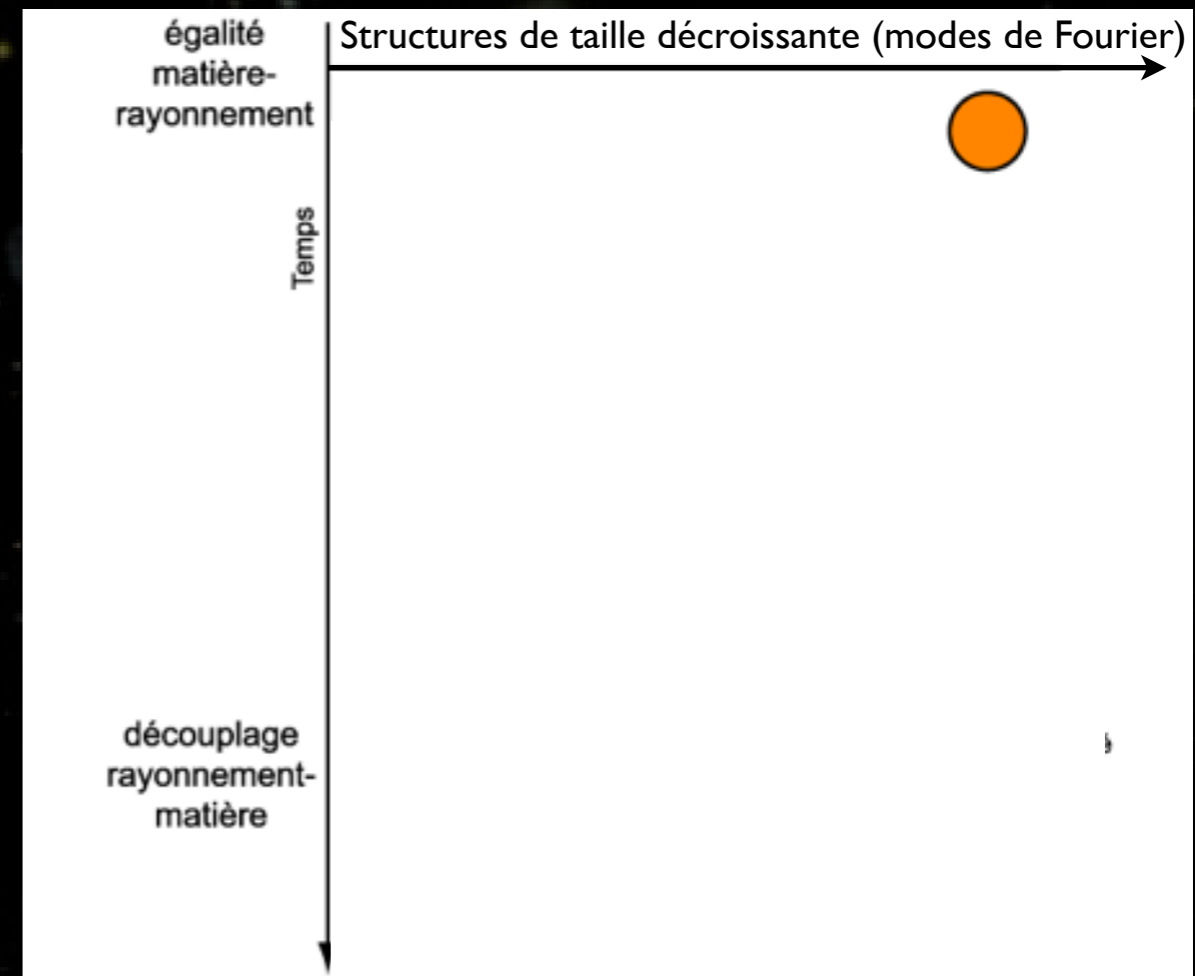
W. Hu

- ★ *les oscillations sont gelées au moment du découplage matière-rayonnement*



Forme du spectre de puissance

- ★ *L'univers primordial est un fluide couplé photons-matière dominé par le rayonnement*
→ Pas d'effondrement de matière
- ★ *La matière commence à s'effondrer à l'égalité matière-rayonnement*
- ★ *Des ondes acoustiques dues à la pression de radiation se propagent à la vitesse du son ($c/\sqrt{3}$)*



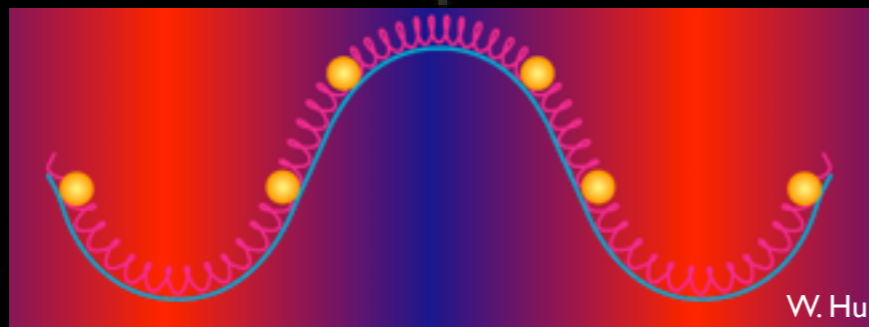
W. Hu

- ★ *les oscillations sont gelées au moment du découplage matière-rayonnement*

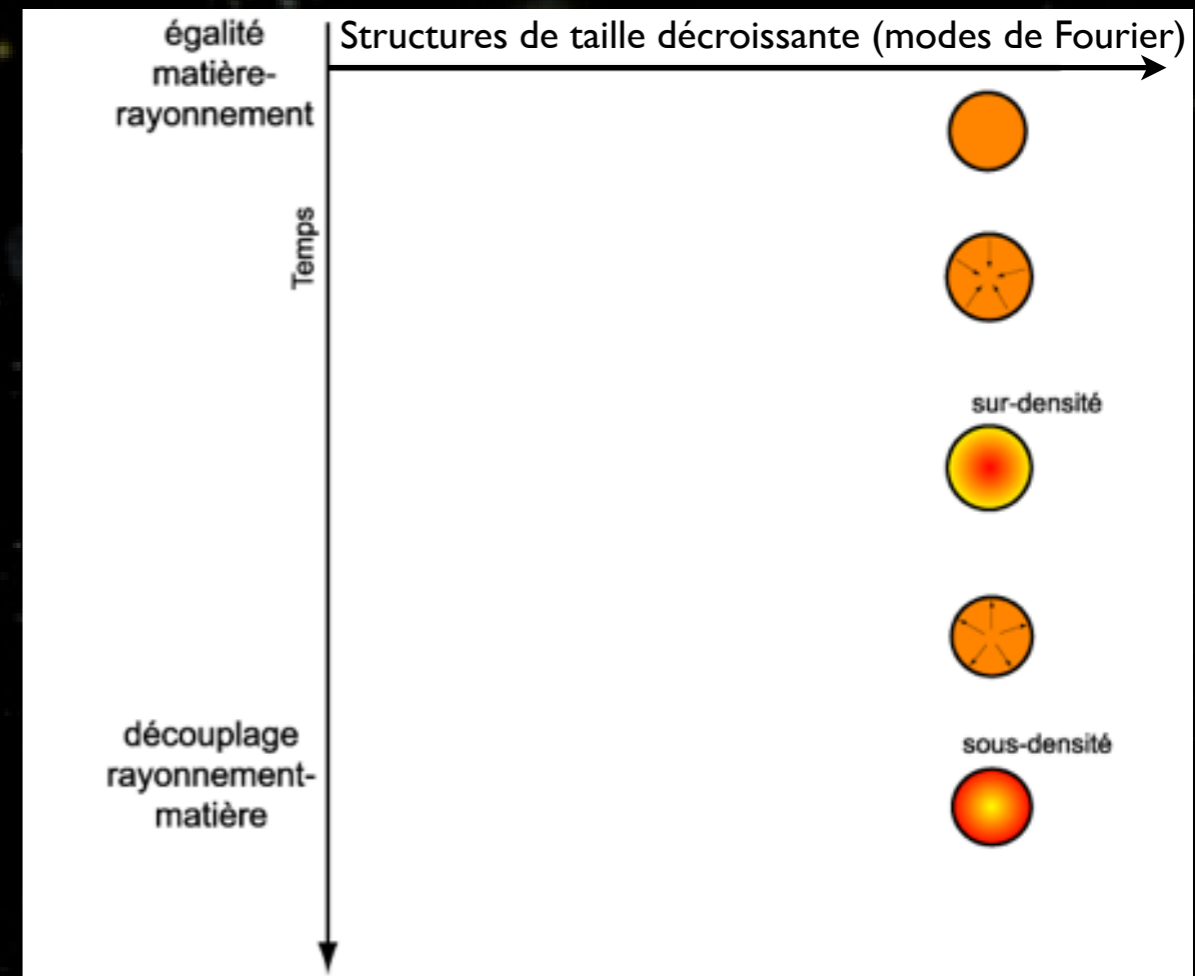


Forme du spectre de puissance

- ★ *L'univers primordial est un fluide couplé photons-matière dominé par le rayonnement*
→ Pas d'effondrement de matière
- ★ *La matière commence à s'effondrer à l'égalité matière-rayonnement*
- ★ *Des ondes acoustiques dues à la pression de radiation se propagent à la vitesse du son ($c/\sqrt{3}$)*

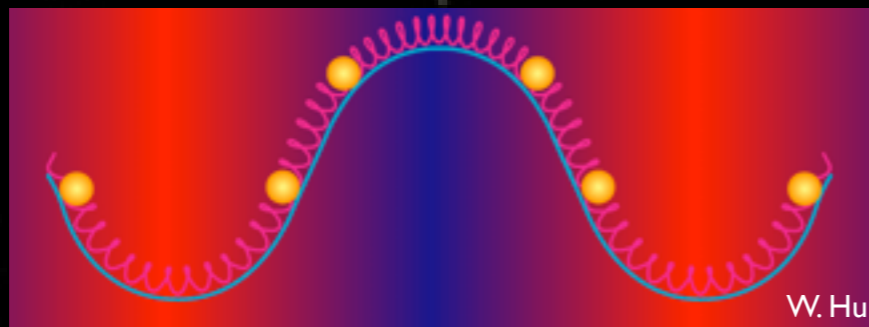


- ★ *les oscillations sont gelées au moment du découplage matière-rayonnement*

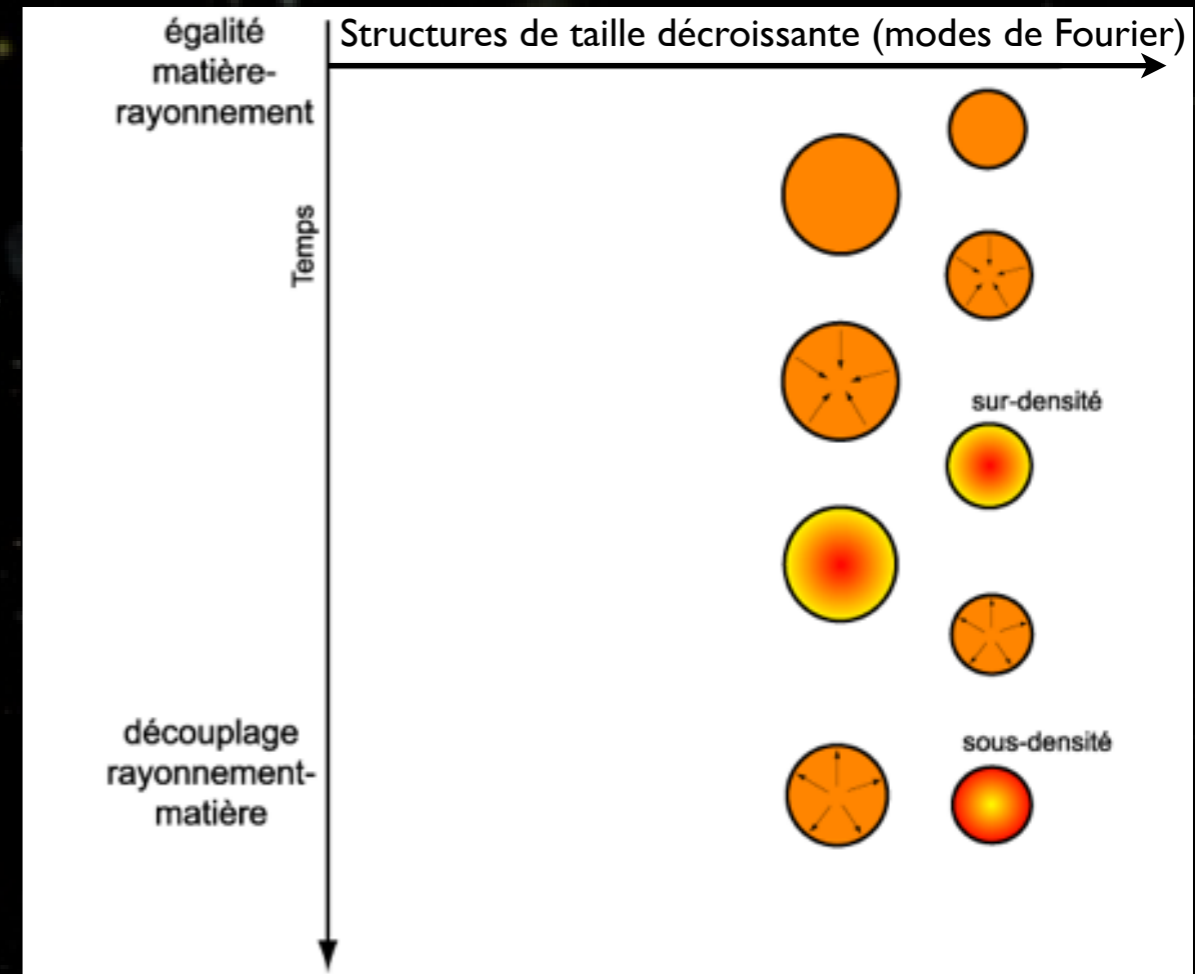


Forme du spectre de puissance

- ★ *L'univers primordial est un fluide couplé photons-matière dominé par le rayonnement*
→ Pas d'effondrement de matière
- ★ *La matière commence à s'effondrer à l'égalité matière-rayonnement*
- ★ *Des ondes acoustiques dues à la pression de radiation se propagent à la vitesse du son ($c/\sqrt{3}$)*

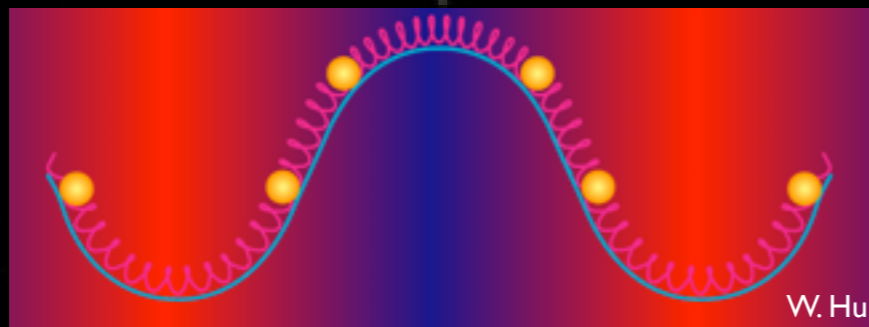


- ★ *les oscillations sont gelées au moment du découplage matière-rayonnement*

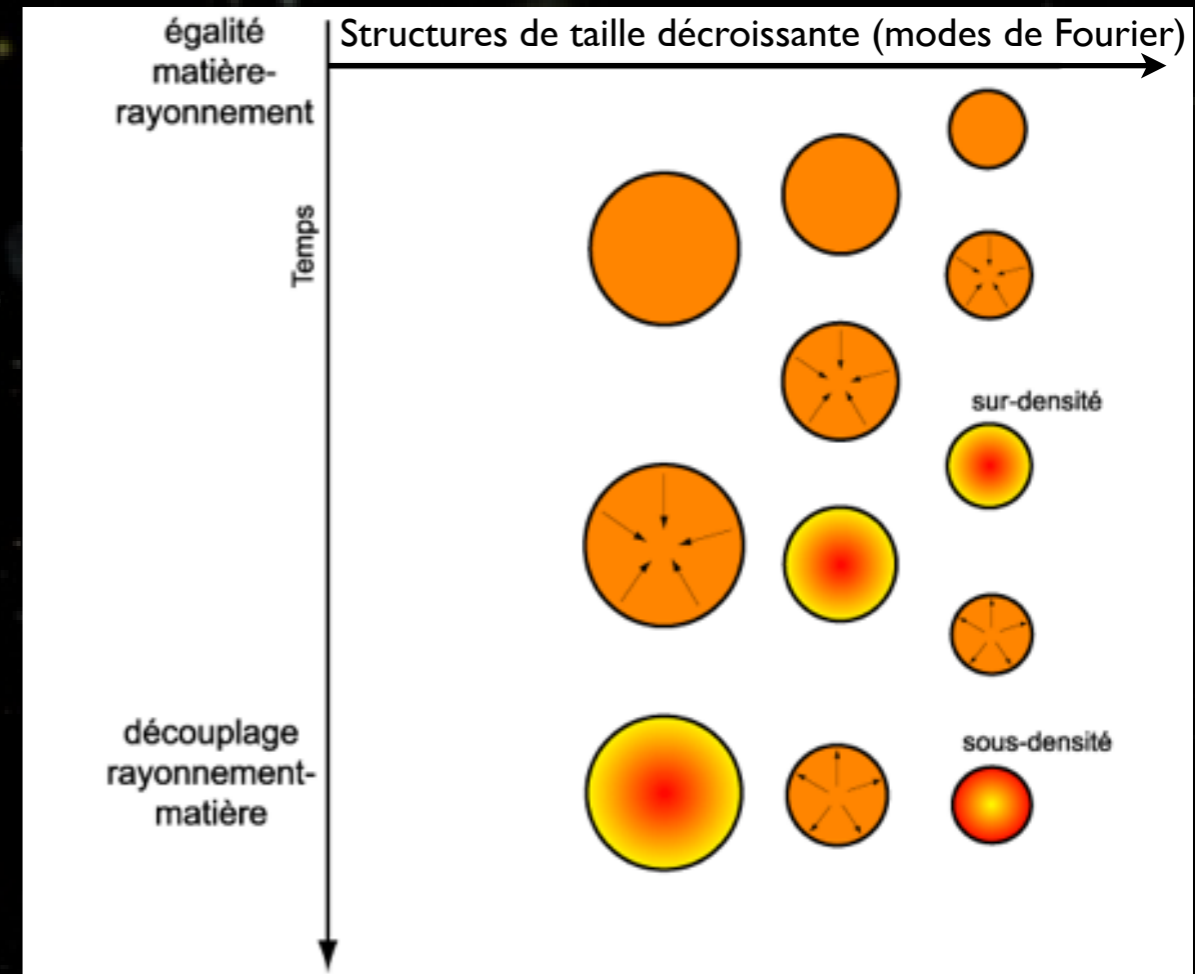


Forme du spectre de puissance

- ★ *L'univers primordial est un fluide couplé photons-matière dominé par le rayonnement*
→ Pas d'effondrement de matière
- ★ *La matière commence à s'effondrer à l'égalité matière-rayonnement*
- ★ *Des ondes acoustiques dues à la pression de radiation se propagent à la vitesse du son ($c/\sqrt{3}$)*

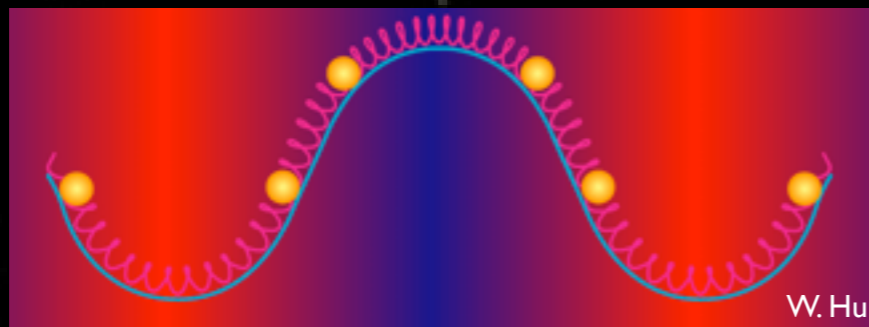


- ★ *les oscillations sont gelées au moment du découplage matière-rayonnement*

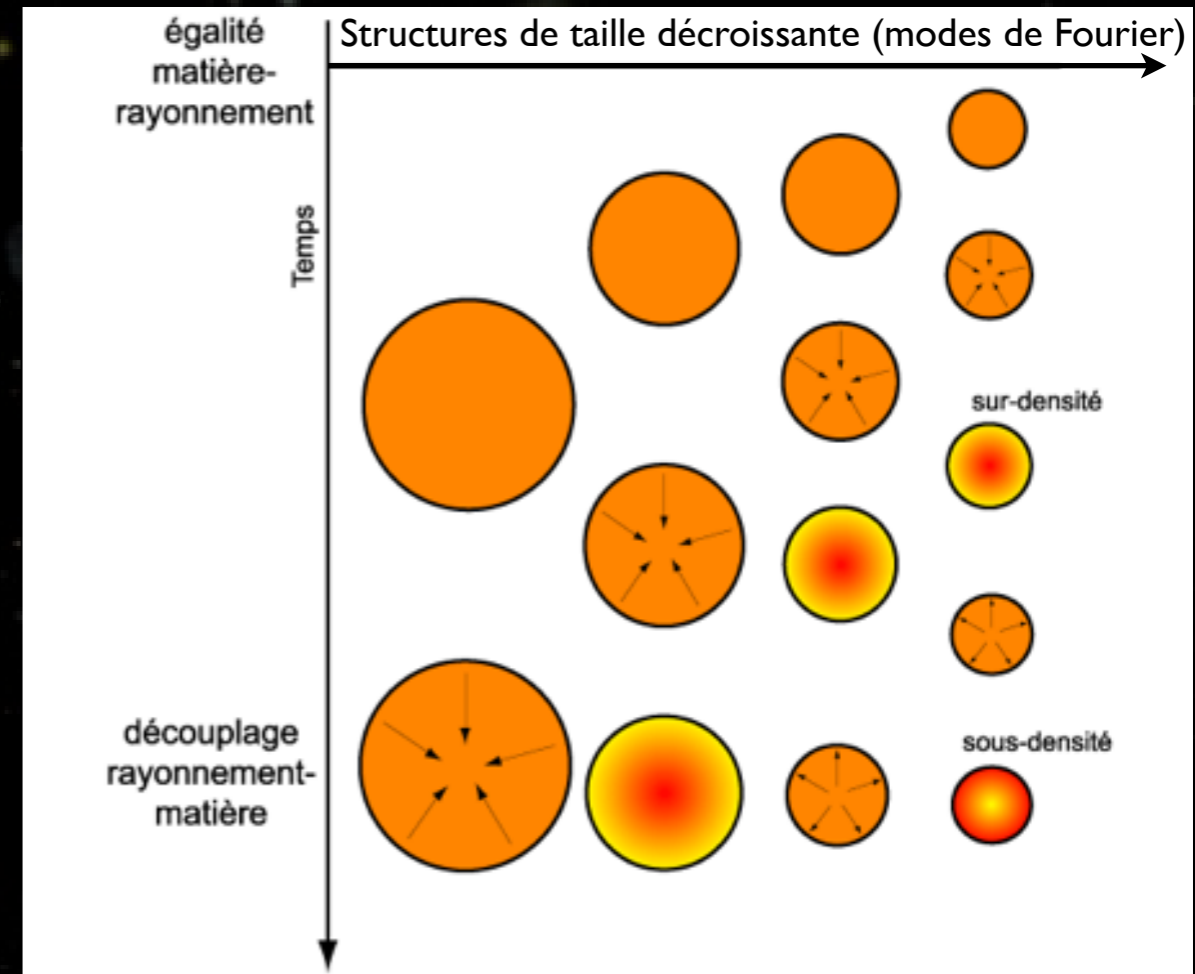


Forme du spectre de puissance

- ★ *L'univers primordial est un fluide couplé photons-matière dominé par le rayonnement*
→ Pas d'effondrement de matière
- ★ *La matière commence à s'effondrer à l'égalité matière-rayonnement*
- ★ *Des ondes acoustiques dues à la pression de radiation se propagent à la vitesse du son ($c/\sqrt{3}$)*

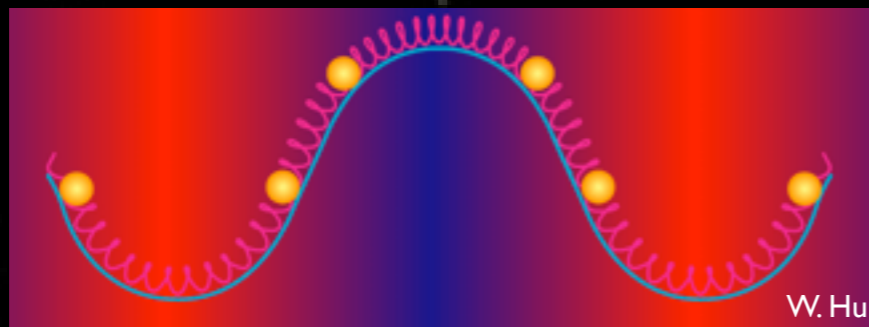


- ★ *les oscillations sont gelées au moment du découplage matière-rayonnement*

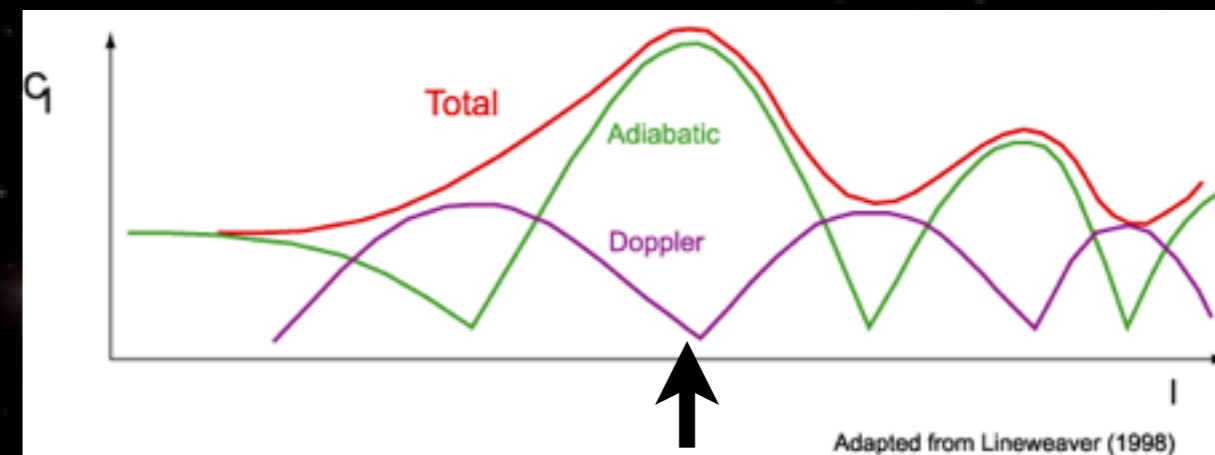
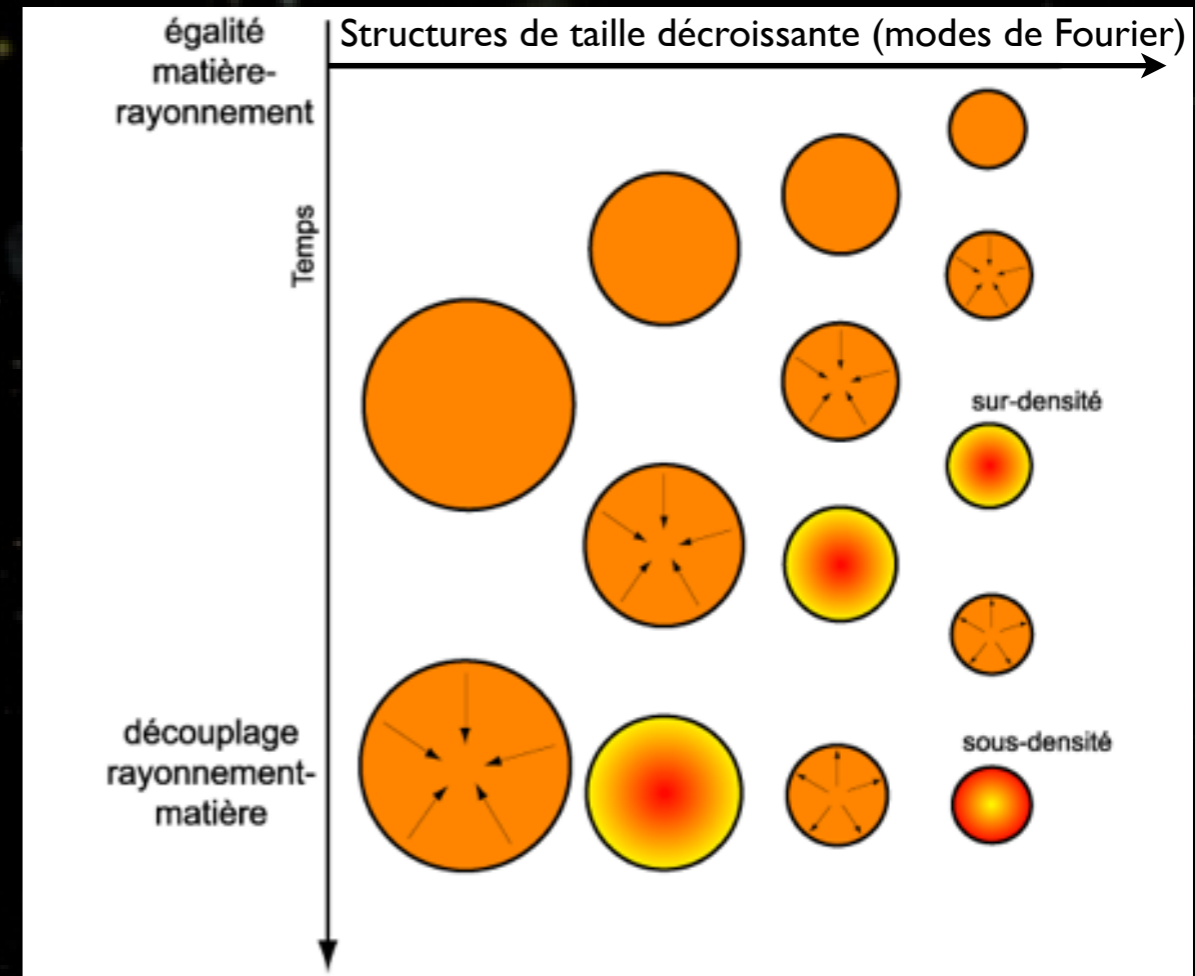


Forme du spectre de puissance

- ★ *L'univers primordial est un fluide couplé photons-matière dominé par le rayonnement*
 → Pas d'effondrement de matière
- ★ *La matière commence à s'effondrer à l'égalité matière-rayonnement*
- ★ *Des ondes acoustiques dues à la pression de radiation se propagent à la vitesse du son ($c/\sqrt{3}$)*



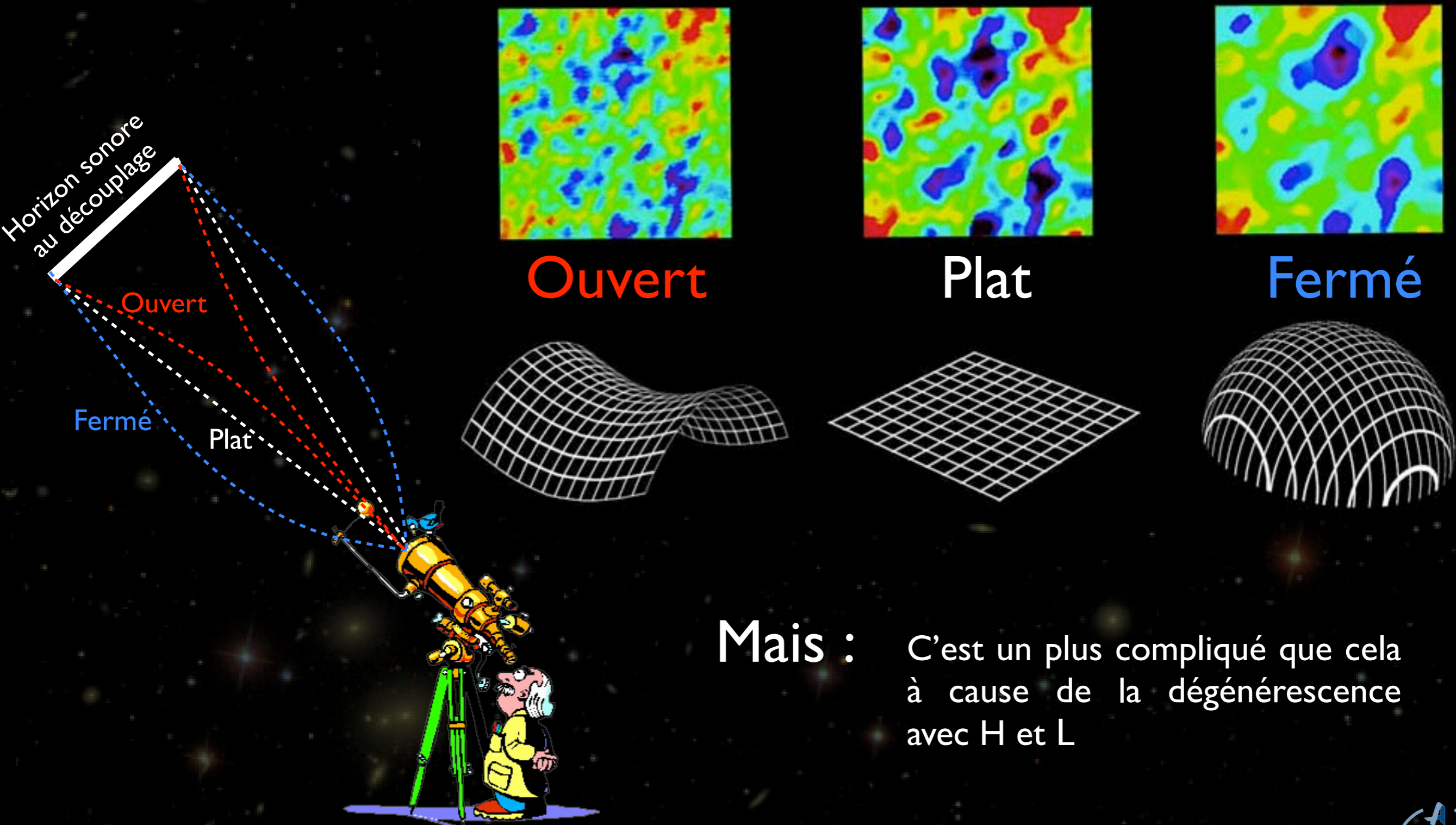
- ★ *les oscillations sont gelées au moment du découplage matière-rayonnement*



150 Mpc à $z=1000$



Influence de la géométrie de l'Univers

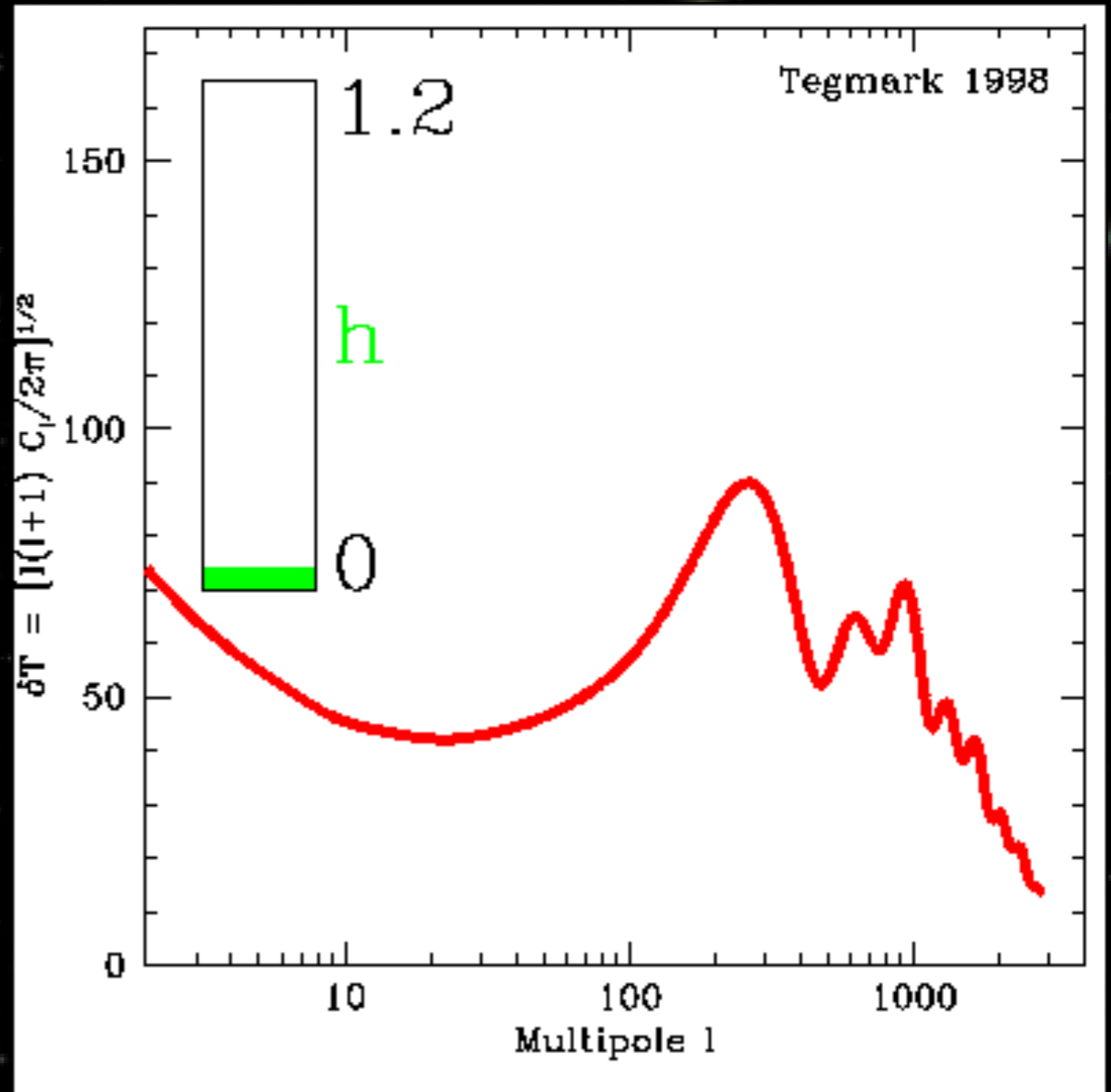
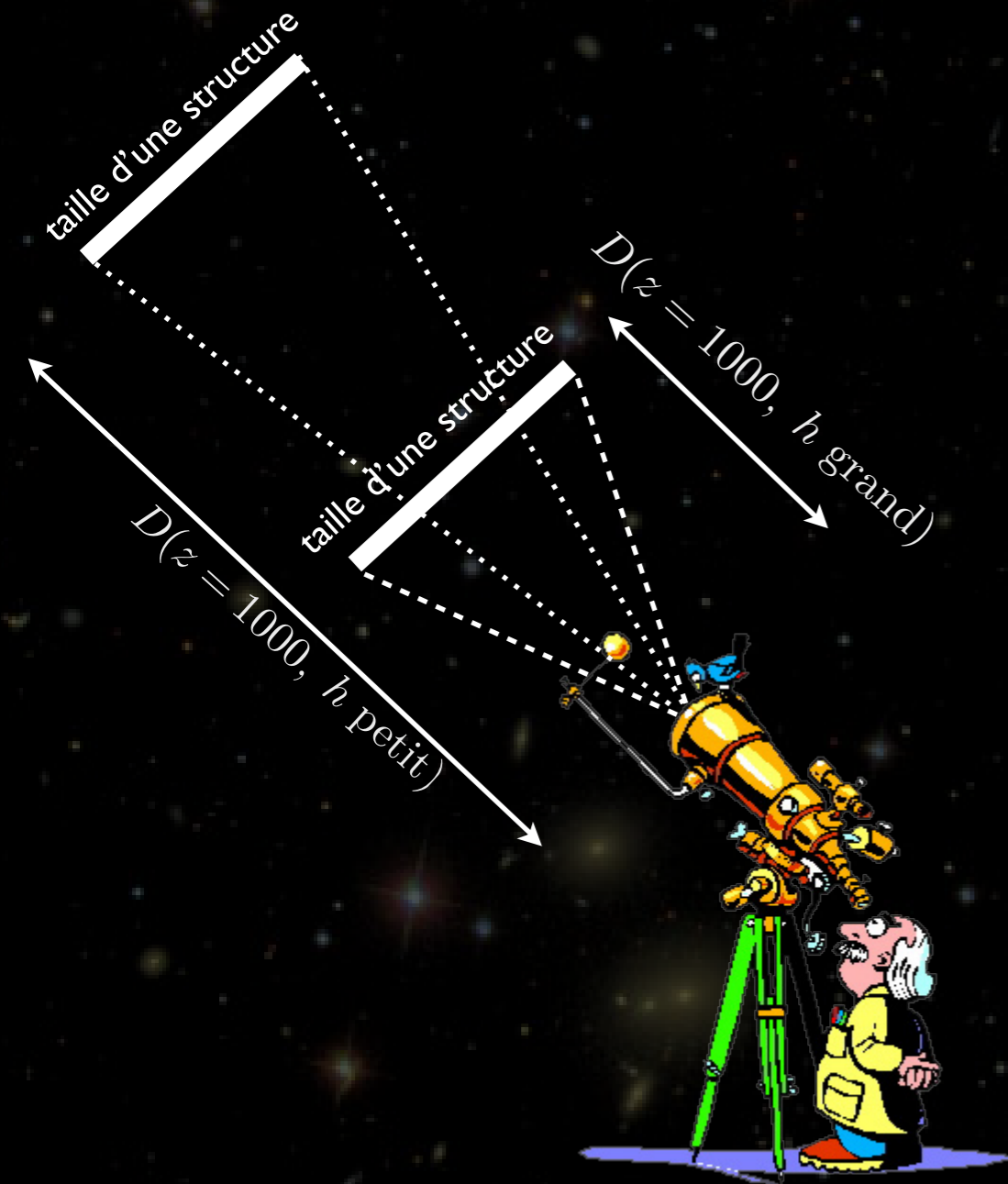


Mais : C'est un peu plus compliqué que cela à cause de la dégénérescence avec H et L



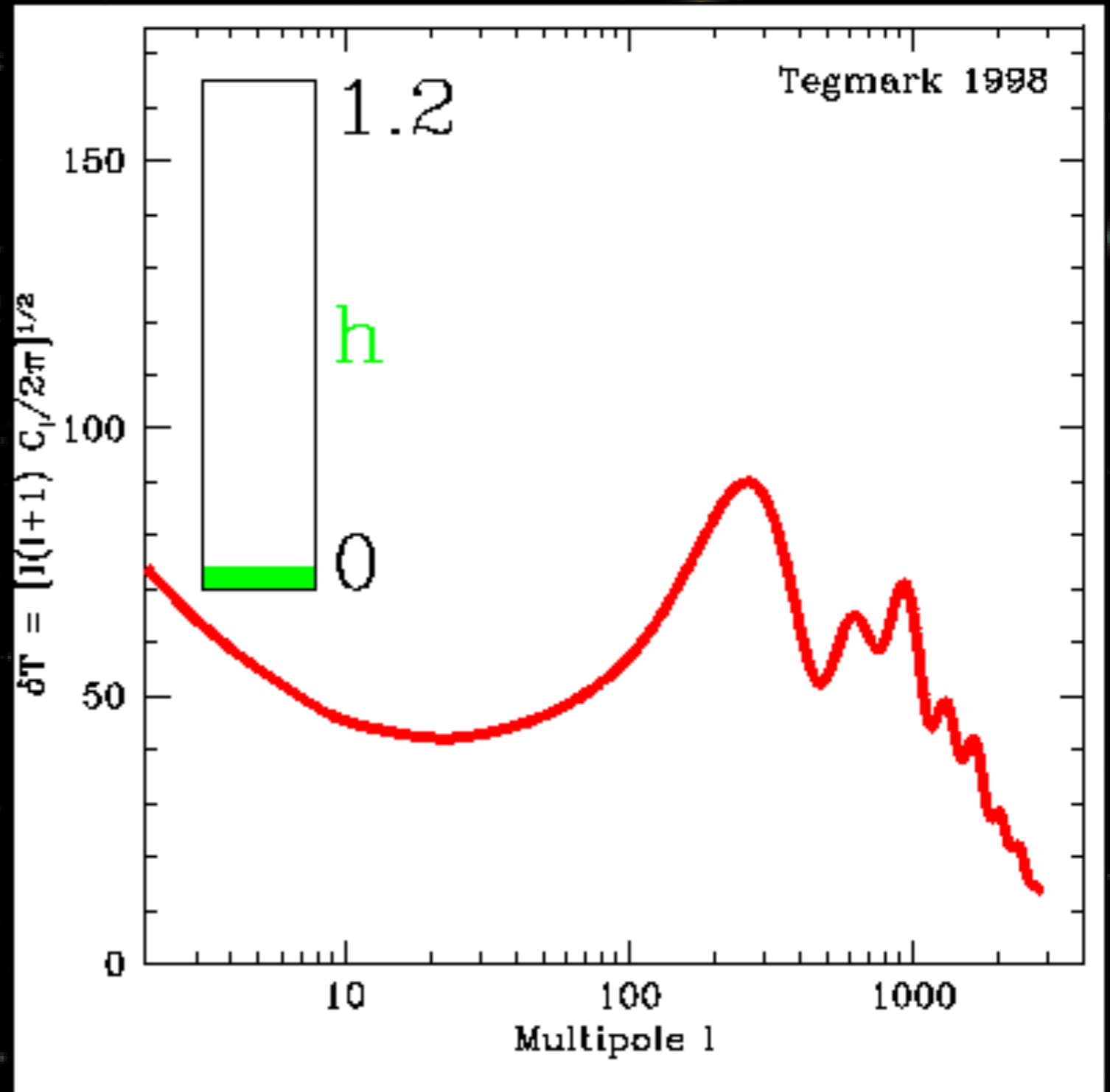
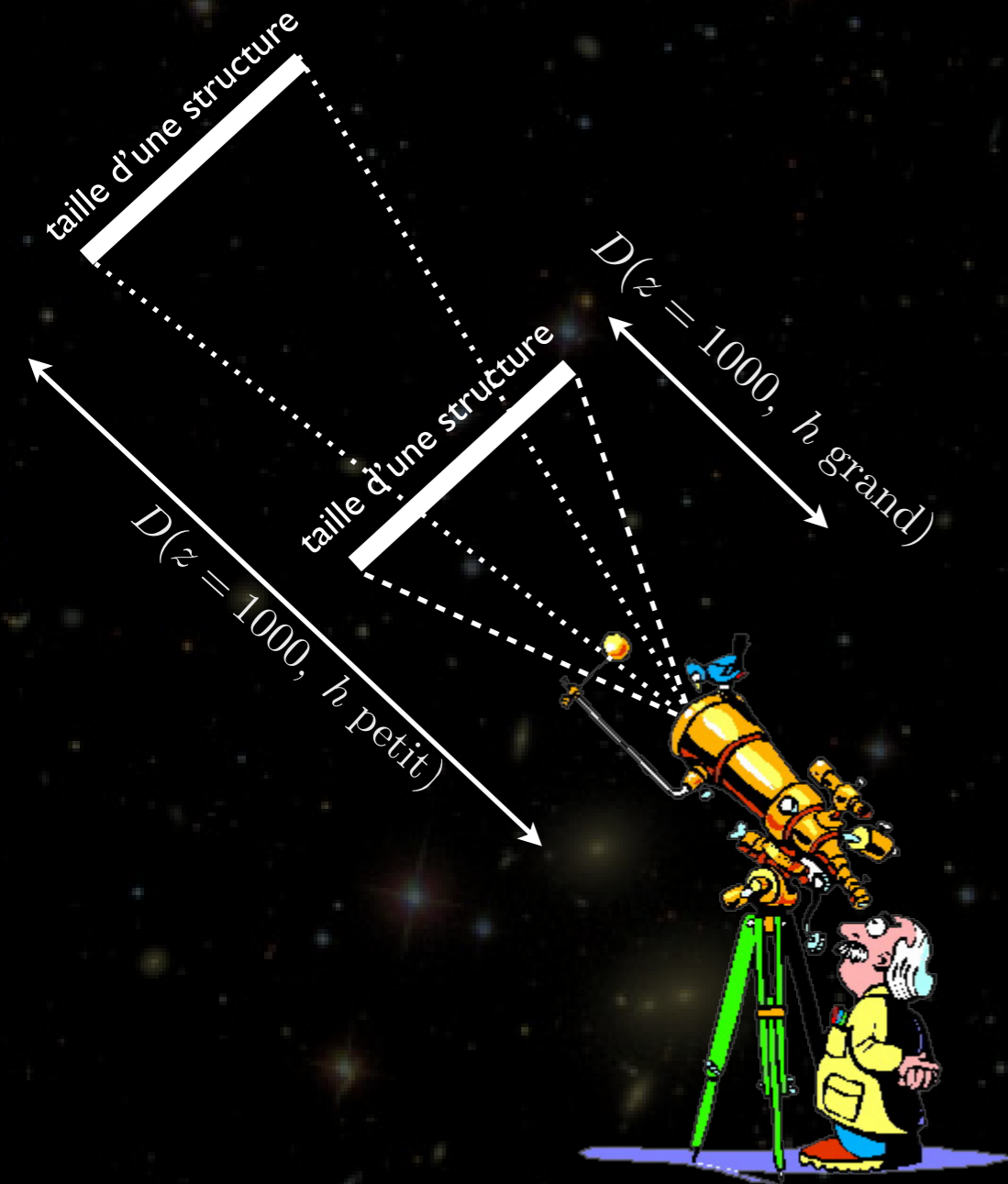
Constante de Hubble

$$D \propto \int \frac{dz}{H(z)}$$



Constante de Hubble

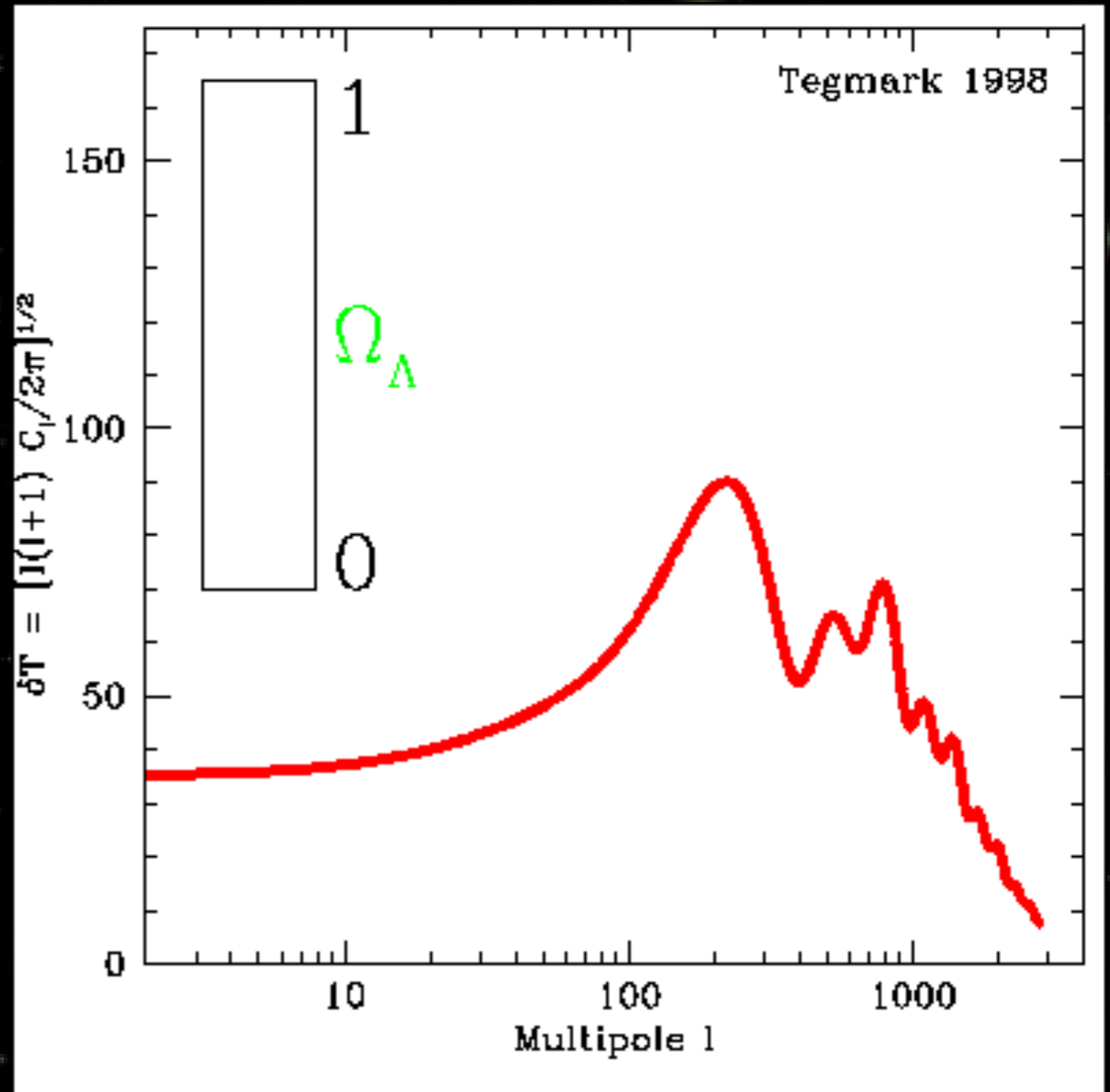
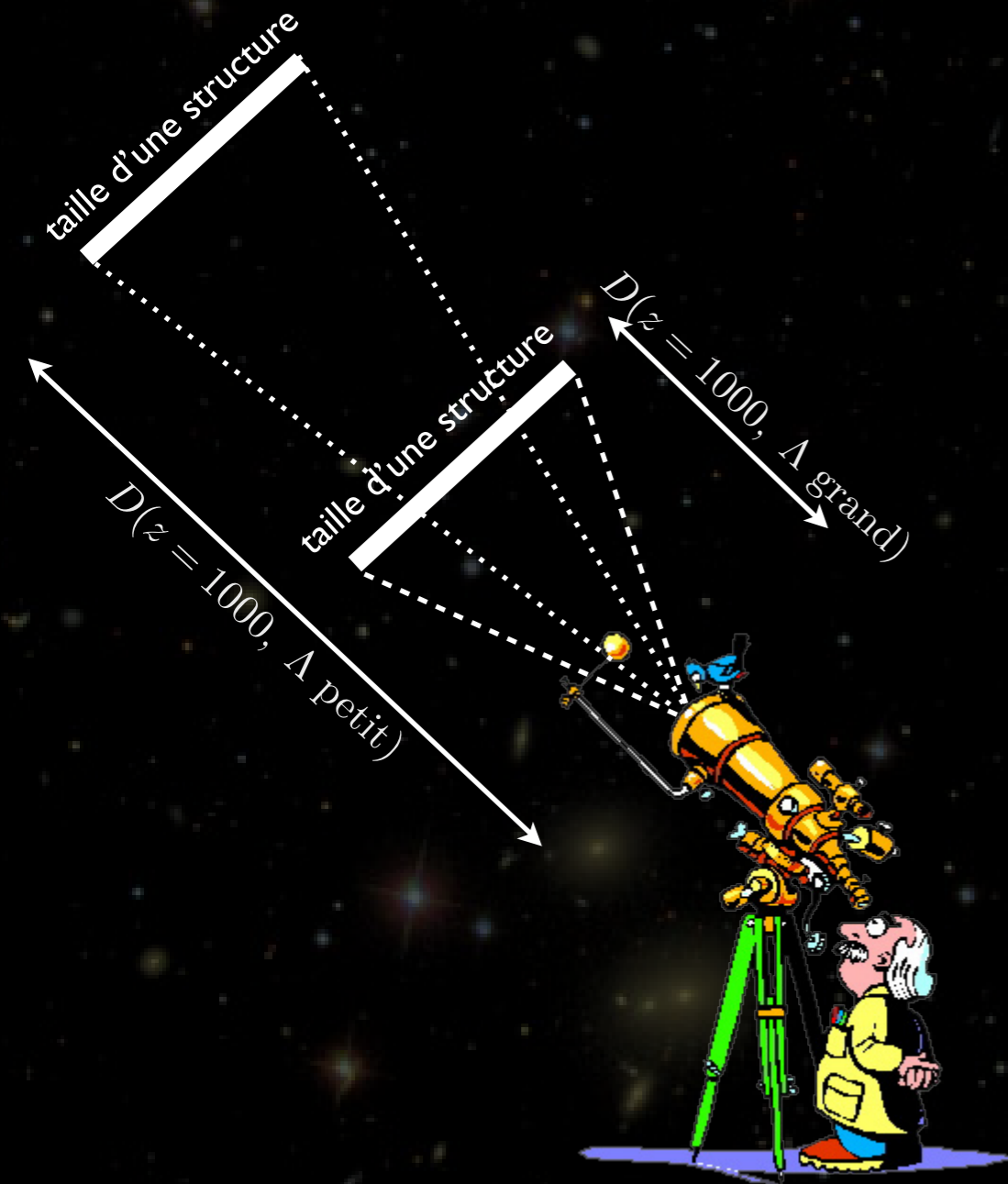
$$D \propto \int \frac{dz}{H(z)}$$



Énergie sombre

$$D \propto \int \frac{dz}{H(z)}$$

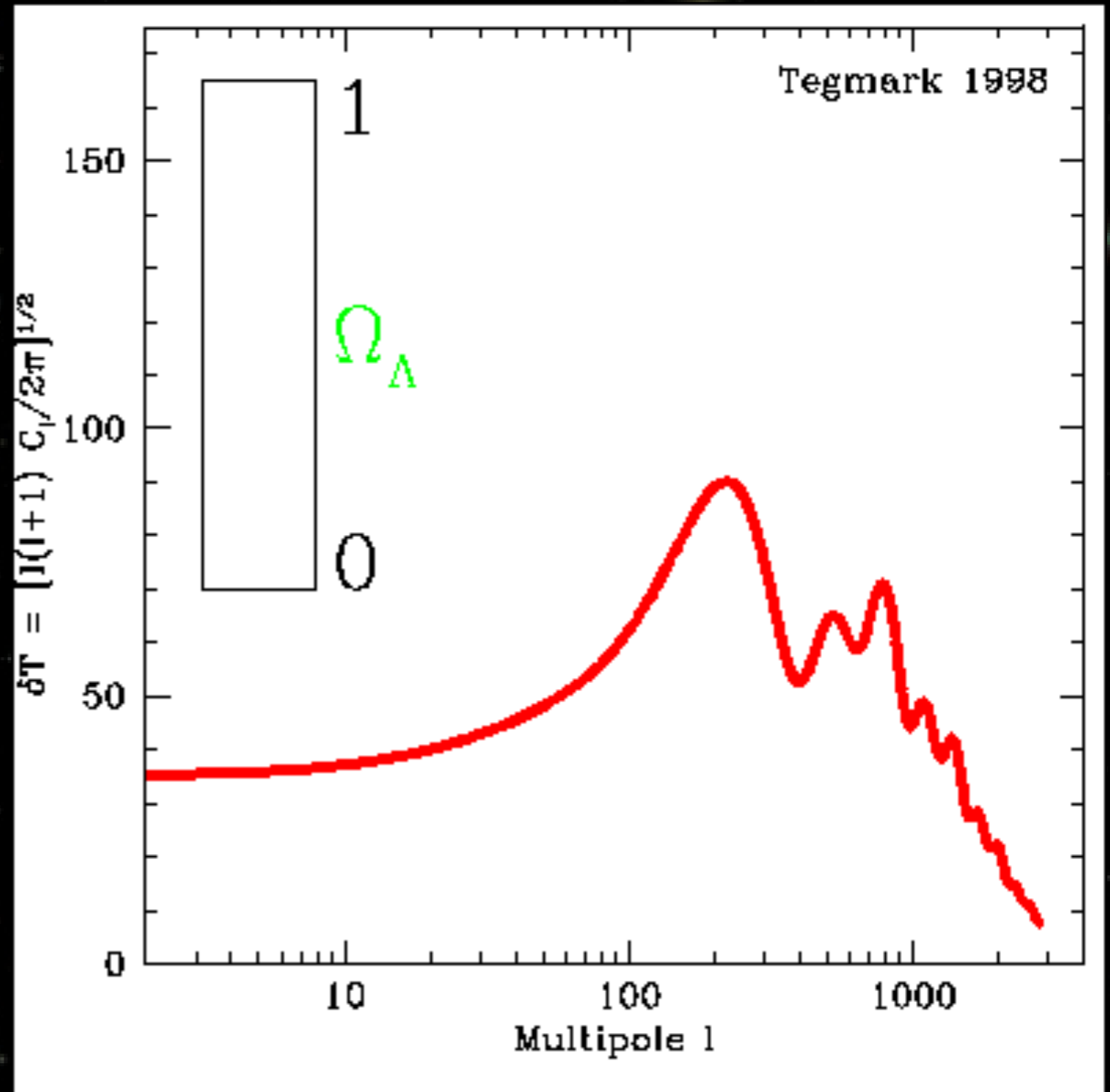
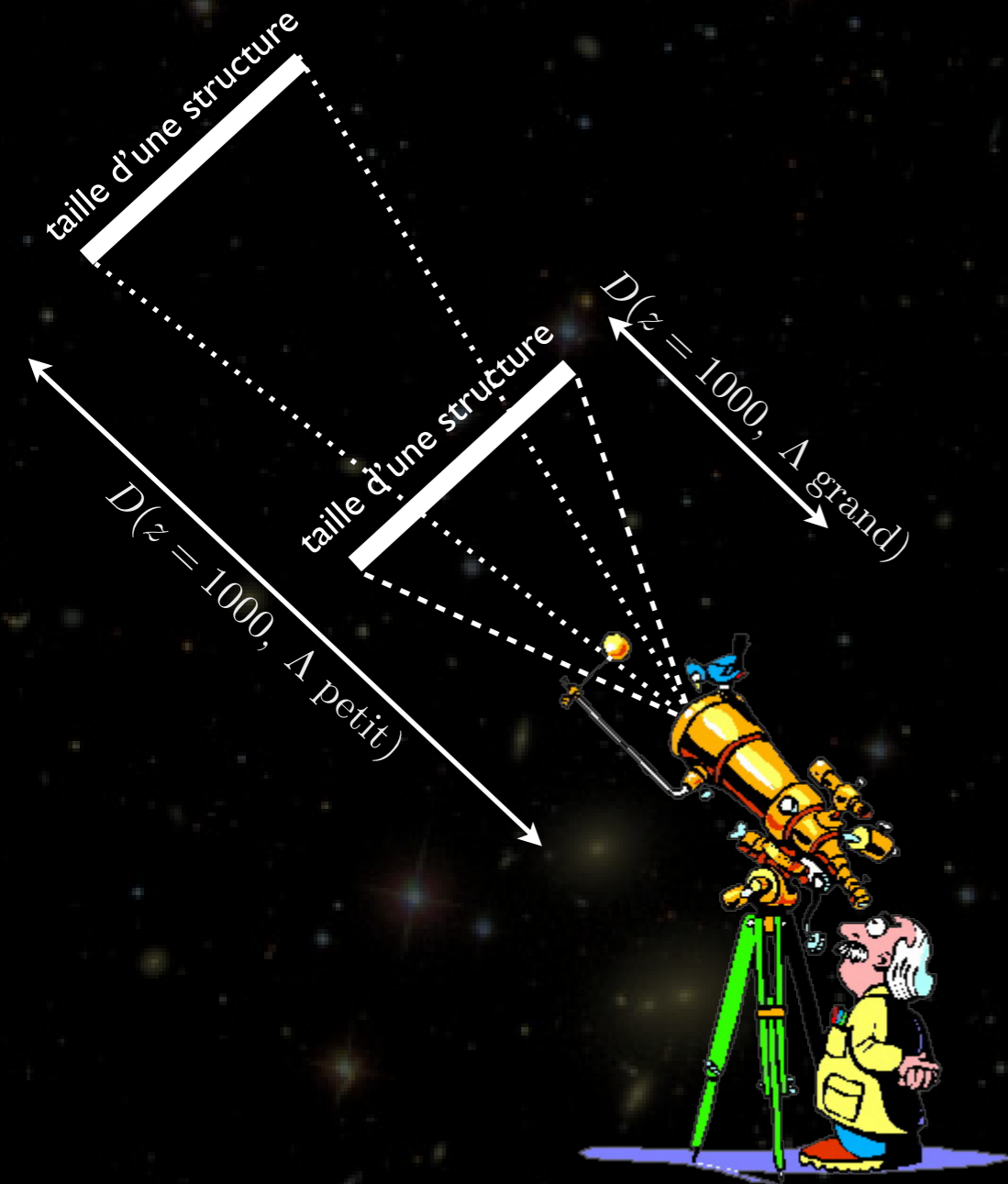
L accélère l'expansion



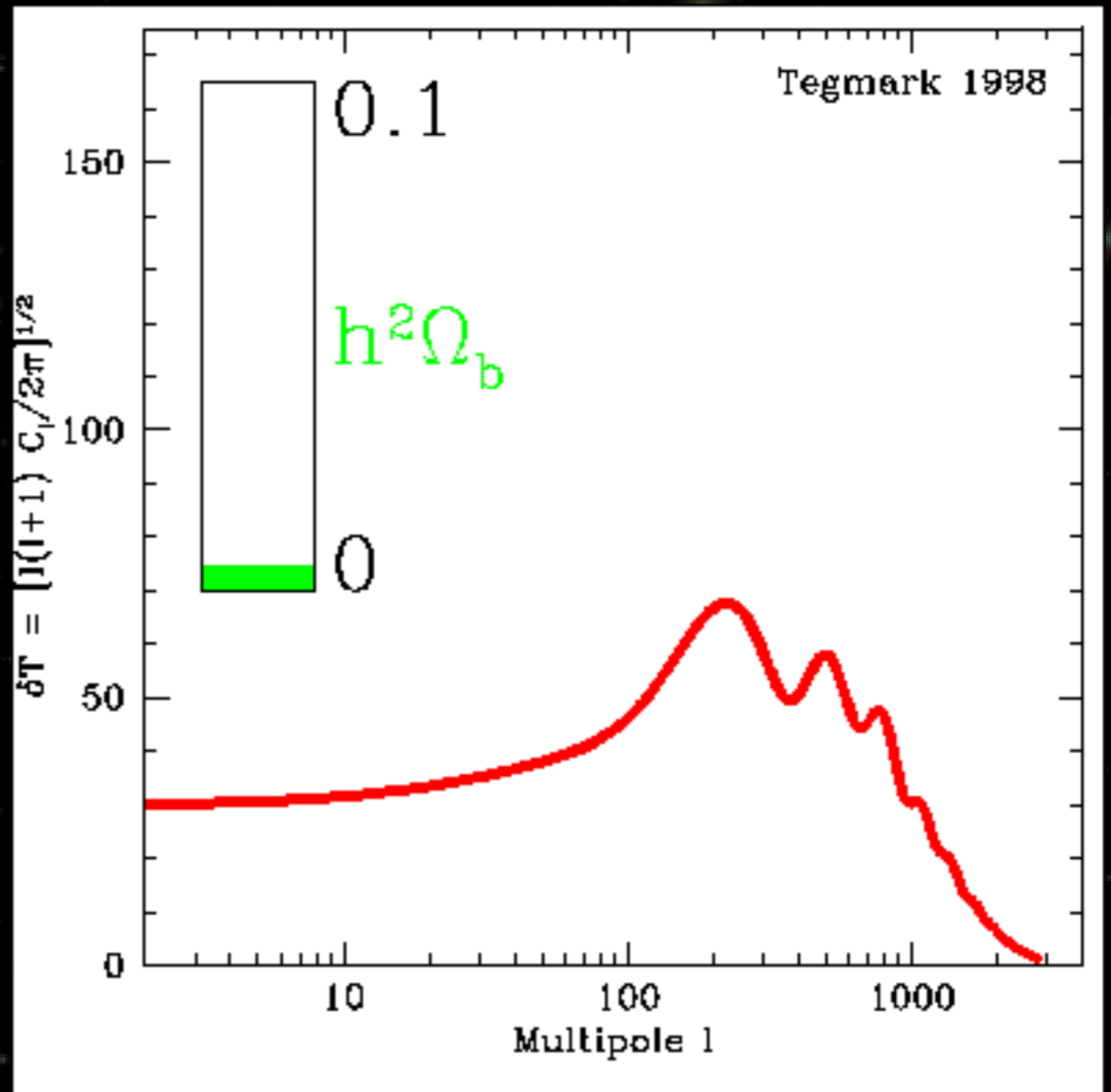
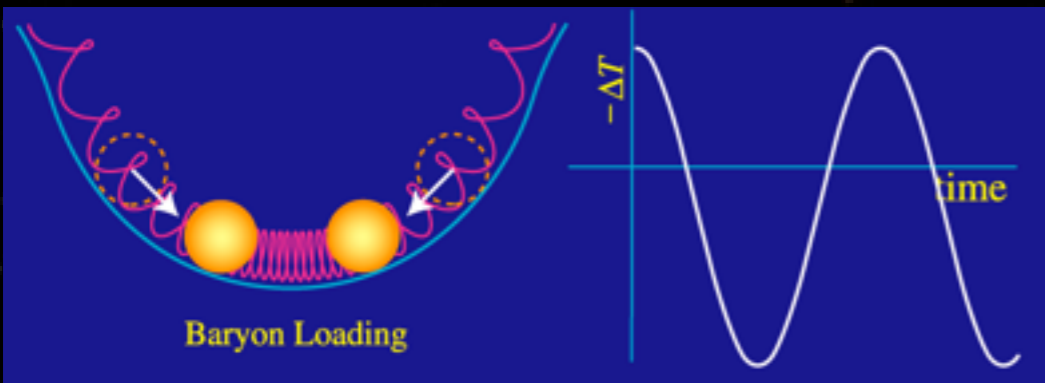
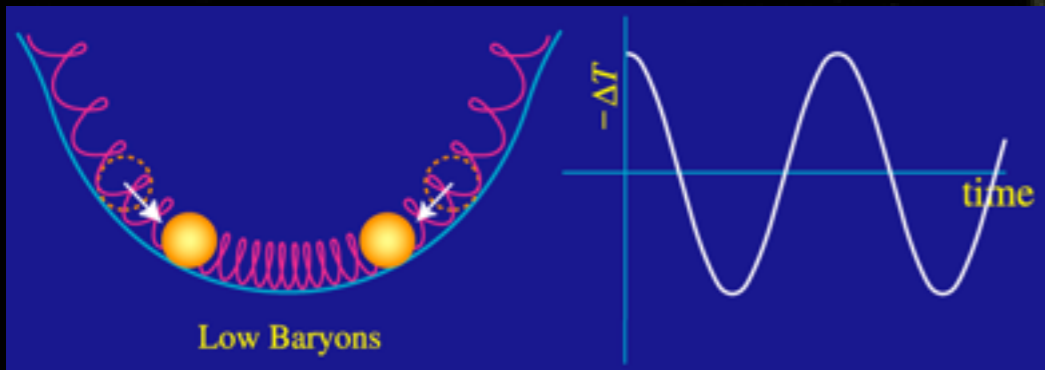
Énergie sombre

$$D \propto \int \frac{dz}{H(z)}$$

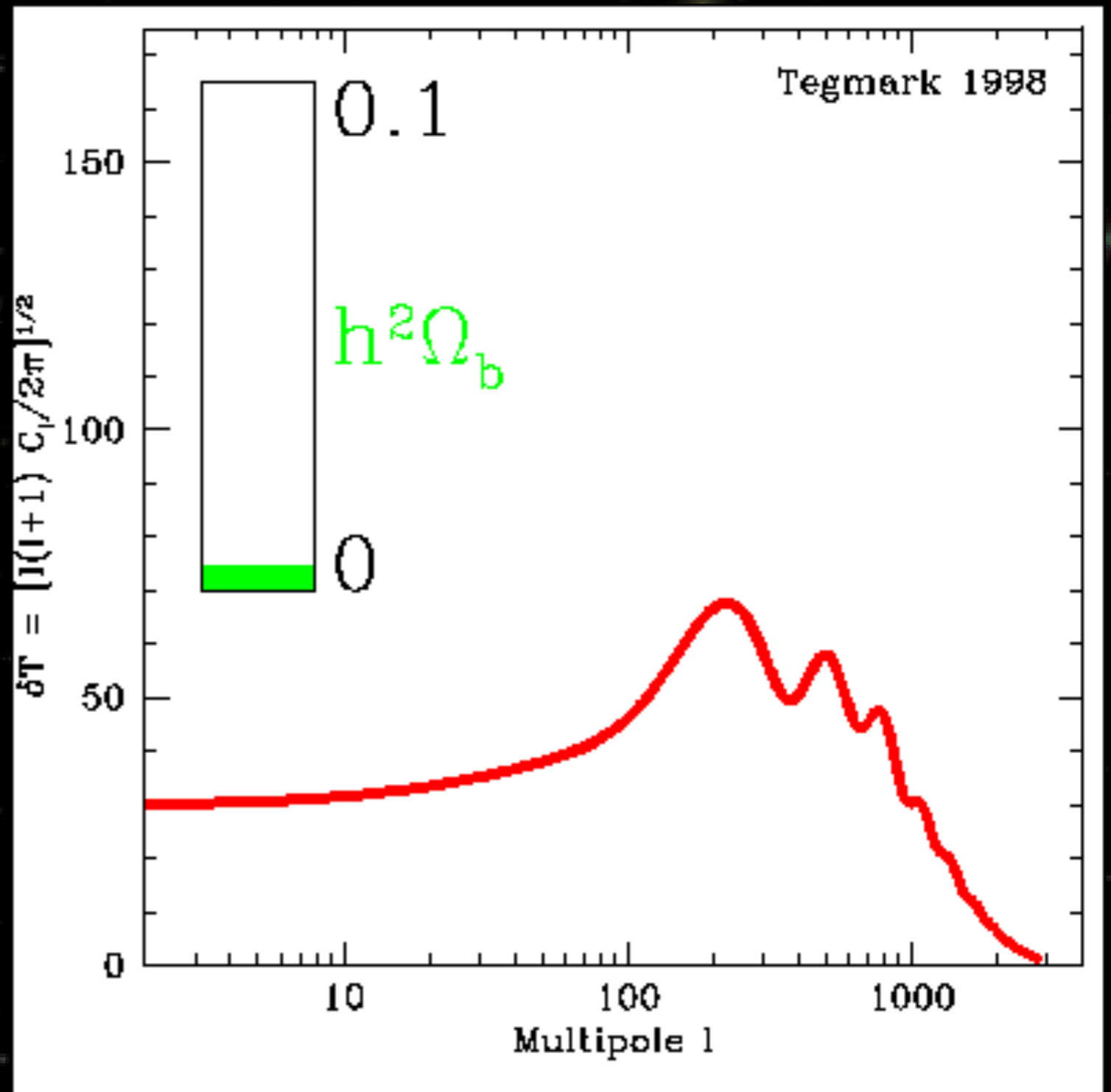
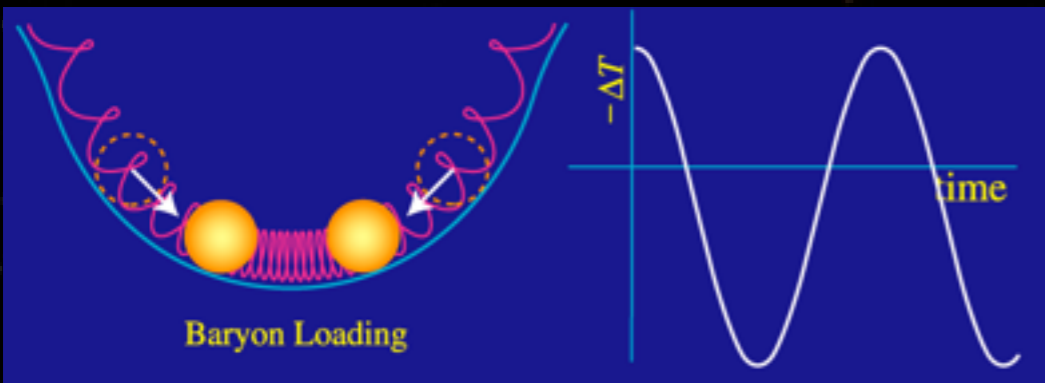
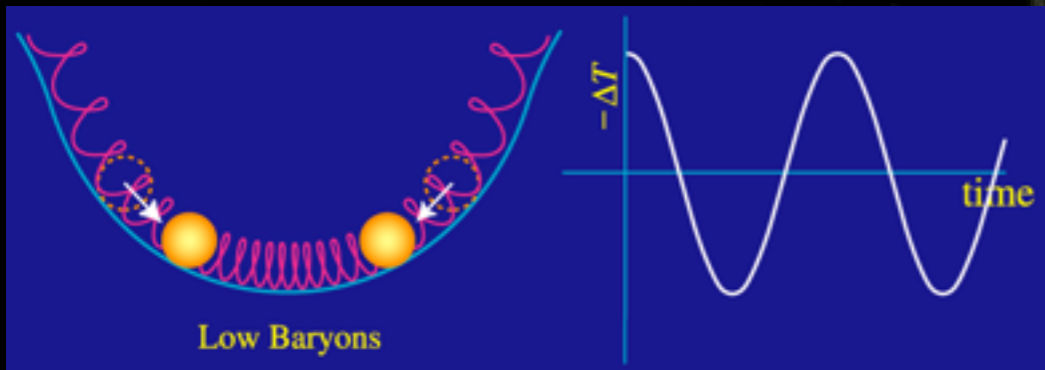
L accélère l'expansion



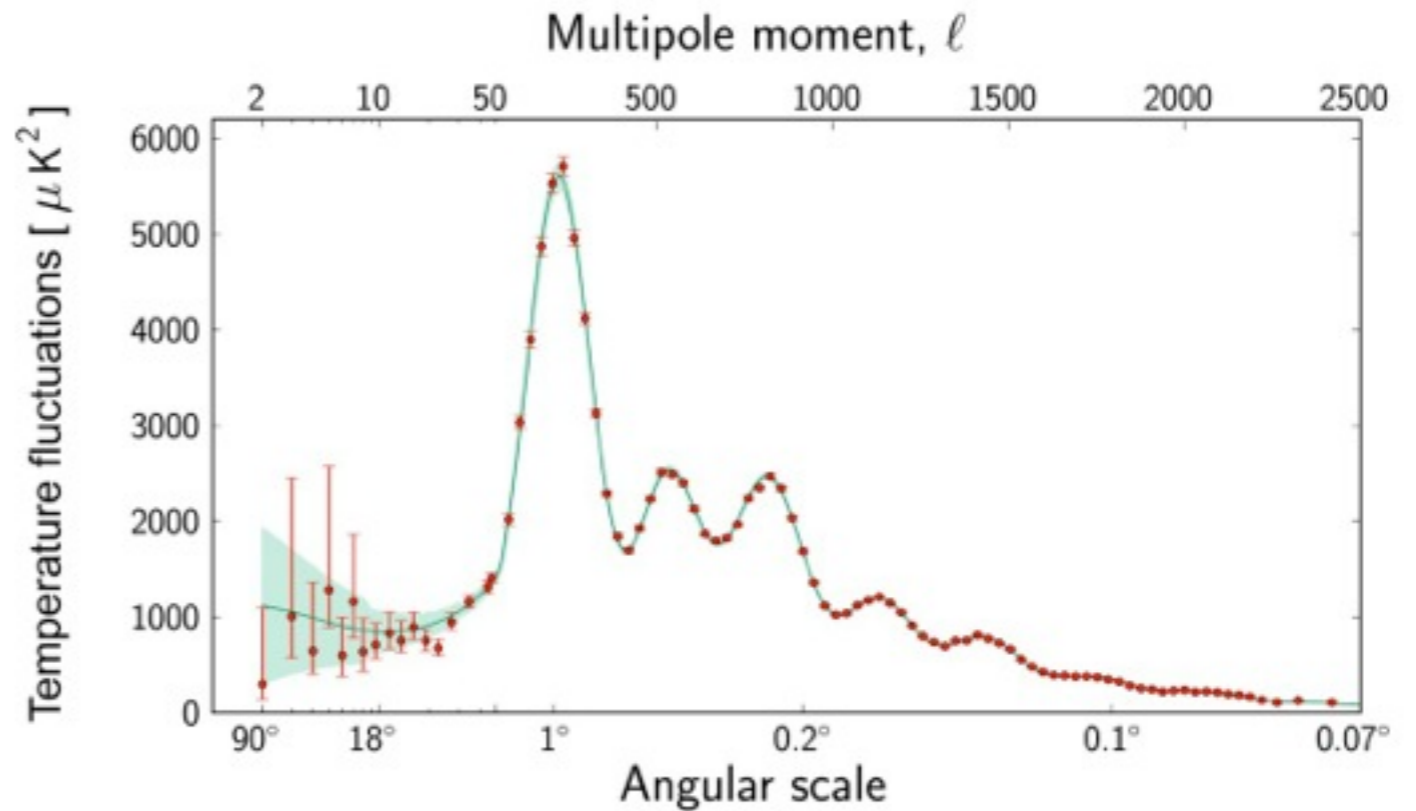
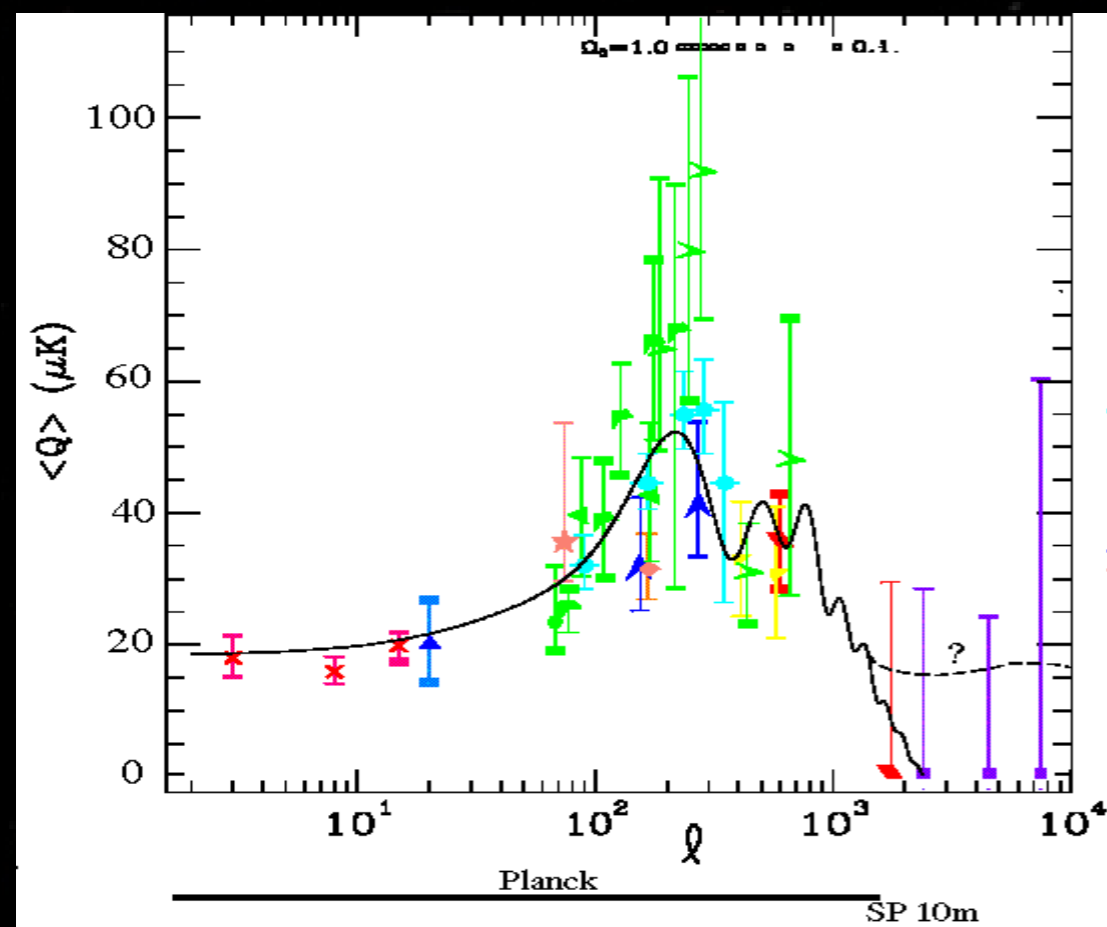
Matière baryonique



Matière baryonique



un domaine bouillonnant...



1999

Immense succès : plusieurs milliers de points de mesures indépendants ajustés avec moins de 10 paramètres ...

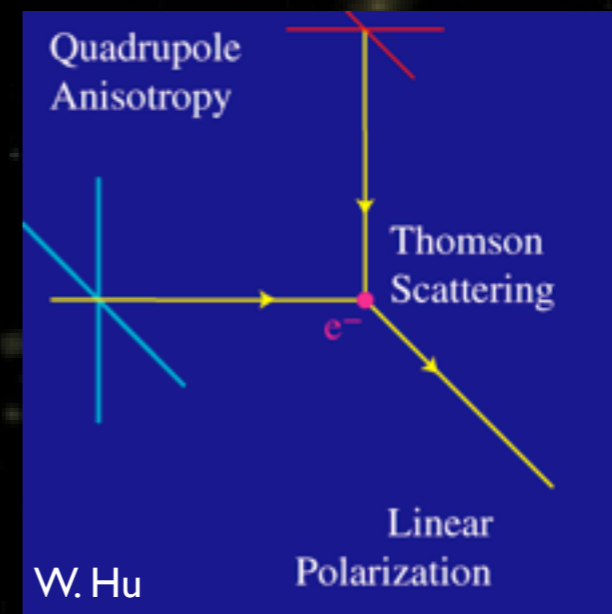
Grâce à WMAP et Planck, mais surtout à l'apparition des bolomètres et à l'augmentation de leur nombre

2013

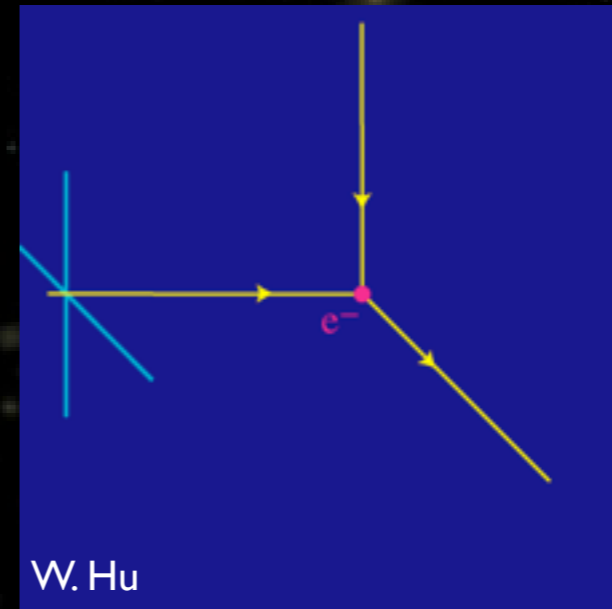
Bientôt Planck ...



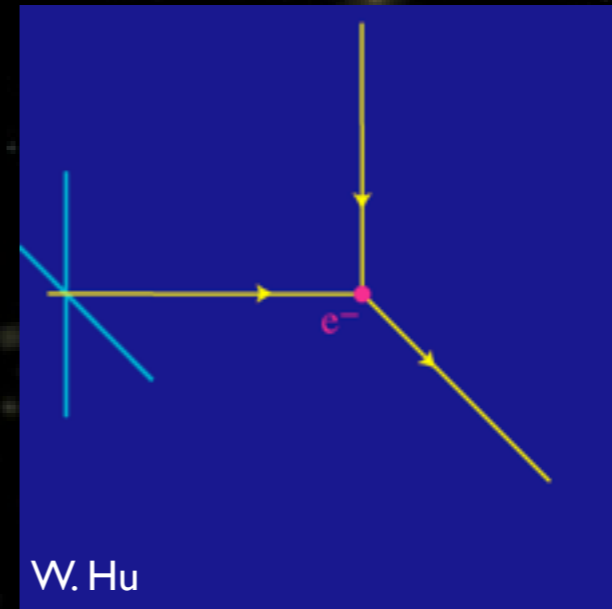
Le CMB est polarisé à $\sim 10\%$



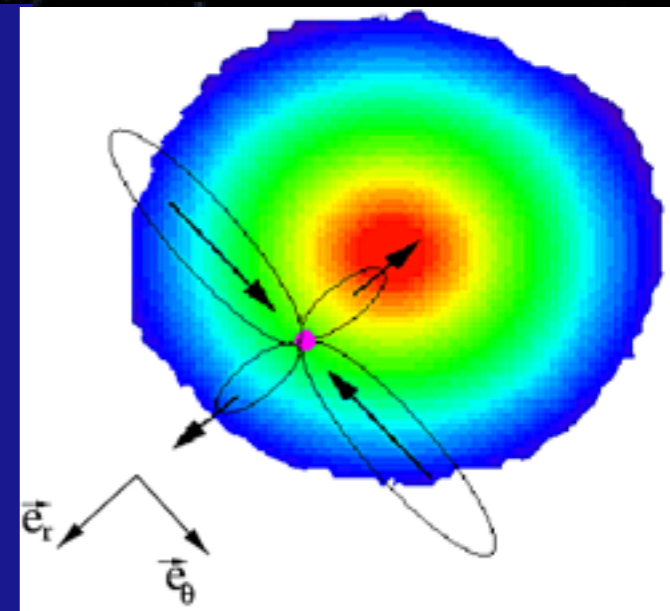
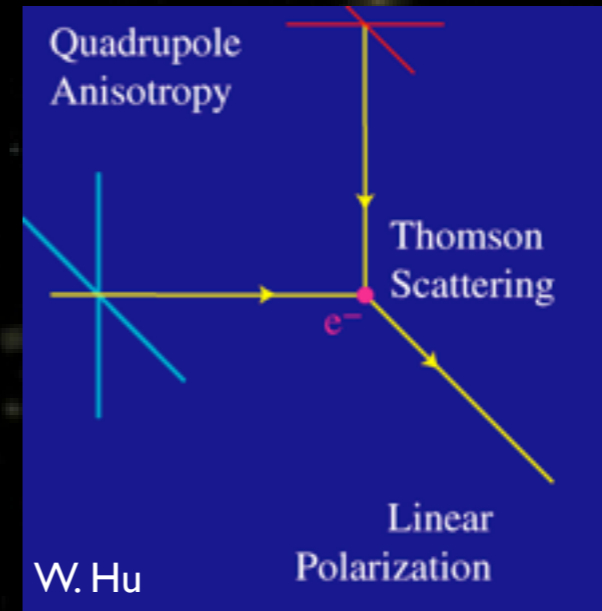
Le CMB est polarisé à $\sim 10\%$



Le CMB est polarisé à $\sim 10\%$



Le CMB est polarisé à $\sim 10\%$



N. Ponthieu



Le CMB est polarisé à $\sim 10\%$

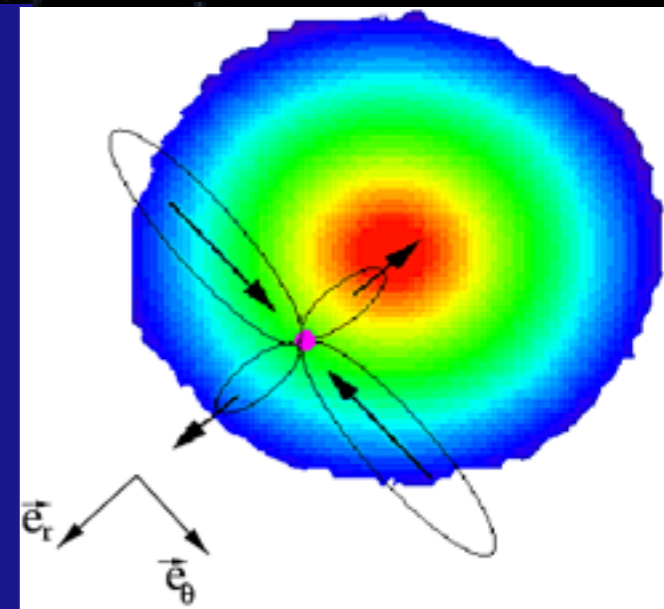
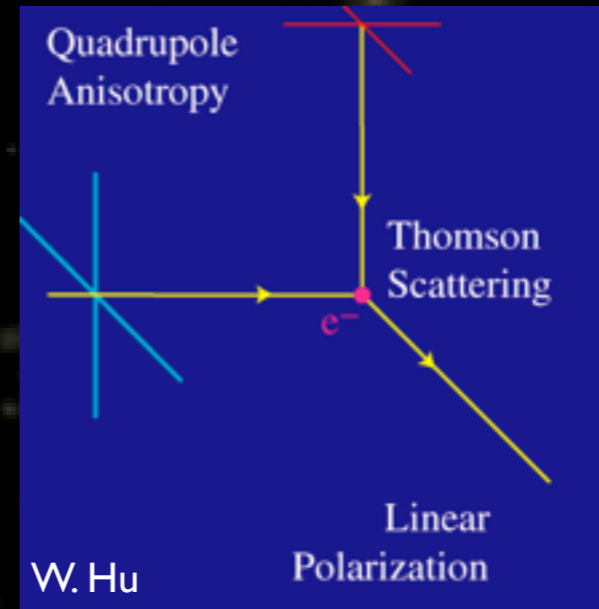
★ Paramètres de Stokes :

$$I(\vec{n}) = \langle |E_{\parallel}(\vec{n})|^2 \rangle + \langle |E_{\perp}(\vec{n})|^2 \rangle \quad (\text{scalaire})$$

$$Q(\vec{n}) = \langle |E_{\parallel}(\vec{n})|^2 \rangle - \langle |E_{\perp}(\vec{n})|^2 \rangle \quad (\text{spin } 2)$$

$$U(\vec{n}) = \langle E_{\parallel}(\vec{n})E_{\perp}^*(\vec{n}) \rangle + \langle E_{\perp}(\vec{n})E_{\parallel}^*(\vec{n}) \rangle \quad (\text{spin } 2)$$

$$V(\vec{n}) = i \left(\langle E_{\parallel}(\vec{n})E_{\perp}^*(\vec{n}) \rangle - \langle E_{\perp}(\vec{n})E_{\parallel}^*(\vec{n}) \rangle \right) \quad (\text{spin } 2)$$



★ Décomposition en harmoniques sphériques de spin +/- 2

$$Q(\vec{n}) + iU(\vec{n}) = \sum_{\ell m} a_{2,\ell m} {}_2Y_{\ell m}(\vec{n})$$

$$Q(\vec{n}) - iU(\vec{n}) = \sum_{\ell m} a_{-2,\ell m} {}_{-2}Y_{\ell m}(\vec{n})$$

★ Tout champ de polarisation peut être décomposé en 2 champs scalaires E et B



Le CMB est polarisé à $\sim 10\%$

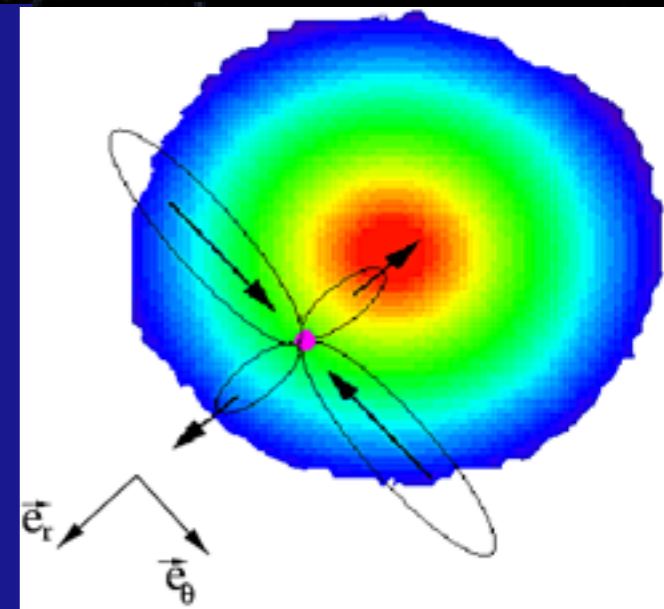
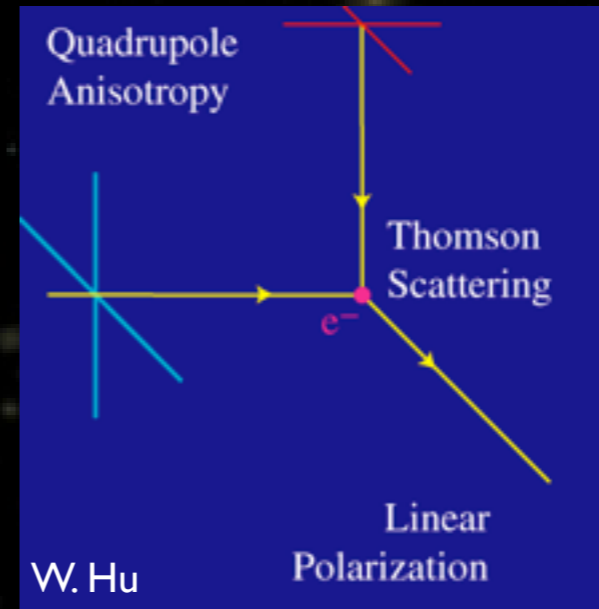
★ Paramètres de Stokes :

$$I(\vec{n}) = \langle |E_{\parallel}(\vec{n})|^2 \rangle + \langle |E_{\perp}(\vec{n})|^2 \rangle \quad (\text{scalaire})$$

$$Q(\vec{n}) = \langle |E_{\parallel}(\vec{n})|^2 \rangle - \langle |E_{\perp}(\vec{n})|^2 \rangle \quad (\text{spin } 2)$$

$$U(\vec{n}) = \langle E_{\parallel}(\vec{n})E_{\perp}^*(\vec{n}) \rangle + \langle E_{\perp}(\vec{n})E_{\parallel}^*(\vec{n}) \rangle \quad (\text{spin } 2)$$

$$V(\vec{n}) = i \left(\langle E_{\parallel}(\vec{n})E_{\perp}^*(\vec{n}) \rangle - \langle E_{\perp}(\vec{n})E_{\parallel}^*(\vec{n}) \rangle \right) \quad (\text{spin } 2)$$



★ Décomposition en harmoniques sphériques de spin +/- 2

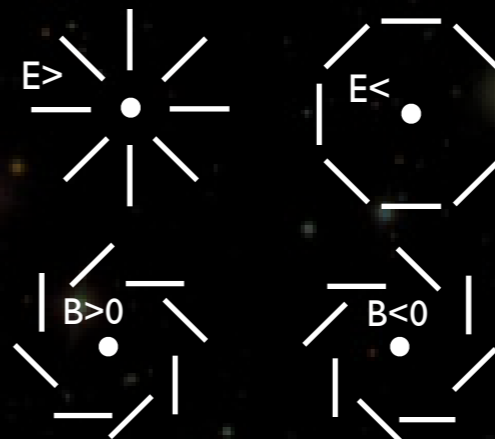
$$Q(\vec{n}) + iU(\vec{n}) = \sum_{\ell m} a_{2,\ell m} {}_2Y_{\ell m}(\vec{n})$$

$$Q(\vec{n}) - iU(\vec{n}) = \sum_{\ell m} a_{-2,\ell m} {}_{-2}Y_{\ell m}(\vec{n})$$

★ Tout champ de polarisation peut être décomposé en 2 champs scalaires E et B

$$a_{E,\ell m} = -\frac{a_{2,\ell m} + a_{-2,\ell m}}{2} \quad (\text{pair})$$

$$a_{B,\ell m} = i\frac{a_{2,\ell m} - a_{-2,\ell m}}{2} \quad (\text{impair})$$



Le CMB est polarisé à $\sim 10\%$

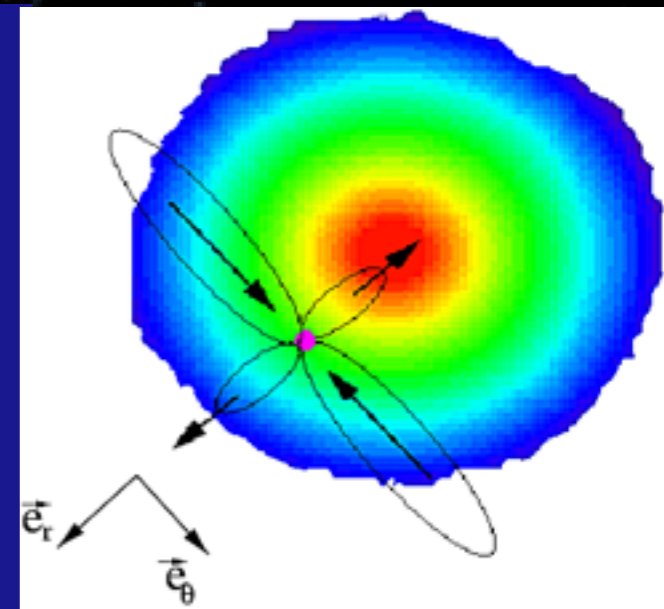
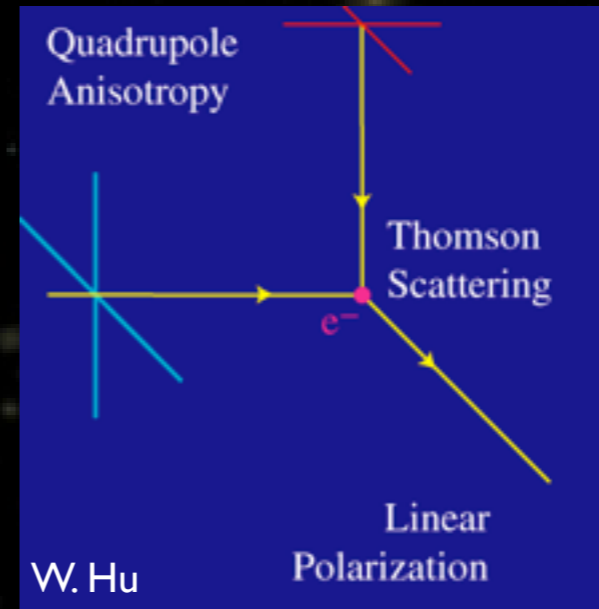
★ Paramètres de Stokes :

$$I(\vec{n}) = \langle |E_{\parallel}(\vec{n})|^2 \rangle + \langle |E_{\perp}(\vec{n})|^2 \rangle \quad (\text{scalaire})$$

$$Q(\vec{n}) = \langle |E_{\parallel}(\vec{n})|^2 \rangle - \langle |E_{\perp}(\vec{n})|^2 \rangle \quad (\text{spin } 2)$$

$$U(\vec{n}) = \langle E_{\parallel}(\vec{n})E_{\perp}^*(\vec{n}) \rangle + \langle E_{\perp}(\vec{n})E_{\parallel}^*(\vec{n}) \rangle \quad (\text{spin } 2)$$

$$V(\vec{n}) = i \left(\langle E_{\parallel}(\vec{n})E_{\perp}^*(\vec{n}) \rangle - \langle E_{\perp}(\vec{n})E_{\parallel}^*(\vec{n}) \rangle \right) \quad (\text{spin } 2)$$



★ Décomposition en harmoniques sphériques de spin +/- 2

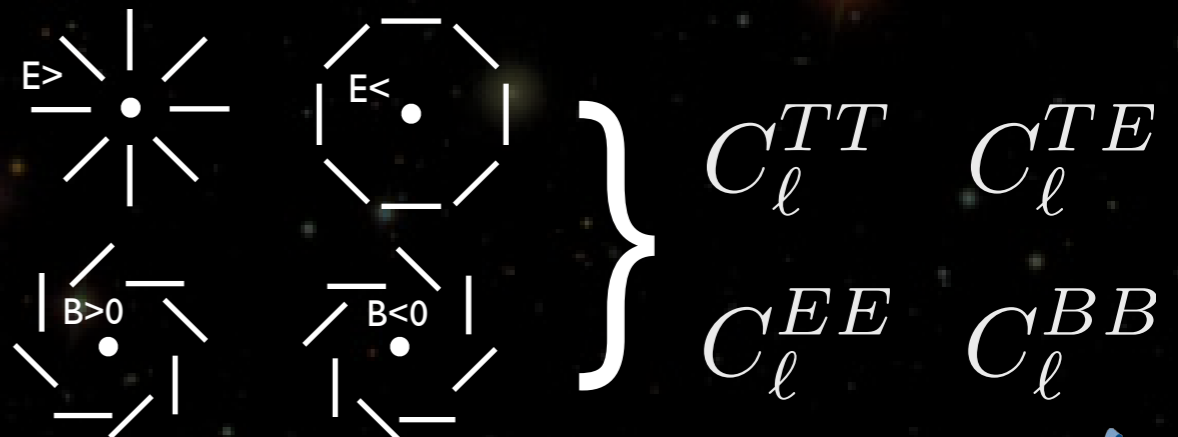
$$Q(\vec{n}) + iU(\vec{n}) = \sum_{\ell m} a_{2,\ell m} {}_2Y_{\ell m}(\vec{n})$$

$$Q(\vec{n}) - iU(\vec{n}) = \sum_{\ell m} a_{-2,\ell m} {}_{-2}Y_{\ell m}(\vec{n})$$

★ Tout champ de polarisation peut être décomposé en 2 champs scalaires E et B

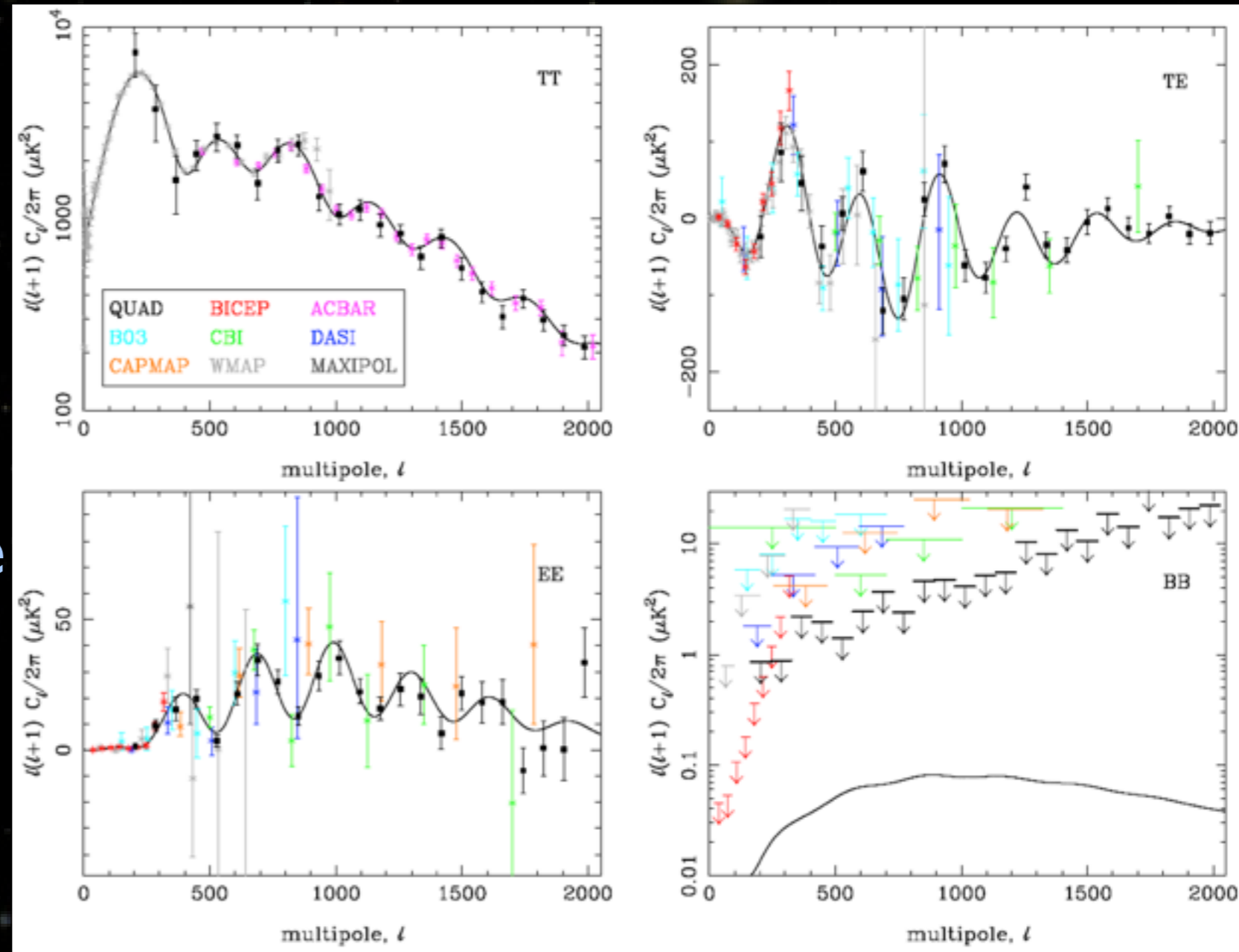
$$a_{E,\ell m} = -\frac{a_{2,\ell m} + a_{-2,\ell m}}{2} \quad (\text{pair})$$

$$a_{B,\ell m} = i\frac{a_{2,\ell m} - a_{-2,\ell m}}{2} \quad (\text{impair})$$



Mesures de polarisation du CMB

- Détection en 2001
 - ★ DASI et CBI (interféromètres)
- Mesures ultérieures:
 - ★ Parfait accord avec les mesures de température
- Correspondance entre pics de TT et creux de EE
 - ★ Caractéristique de perturbations primordiales adiabatiques (inflation par exemple ...)

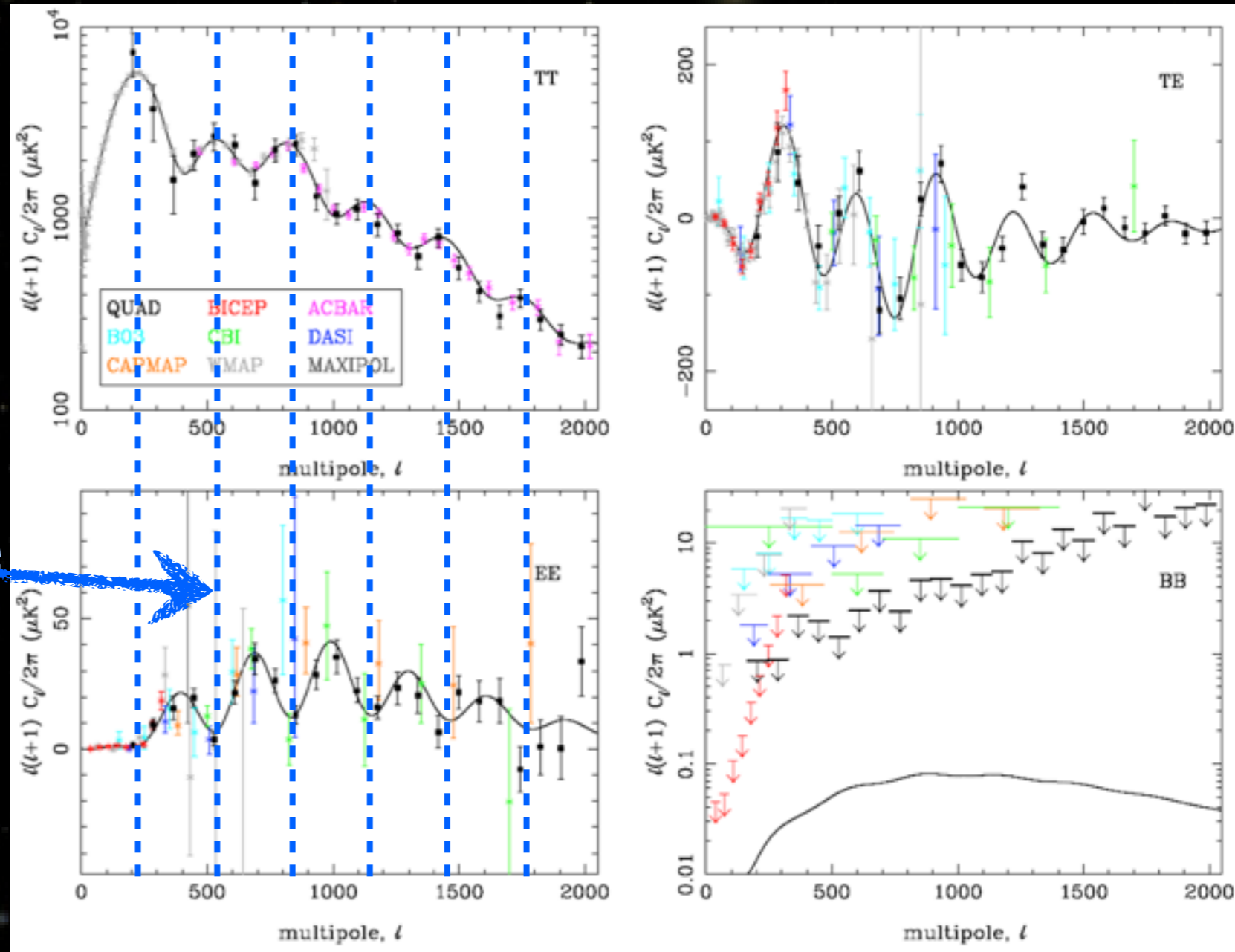


[QUAD Collaboration: Arxiv:0906.1003]



Mesures de polarisation du CMB

- Détection en 2001
 - ★ DASI et CBI (interféromètres)
- Mesures ultérieures:
 - ★ Parfait accord avec les mesures de température
- Correspondance entre pics de TT et creux de EE
 - ★ Caractéristique de perturbations primordiales adiabatiques (inflation par exemple ...)



[QUAD Collaboration: Arxiv:0906.1003]



Planck - Résultats complets de polarisation fin 2014

Planck collaboration. CMB power spectra & likelihood

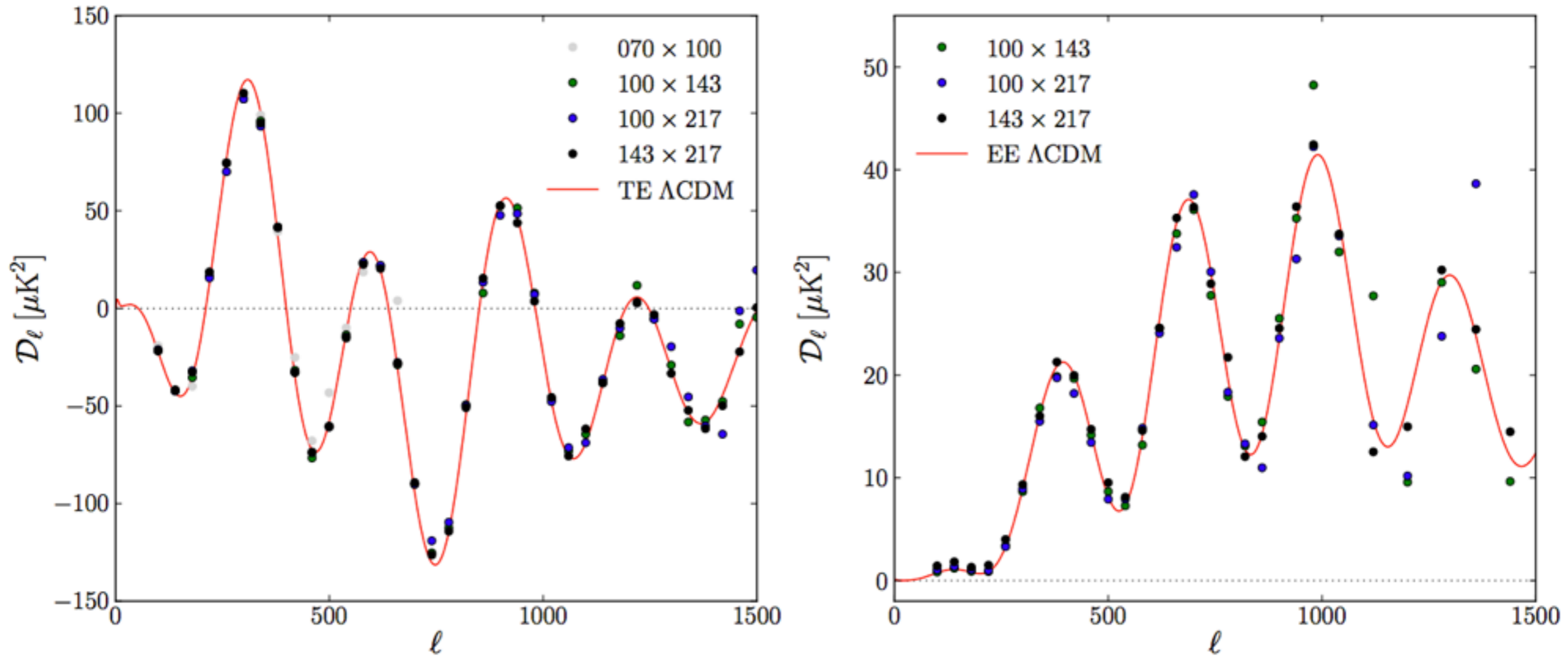
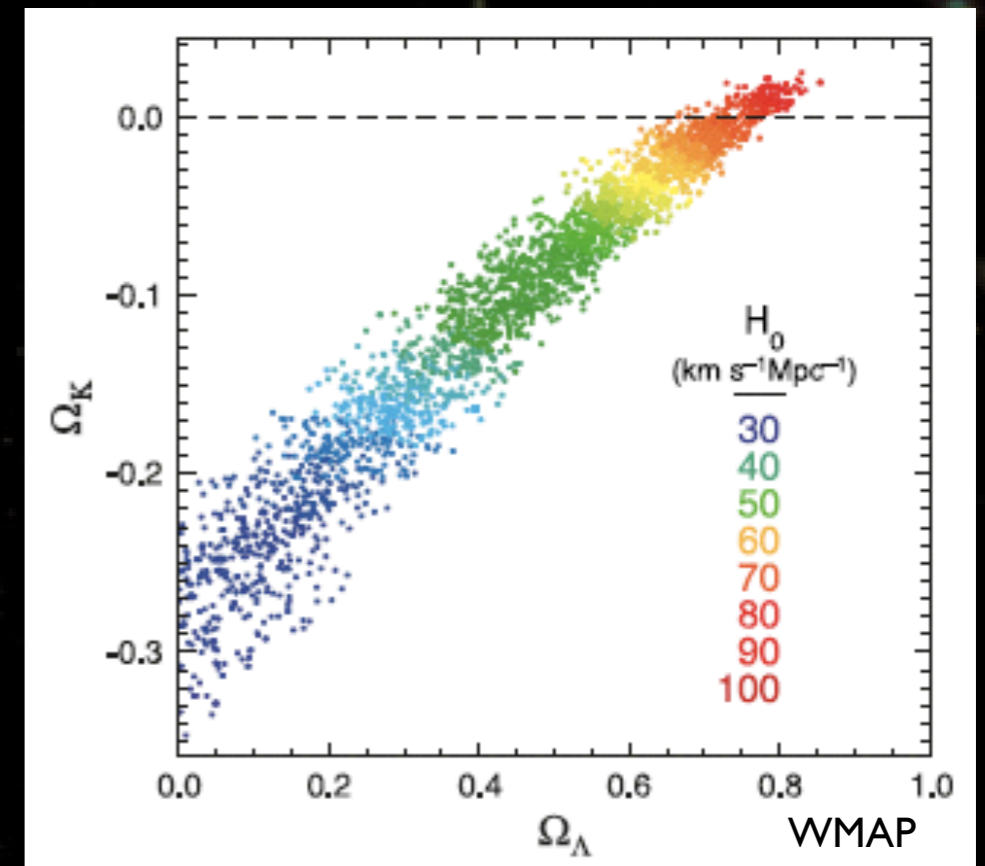


Figure 31. *Planck* TE and EE polarisation spectra computed as described in the text, together with the polarisation spectra predicted from the six-parameter ΛCDM model, fit only to the *Planck* temperature data.

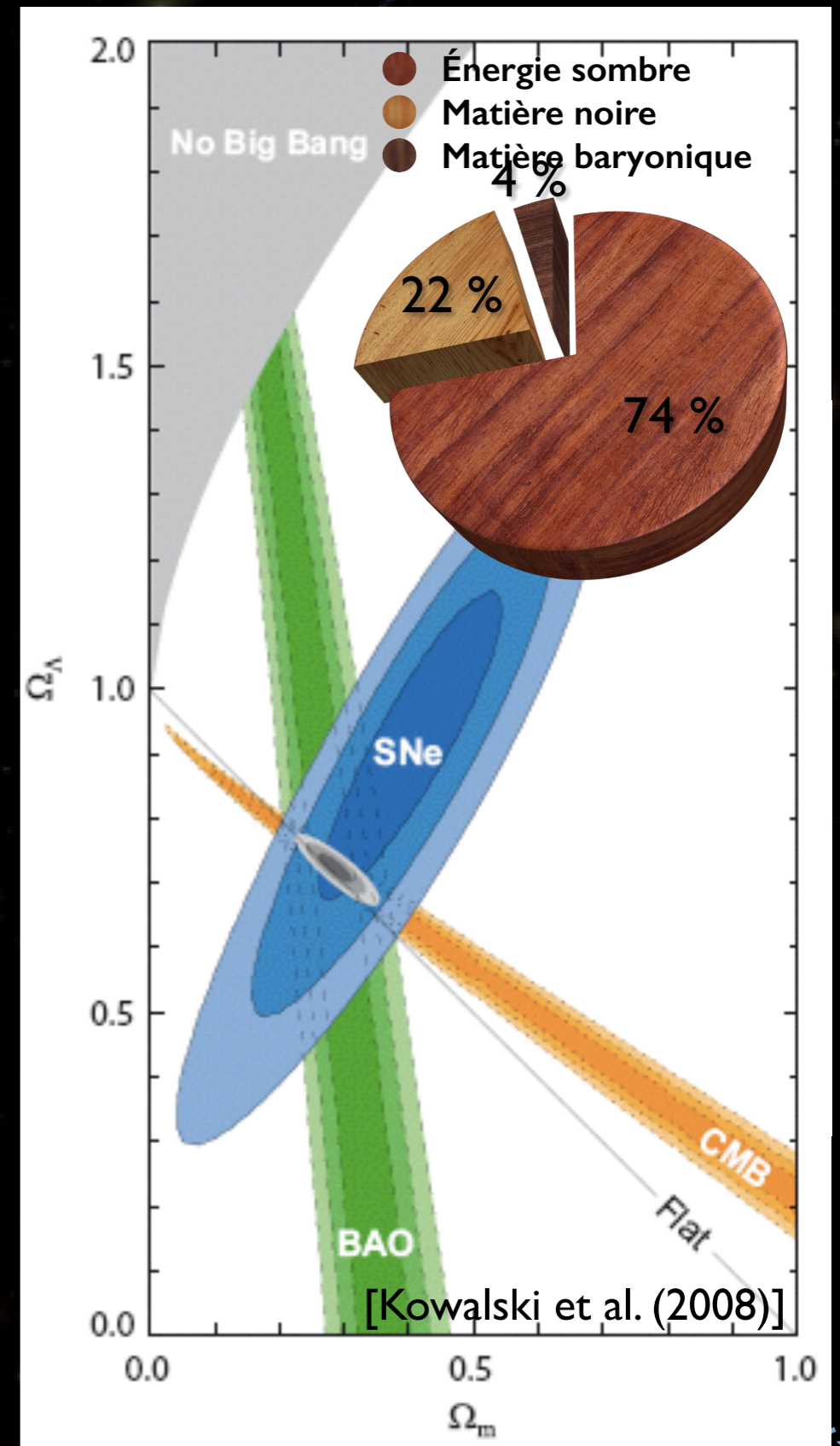
ce que l'on sait

- **Modèle standard de la cosmologie : Λ CDM**
 - ★ L'Univers est en expansion
 - Constante de Hubble
 - ★ L'Univers est plat : $\Omega_{\text{tot}} \approx 1$
 - CMB + Constante de Hubble
 - ★ Il contient de l'énergie sombre $\sim 74\%$
 - SNIa, CMB+H, mesures de W_m
 - quantité connue, nature inconnue
 - ★ Il contient de la matière noire $\sim 22\%$
 - Courbes de rotation, formation des structures, CMB
 - quantité connue, nature inconnue



ce que l'on sait

- **Modèle standard de la cosmologie : Λ CDM**
 - ★ L'Univers est en expansion
 - Constante de Hubble
 - ★ L'Univers est plat : $\Omega_{\text{tot}} \approx 1$
 - CMB + Constante de Hubble
 - ★ Il contient de l'énergie sombre $\sim 74\%$
 - SNIa, CMB+H, mesures de W_m
 - quantité connue, nature inconnue
 - ★ Il contient de la matière noire $\sim 22\%$
 - Courbes de rotation, formation des structures, CMB
 - quantité connue, nature inconnue



Major steps for CMB

- 1965: Discovery by Penzias & Wilson
 - ★ Isotropic black-body radiation at $T \sim 3\text{K}$
- 1992: COBE
 - ★ Anisotropies discovered $\Delta T/T = 10^{-5}$
 - ★ Black-body confirmed
- 1999: Boomerang and Maxima
 - ★ First acoustic peak discovered
- 2001: DASI & CBI
 - ★ Polarization detection
- 2003: WMAP
 - ★ Exquisite full-sky measurement of T and E
- 2013: Planck
 - ★ Ultimate measurements of T and E
- 20XX: B-modes experiments
 - ★ primordial gravitational waves



Major steps for CMB

- 1965: Discovery by Penzias & Wilson

- ★ Isotropic black-body radiation at $T \sim 3\text{K}$



- Big-Bang confirmed...
- Where are the anisotropies ?

- 1992: COBE

- ★ Anisotropies discovered $\Delta T/T = 10^{-5}$
- ★ Black-body confirmed

- 1999: Boomerang and Maxima

- ★ First acoustic peak discovered

- 2001: DASI & CBI

- ★ Polarization detection

- 2003: WMAP

- ★ Exquisite full-sky measurement of T and E

- 2013: Planck

- ★ Ultimate measurements of T and E

- 20XX: B-modes experiments

- ★ primordial gravitational waves



Major steps for CMB

- 1965: Discovery by Penzias & Wilson

- ★ Isotropic black-body radiation at $T \sim 3\text{K}$



- Big-Bang confirmed...
- Where are the anisotropies ?

- 1992: COBE

- ★ Anisotropies discovered $\Delta T/T = 10^{-5}$
- ★ Black-body confirmed



- Cold Dark Matter strongly favoured

- 1999: Boomerang and Maxima

- ★ First acoustic peak discovered

- 2001: DASI & CBI

- ★ Polarization detection

- 2003: WMAP

- ★ Exquisite full-sky measurement of T and E

- 2013: Planck

- ★ Ultimate measurements of T and E

- 20XX: B-modes experiments

- ★ primordial gravitational waves



Major steps for CMB

- 1965: Discovery by Penzias & Wilson

- ★ Isotropic black-body radiation at $T \sim 3\text{K}$



- Big-Bang confirmed...
- Where are the anisotropies ?

- 1992: COBE

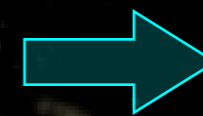
- ★ Anisotropies discovered $\Delta T/T = 10^{-5}$
- ★ Black-body confirmed



- Cold Dark Matter strongly favoured

- 1999: Boomerang and Maxima

- ★ First acoustic peak discovered



- Topological defects excluded
- Inflation favoured
- Evidence for flatness

- 2001: DASI & CBI

- ★ Polarization detection

- 2003: WMAP

- ★ Exquisite full-sky measurement of T and E

- 2013: Planck

- ★ Ultimate measurements of T and E

- 20XX: B-modes experiments

- ★ primordial gravitational waves



Major steps for CMB

- 1965: Discovery by Penzias & Wilson

- ★ Isotropic black-body radiation at $T \sim 3K$



- Big-Bang confirmed...
- Where are the anisotropies ?

- 1992: COBE

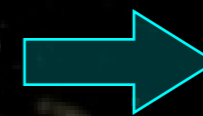
- ★ Anisotropies discovered $\Delta T/T = 10^{-5}$
- ★ Black-body confirmed



- Cold Dark Matter strongly favoured

- 1999: Boomerang and Maxima

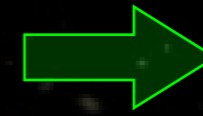
- ★ First acoustic peak discovered



- Topological defects excluded
- Inflation favoured
- Evidence for flatness

- 2001: DASI & CBI

- ★ Polarization detection



- Major prediction confirmed

- 2003: WMAP

- ★ Exquisite full-sky measurement of T and E

- 2013: Planck

- ★ Ultimate measurements of T and E

- 20XX: B-modes experiments

- ★ primordial gravitational waves



Major steps for CMB

- 1965: Discovery by Penzias & Wilson

- ★ Isotropic black-body radiation at $T \sim 3\text{K}$



- Big-Bang confirmed...
- Where are the anisotropies ?

- 1992: COBE

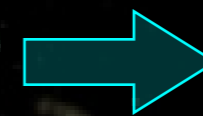
- ★ Anisotropies discovered $\Delta T/T = 10^{-5}$
- ★ Black-body confirmed



- Cold Dark Matter strongly favoured

- 1999: Boomerang and Maxima

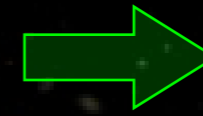
- ★ First acoustic peak discovered



- Topological defects excluded
- Inflation favoured
- Evidence for flatness

- 2001: DASI & CBI

- ★ Polarization detection



- Major prediction confirmed

- 2003: WMAP

- ★ Exquisite full-sky measurement of T and E



- Confirmation of adiabatic primordial perturbations
- Precision cosmology

- 2013: Planck







- ★ Ultimate measurements of T and E

- 20XX: B-modes experiments

- ★ primordial gravitational waves










Major steps for CMB

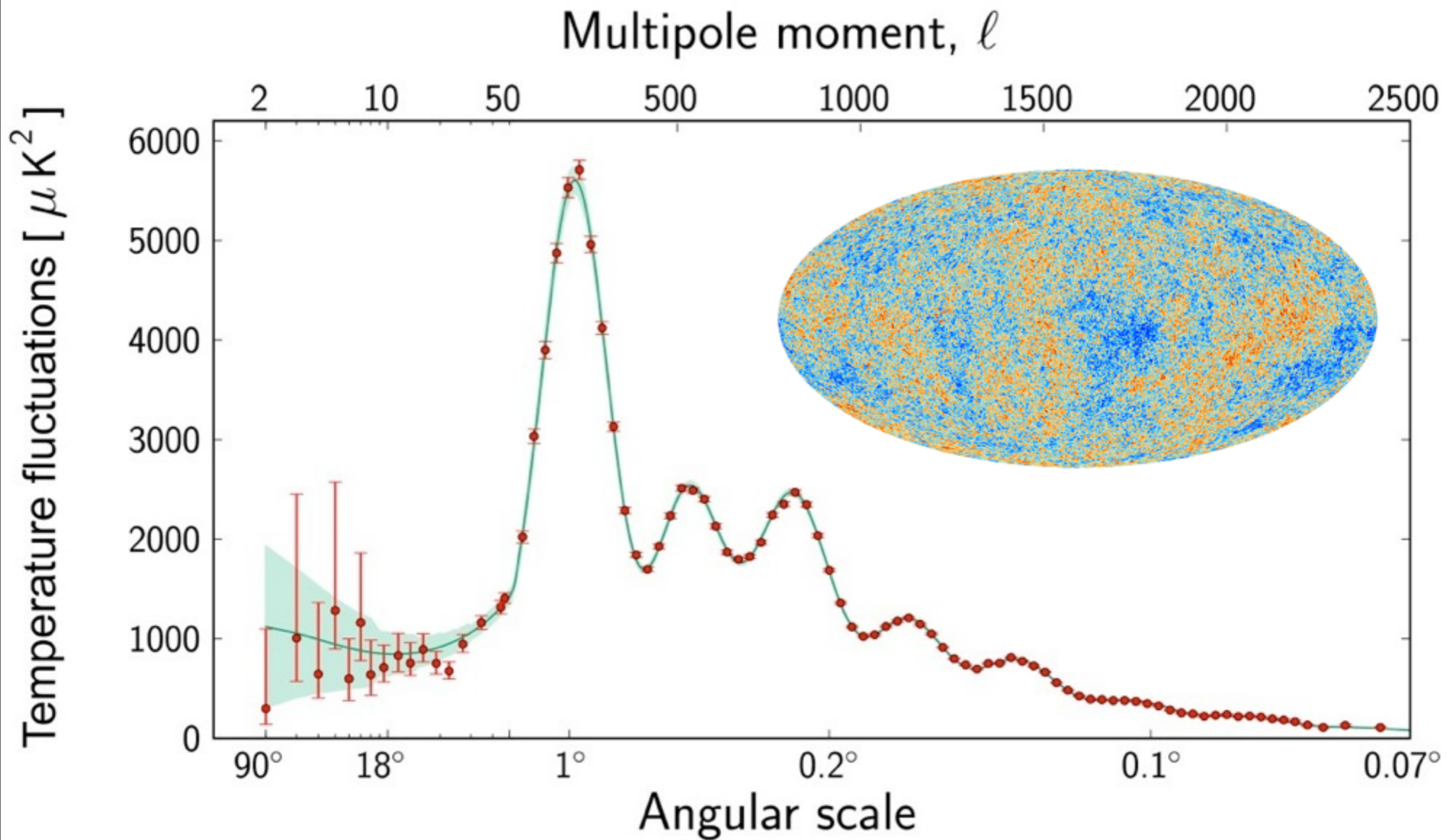
- 1965: Discovery by Penzias & Wilson
 - ★ Isotropic black-body radiation at $T \sim 3K$
 - Big-Bang confirmed...
 - Where are the anisotropies ?
- 1992: COBE
 - ★ Anisotropies discovered $\Delta T/T = 10^{-5}$
 - ★ Black-body confirmed
 - Cold Dark Matter strongly favoured
- 1999: Boomerang and Maxima
 - ★ First acoustic peak discovered
 - Topological defects excluded
 - Inflation favoured
 - Evidence for flatness
- 2001: DASI & CBI
 - ★ Polarization detection
 - Major prediction confirmed
- 2003: WMAP
 - ★ Exquisite full-sky measurement of T and E
 - Confirmation of adiabatic primordial perturbations
 - Precision cosmology
- 2013: Planck
 - ★ Ultimate measurements of T and E
 - Ultimate T and E spectra
 - factor 3 gain on cosmological parameters
- 20XX: B-modes experiments
 - ★ primordial gravitational waves

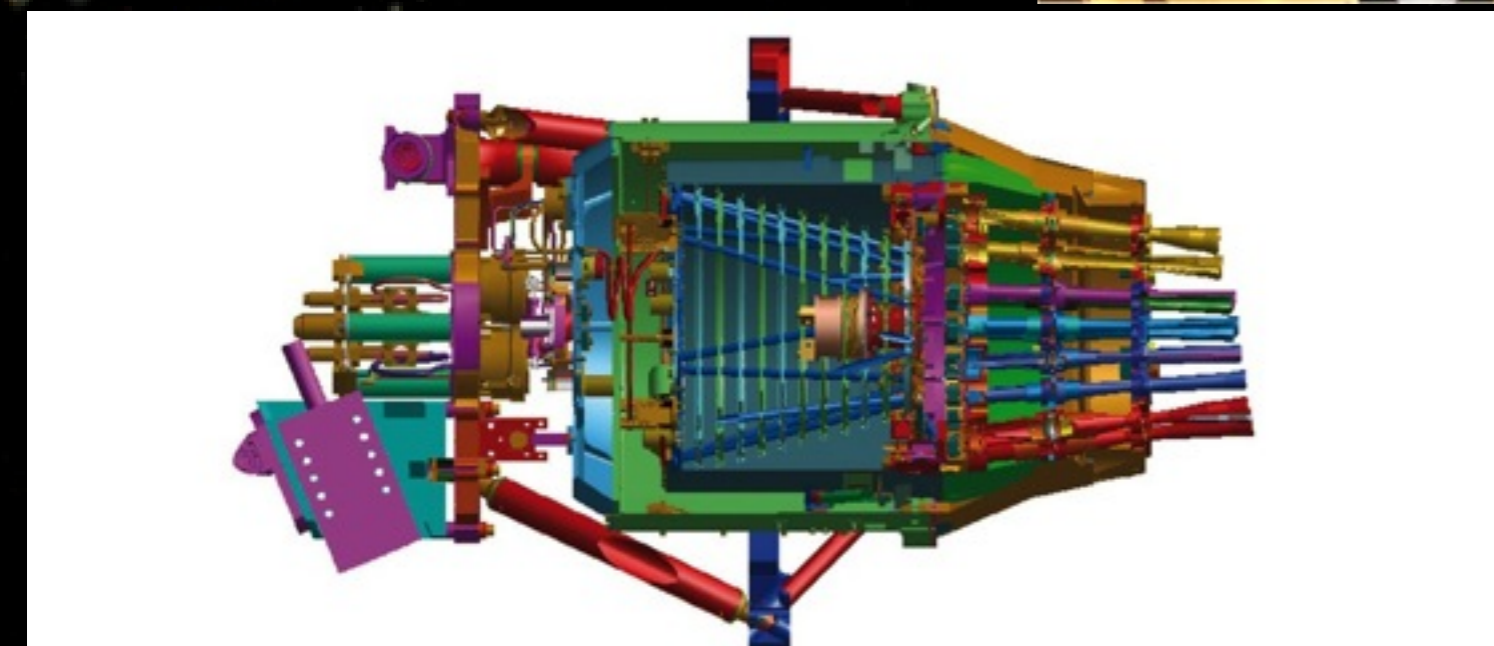
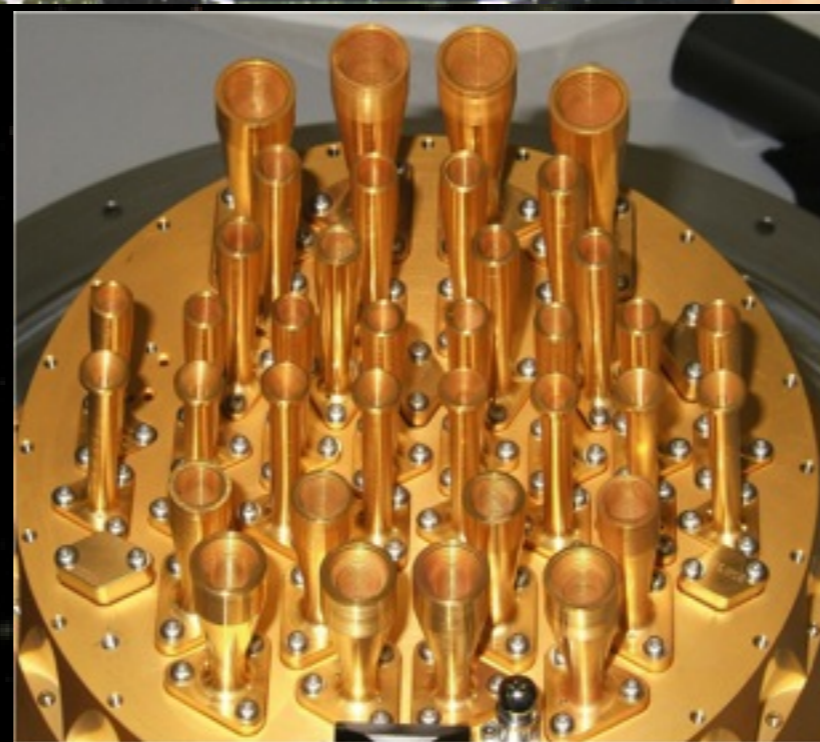
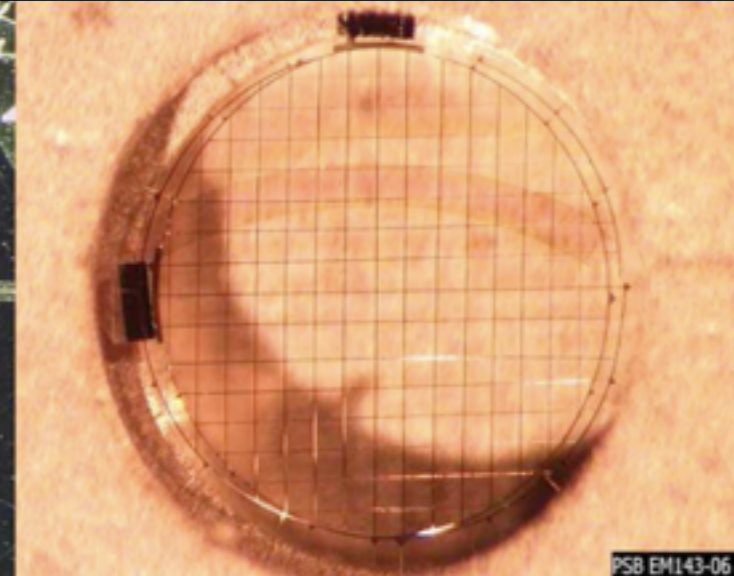


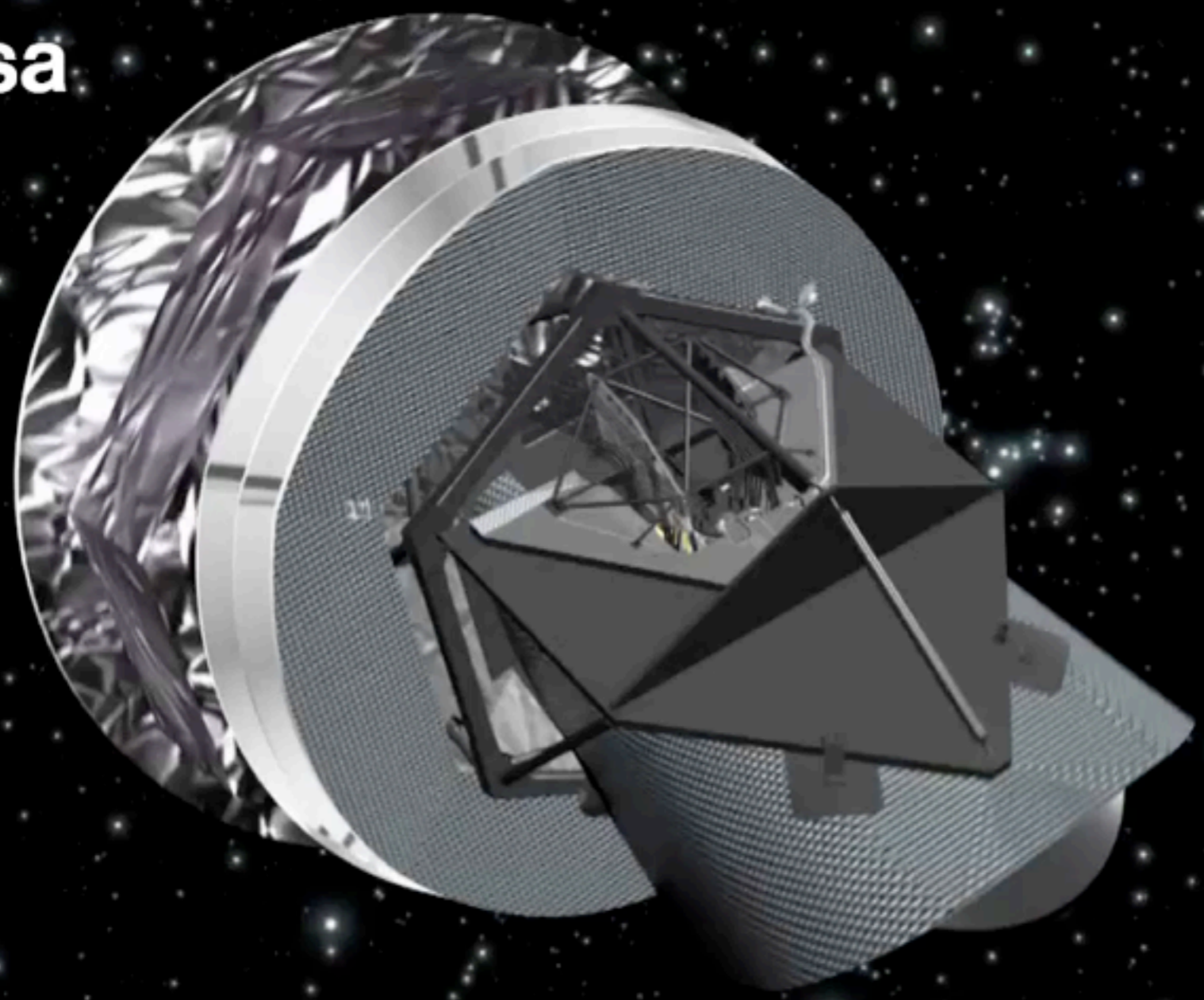
Major steps for CMB

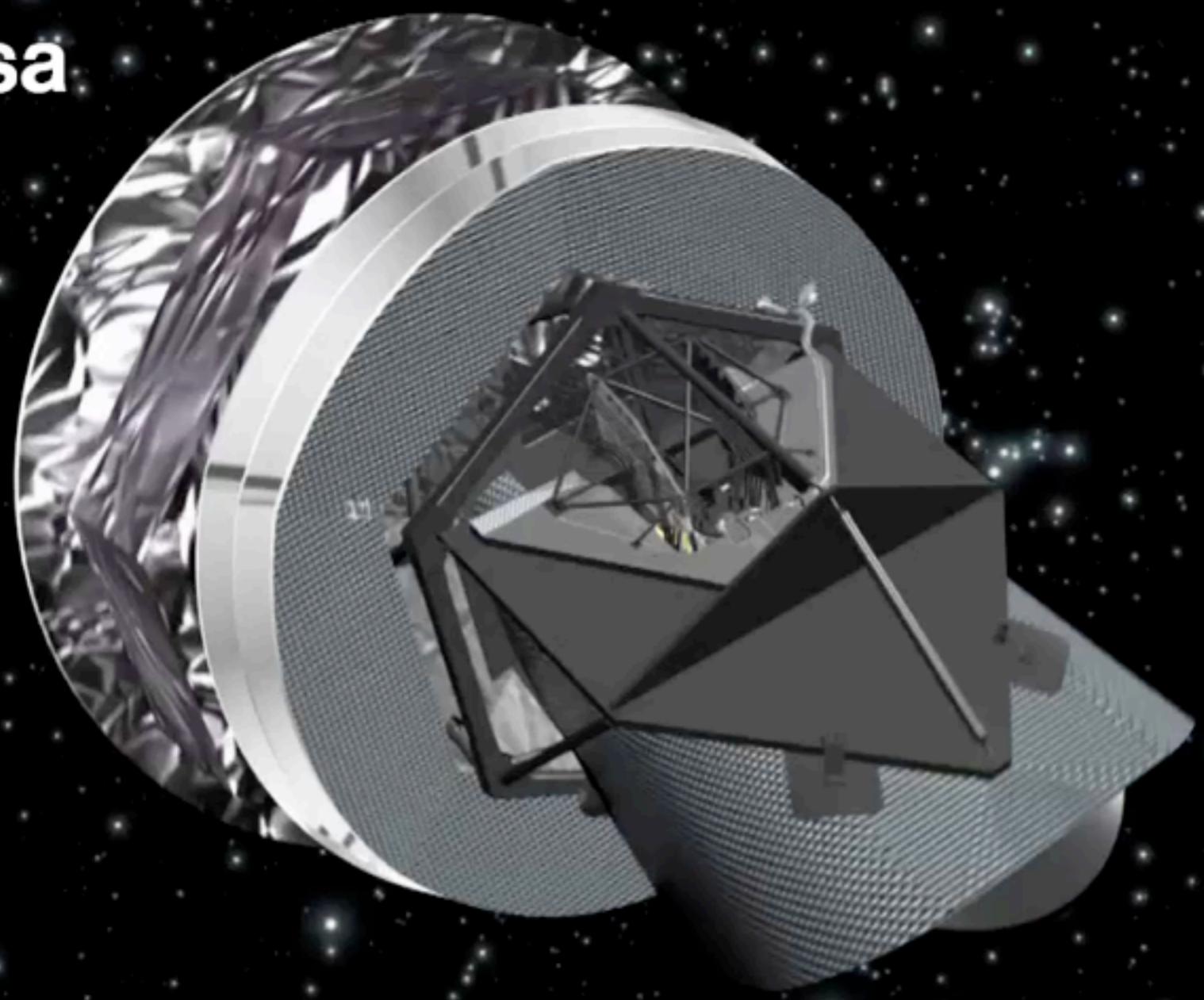
- 1965: Discovery by Penzias & Wilson
 - ★ Isotropic black-body radiation at $T \sim 3K$
 - Big-Bang confirmed...
 - Where are the anisotropies ?
- 1992: COBE
 - ★ Anisotropies discovered $\Delta T/T = 10^{-5}$
 - ★ Black-body confirmed
 - Cold Dark Matter strongly favoured
- 1999: Boomerang and Maxima
 - ★ First acoustic peak discovered
 - Topological defects excluded
 - Inflation favoured
 - Evidence for flatness
- 2001: DASI & CBI
 - ★ Polarization detection
 - Major prediction confirmed
- 2003: WMAP
 - ★ Exquisite full-sky measurement of T and E
 - Confirmation of adiabatic primordial perturbations
 - Precision cosmology
- 2013: Planck
 - ★ Ultimate measurements of T and E
 - Ultimate T and E spectra
 - factor 3 gain on cosmological parameters
- 20XX: B-modes experiments
 - ★ primordial gravitational waves
 - Exploration of inflationary physics

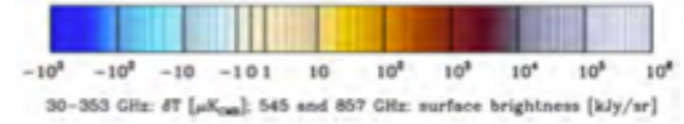
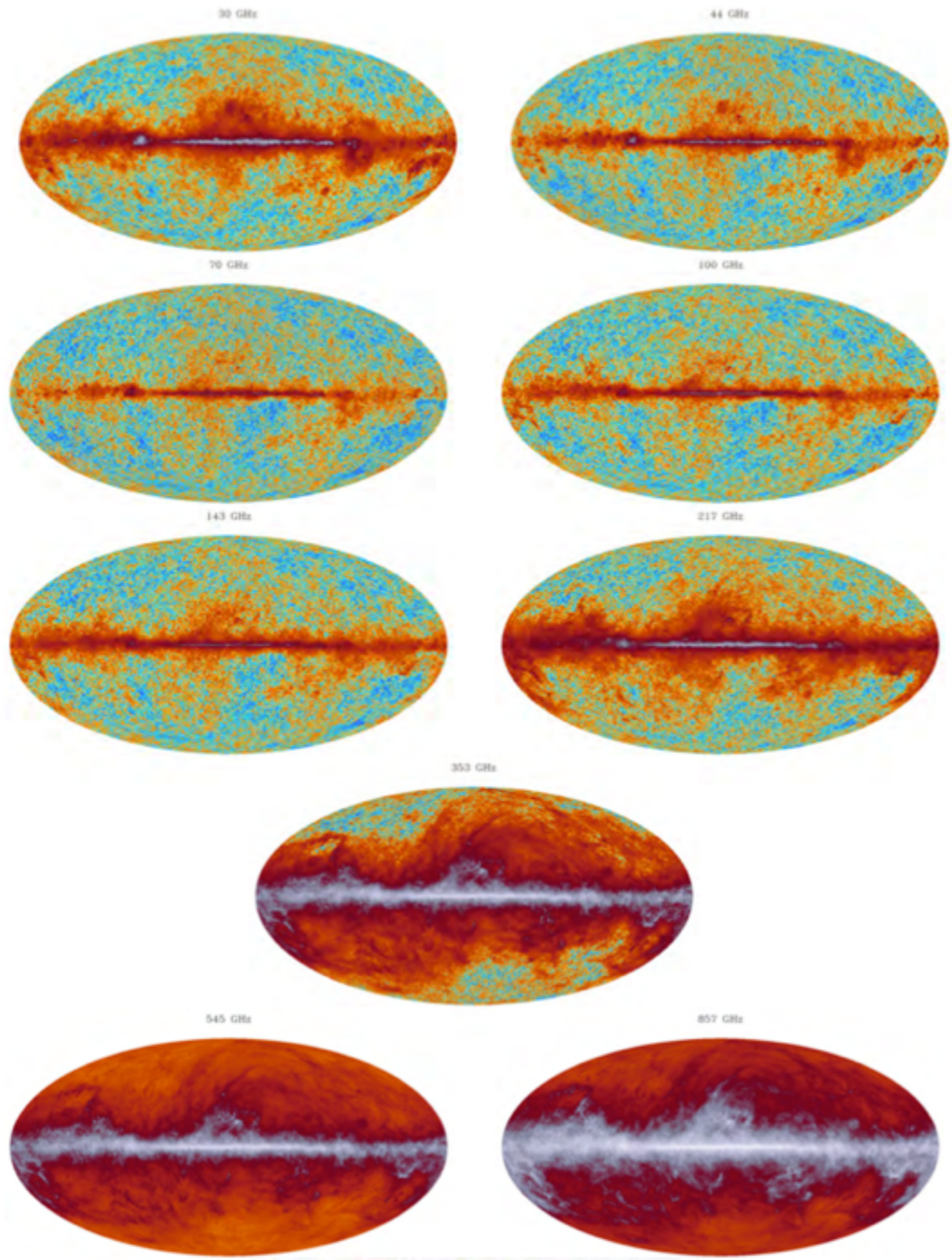












30-353 GHz: δT [μK_{mb}]; 545 and 857 GHz: surface brightness [kJy/sr]

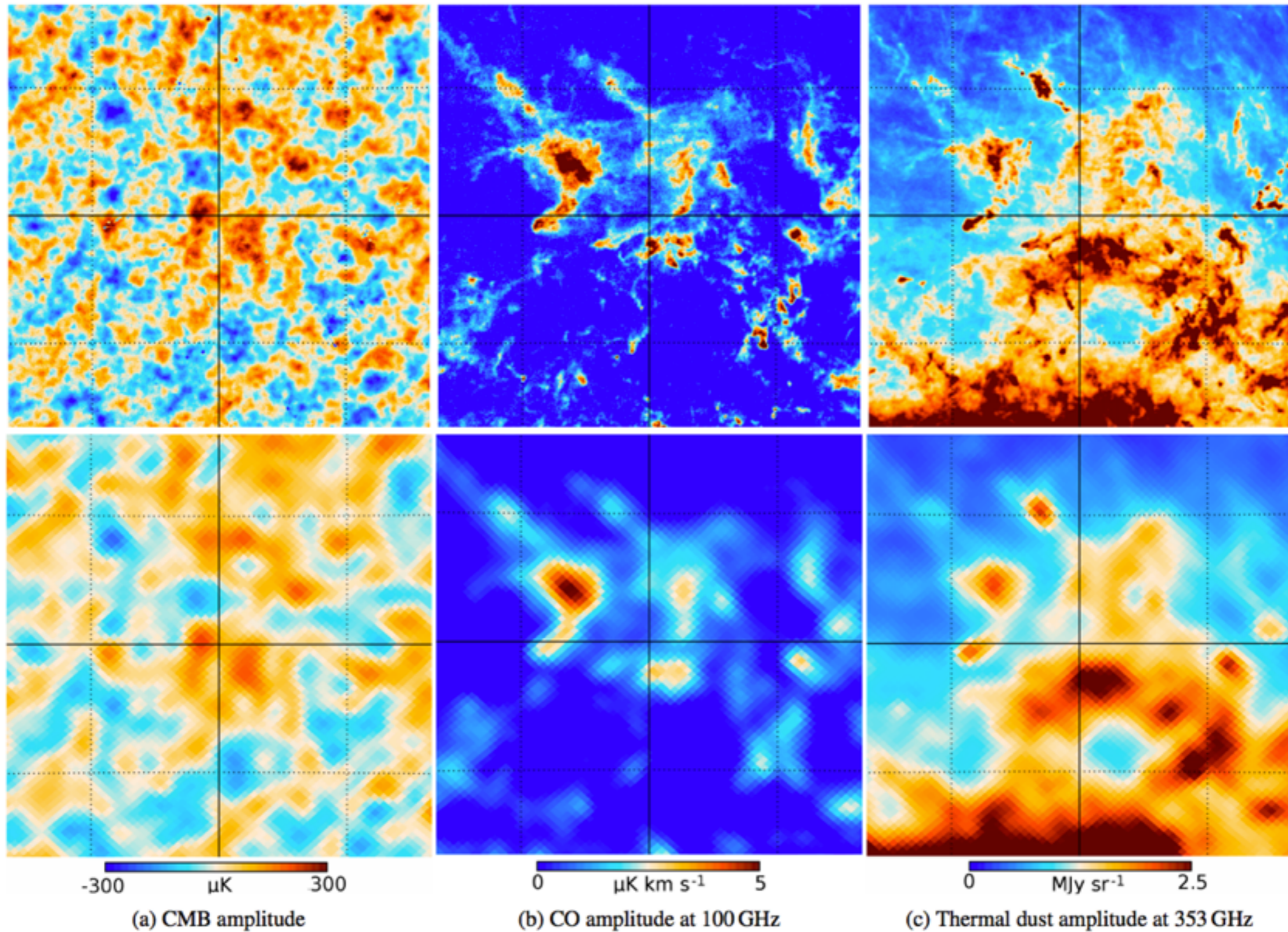


Fig. 18: Comparison of the high-resolution Ru1er (top) and low-resolution Commander (bottom) amplitude maps for a particularly strong CO complex near the Fan region; the maps are centred on Galactic coordinates $(l, b) = (110^\circ, 15^\circ)$, and the grid spacing is 5° . Columns show, left to right: the CMB amplitude; the CO amplitude at 100 GHz and the thermal dust amplitude at 353 GHz.



Résultats de Planck

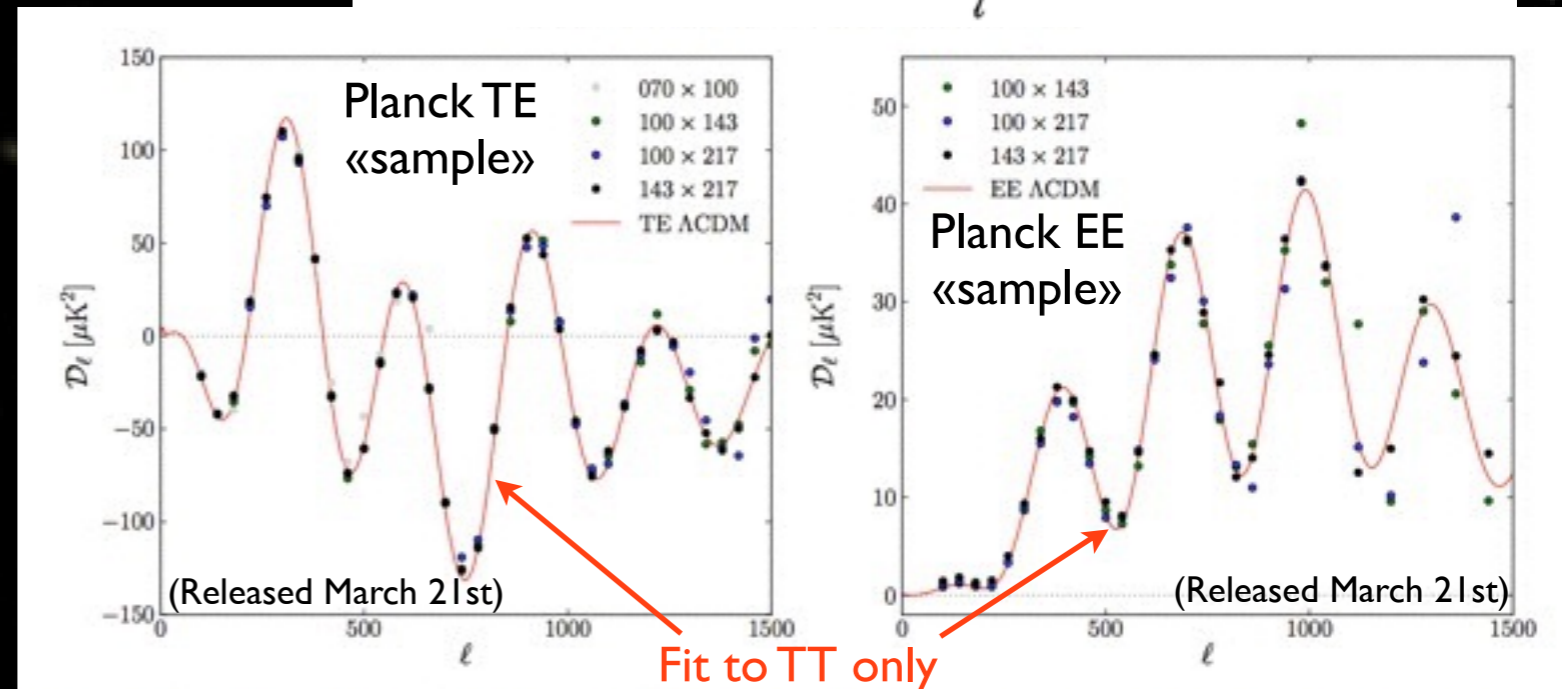
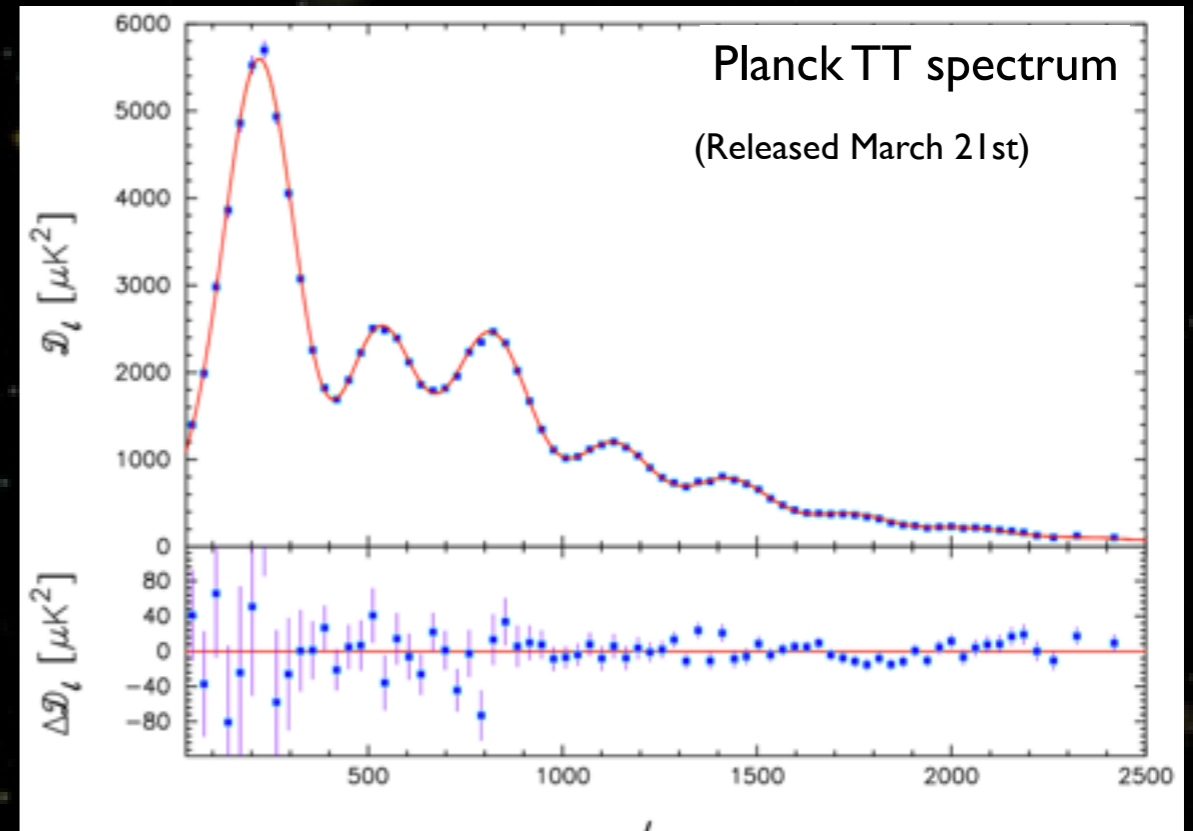
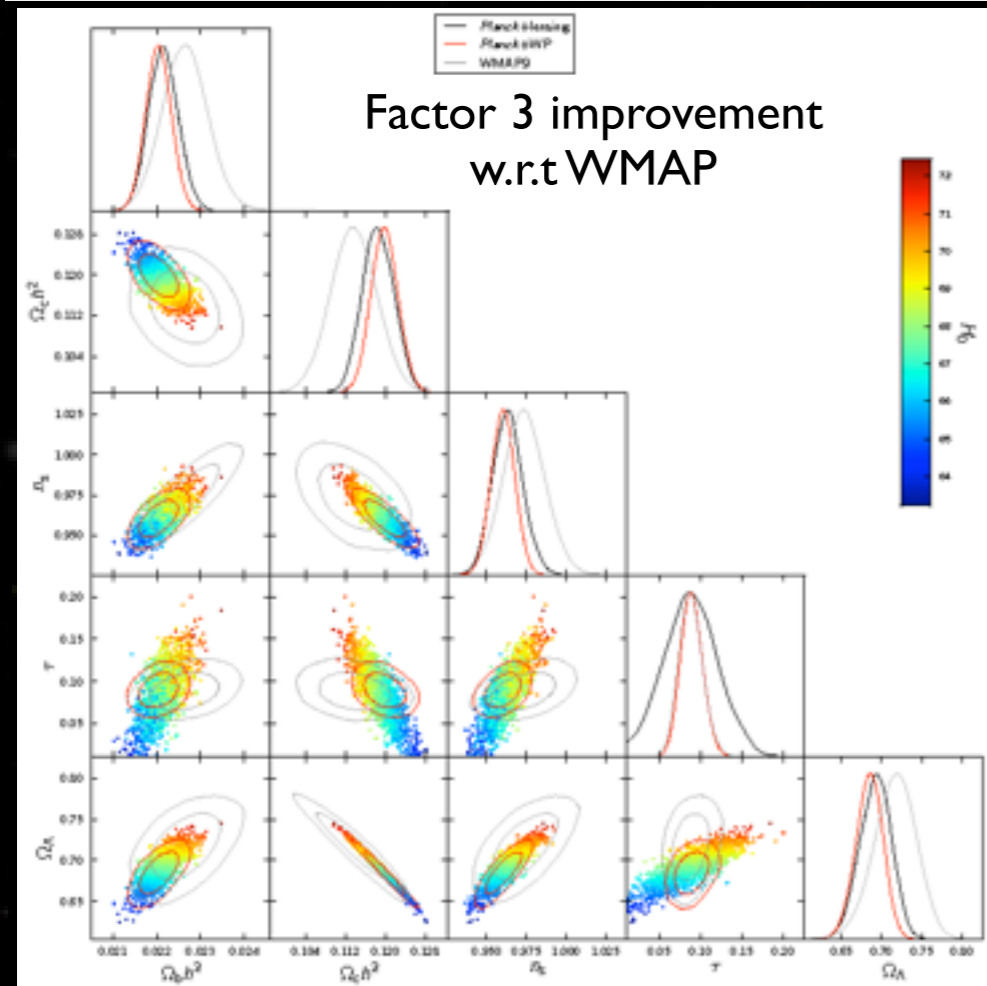
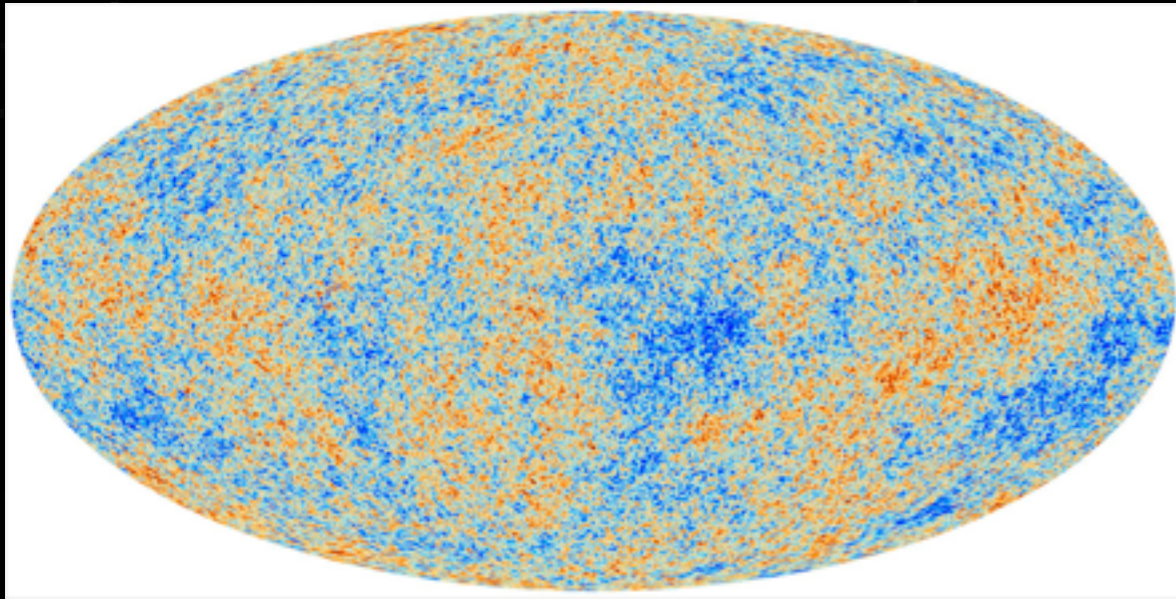


Figure 31. Planck TE and EE polarisation spectra computed as described in the text, together with the polarisation spectra predicted from the six-parameter Λ CDM model, fit only to the Planck temperature data.



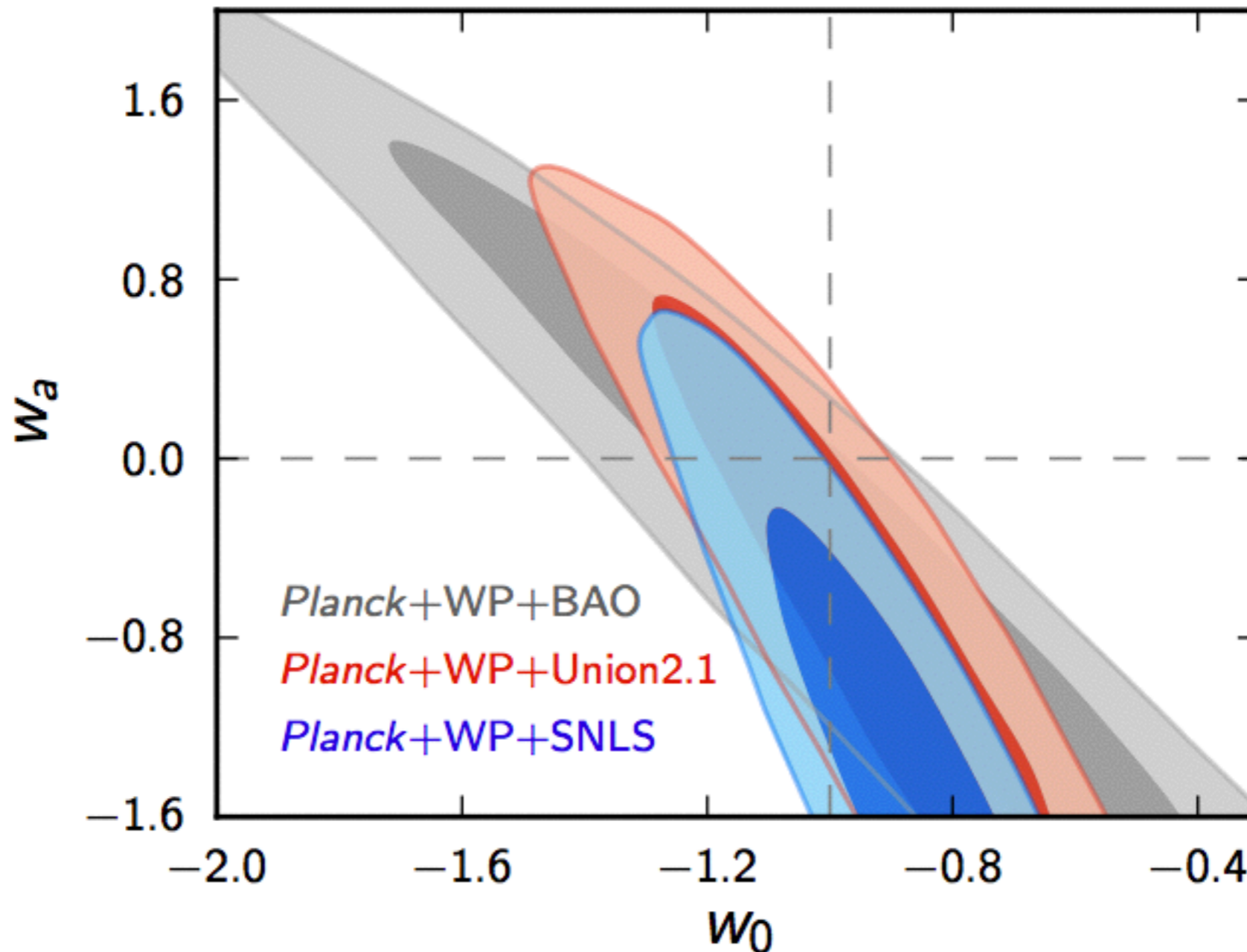
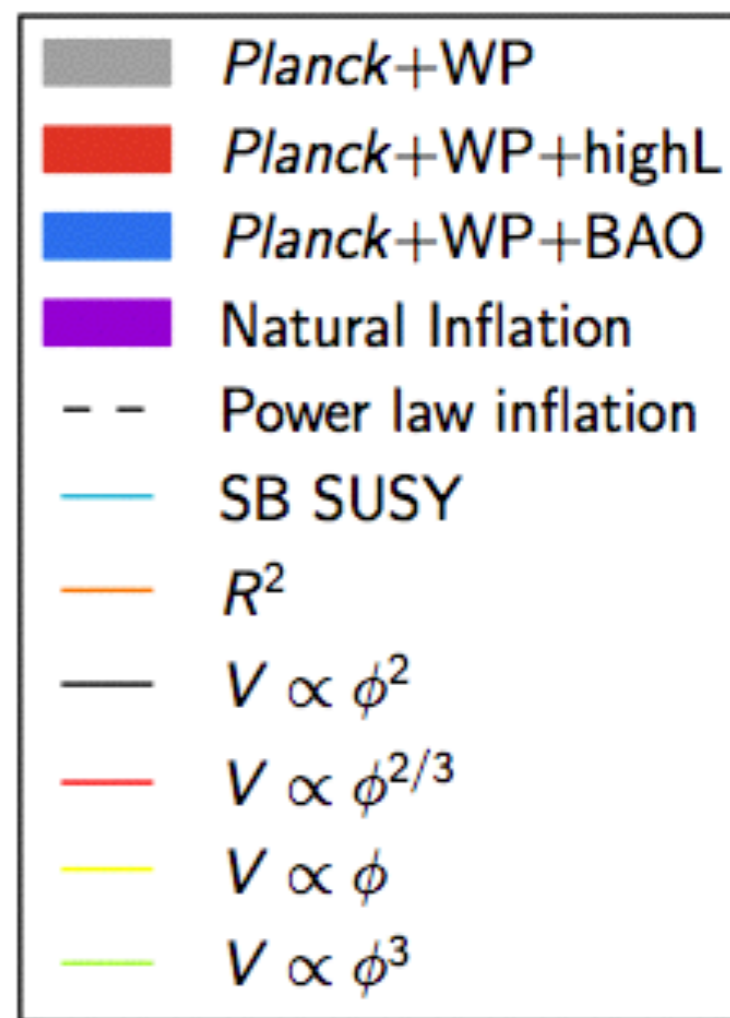
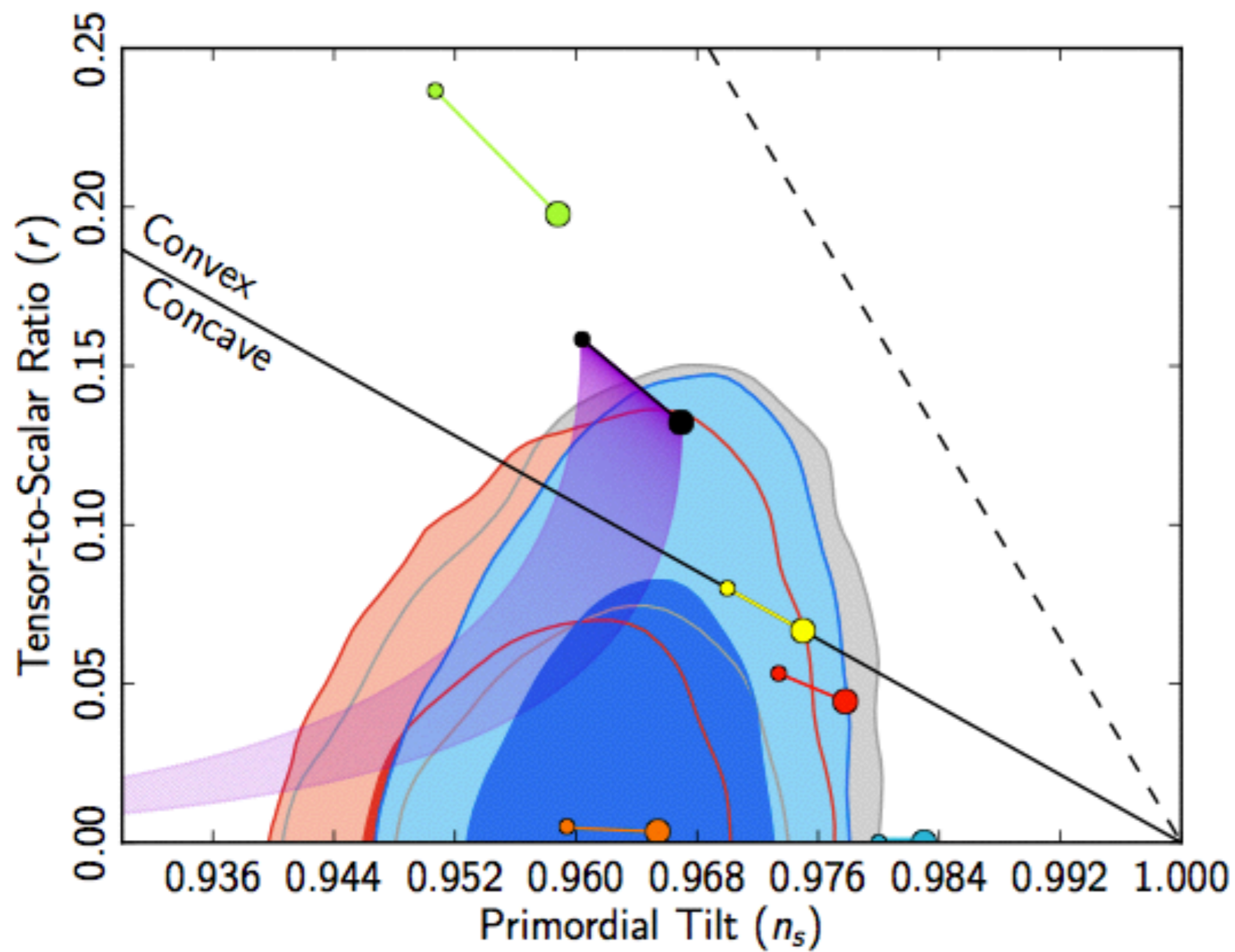


Fig. 36. 2D marginalized posterior distributions for w_0 and w_a , for the data combinations *Planck+WP+BAO* (grey), *Planck+WP+Union2.1* (red) and *Planck+WP+SNLS* (blue). The contours are 68% and 95%, and dashed grey lines show the cosmological constant solution.





Planck Collaboration: Cosmological parameters

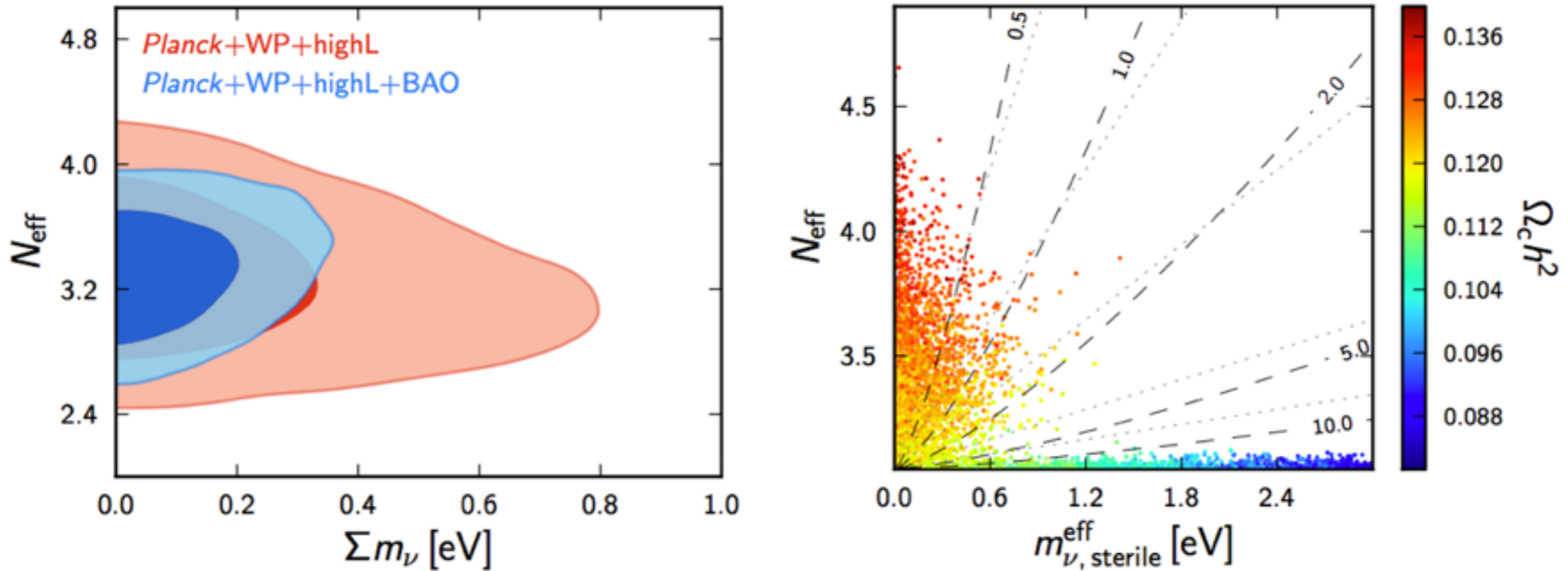
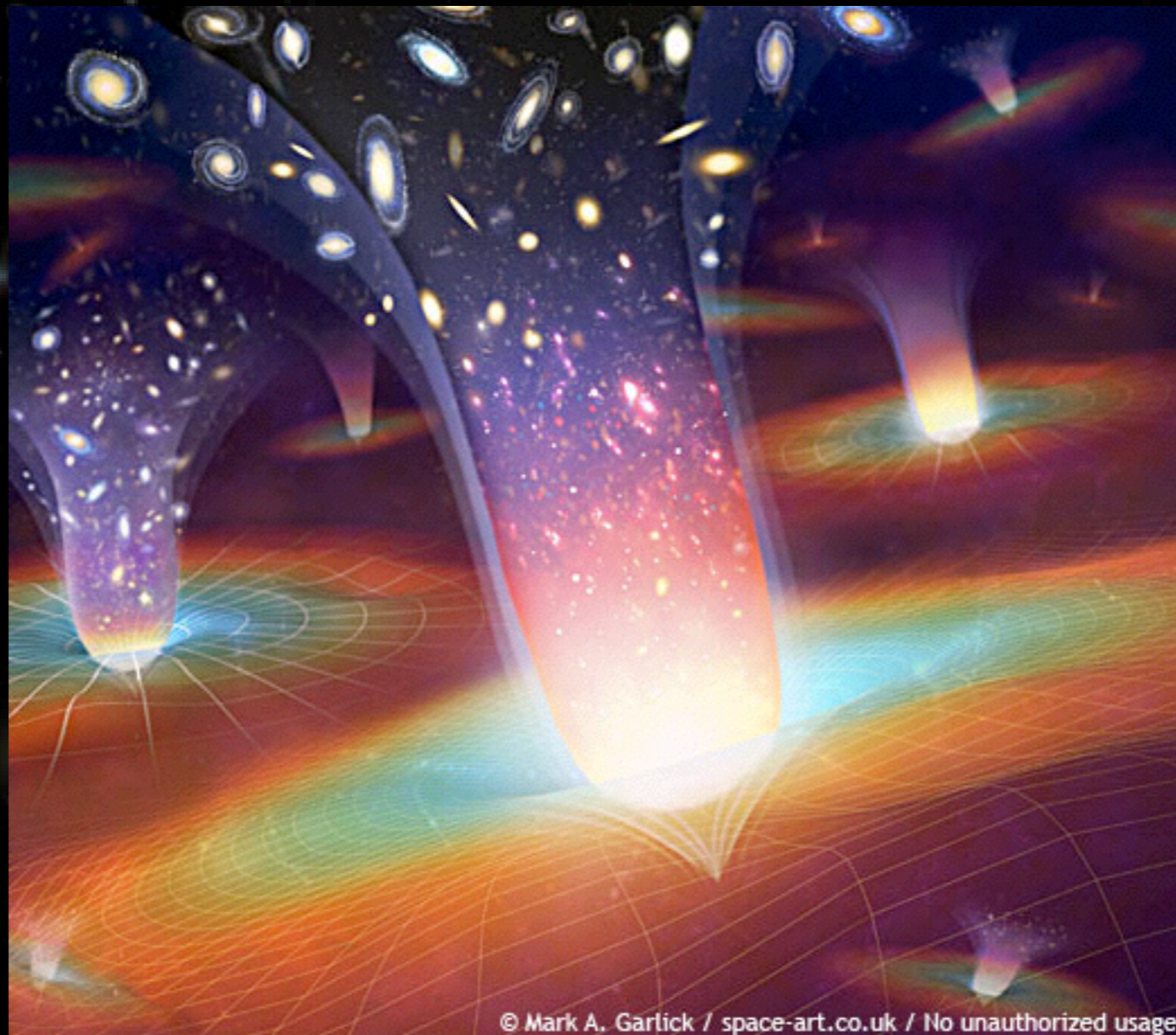


Fig. 28. *Left:* 2D joint posterior distribution between N_{eff} and $\sum m_\nu$ (the summed mass of the three active neutrinos) in models with extra massless neutrino-like species. *Right:* Samples in the $N_{\text{eff}}-m_{\nu, \text{sterile}}^{\text{eff}}$ plane, colour-coded by $\Omega_c h^2$, in models with one massive sterile neutrino family, with effective mass $m_{\nu, \text{sterile}}^{\text{eff}}$, and the three active neutrinos as in the base Λ CDM model. The physical mass of the sterile neutrino in the thermal scenario, $m_{\text{sterile}}^{\text{thermal}}$, is constant along the grey dashed lines, with the indicated mass in eV. The physical mass in the Dodelson-Widrow scenario, $m_{\text{sterile}}^{\text{DW}}$, is constant along the dotted lines (with the value indicated on the adjacent dashed lines).



L'inflation et l'Univers primordial



© Mark A. Garlick / space-art.co.uk / No unauthorized usage



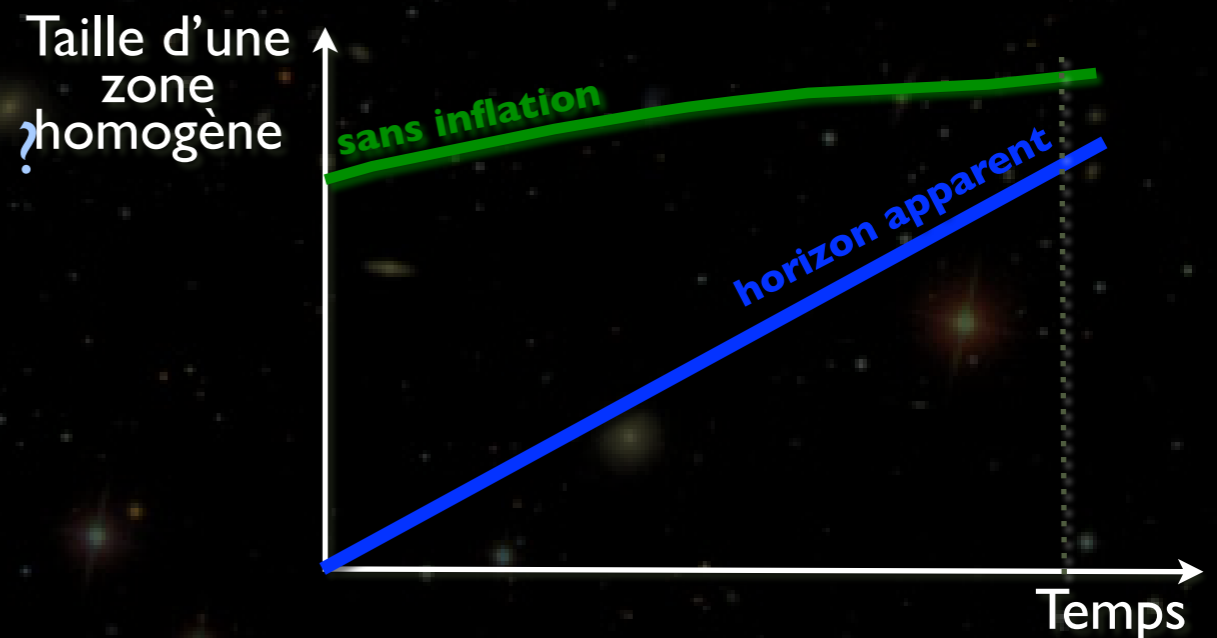
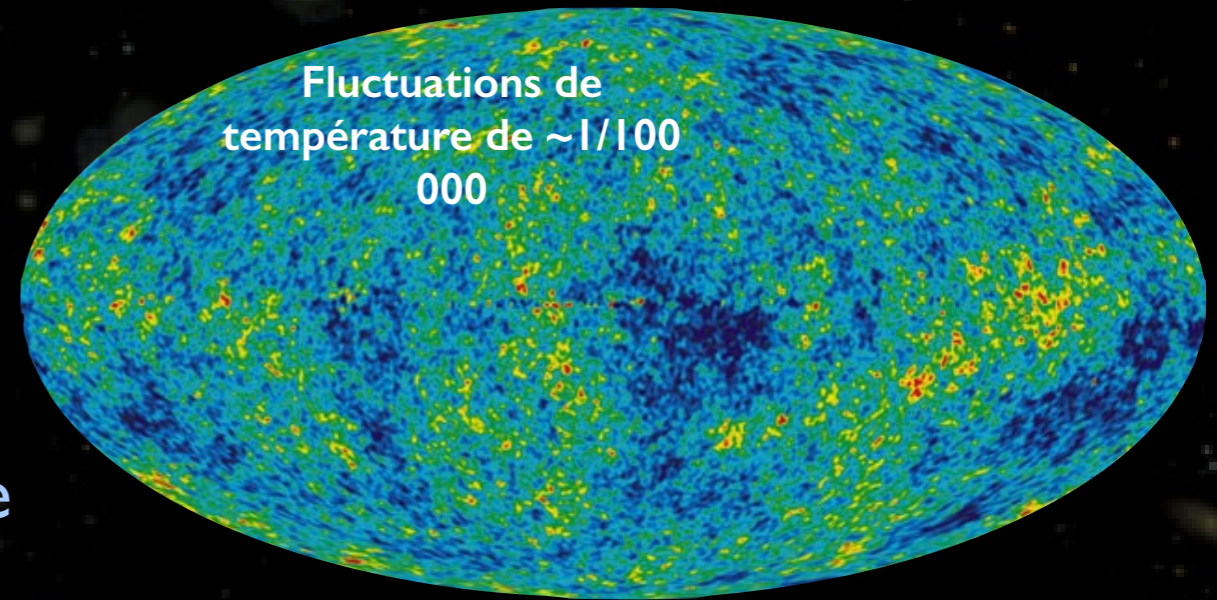
L'inflation

- Expansion accélérée aux premiers instants de l'Univers.
- Résout des paradoxes connus du modèle du Big-Bang
 - ★ Horizon
 - ★ Platitude
 - ★ Monopoles
- Prédit la forme des fluctuations de densité primordiales
 - ★ Graines pour la formation des structures
 - ★ Gaussianité
 - ★ présence de modes scalaires et tenseurs
 - ★ indice spectral proche légèrement inférieur à 1
- Tous les modèles ajustés sur le CMB, les modèles de formation des structures, supposent implicitement une inflation
 - ★ On aimerait quand même vérifier ...



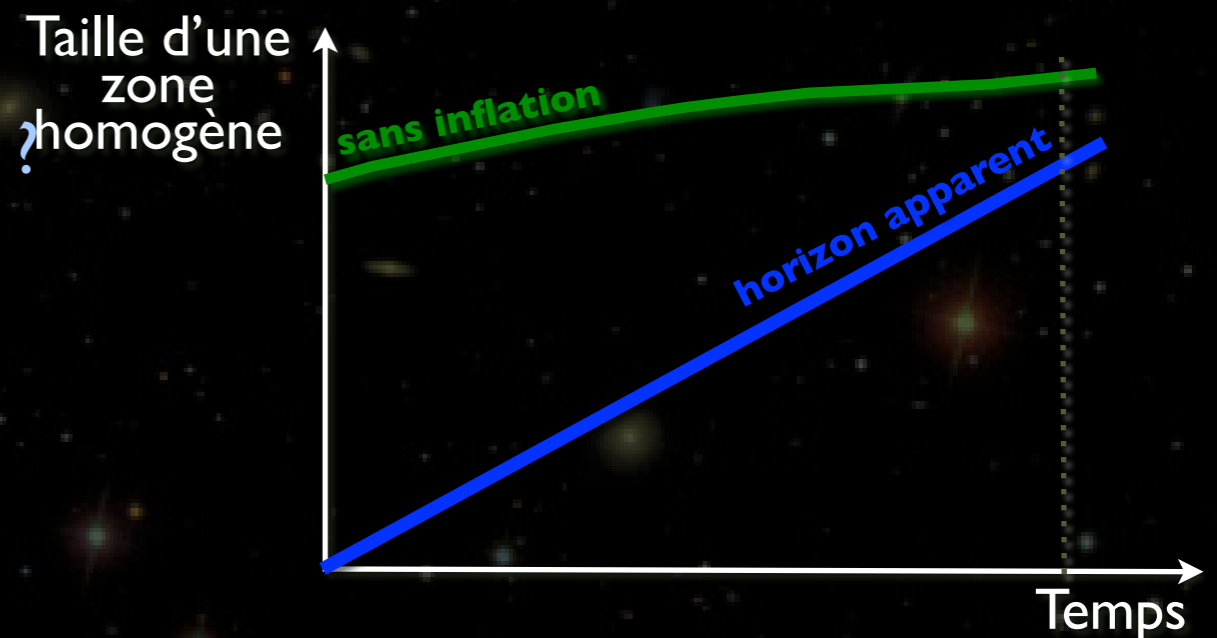
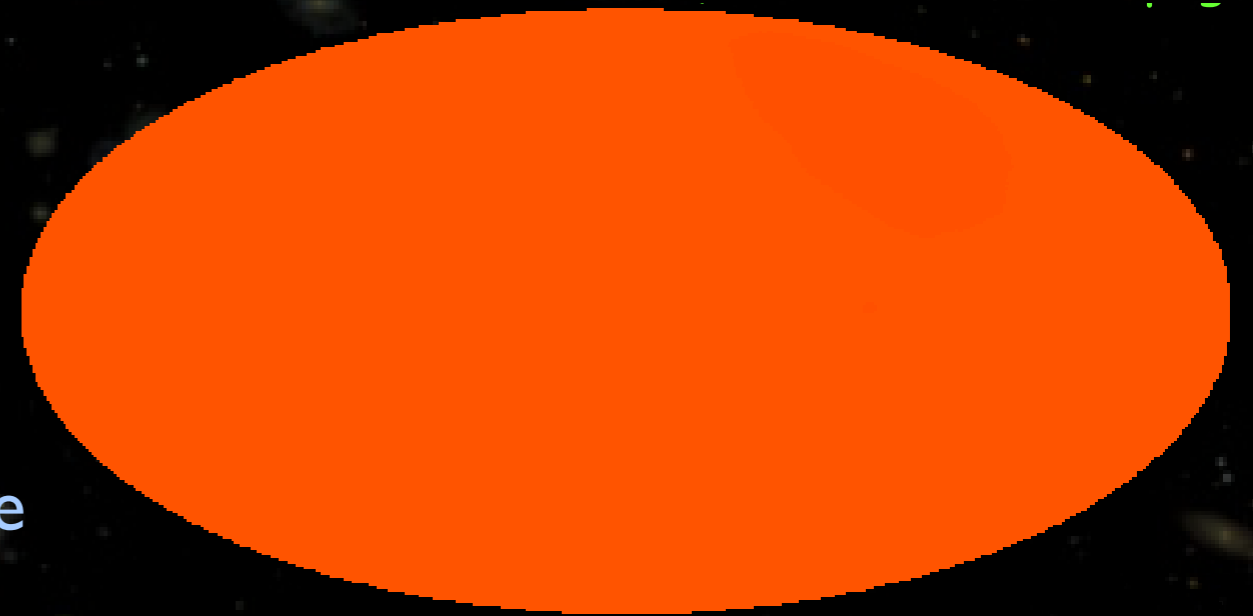
Problème de l'horizon

- L'Univers est très homogène aux grandes échelles
- Cela signe un processus de «thermalisation» dans l'Univers jeune
- Or l'horizon au moment du découplage était ~ 1 degré
- Comment des zones déconnectées causalement se sont-elles thermalisées ?
- **Solution : Inflation**



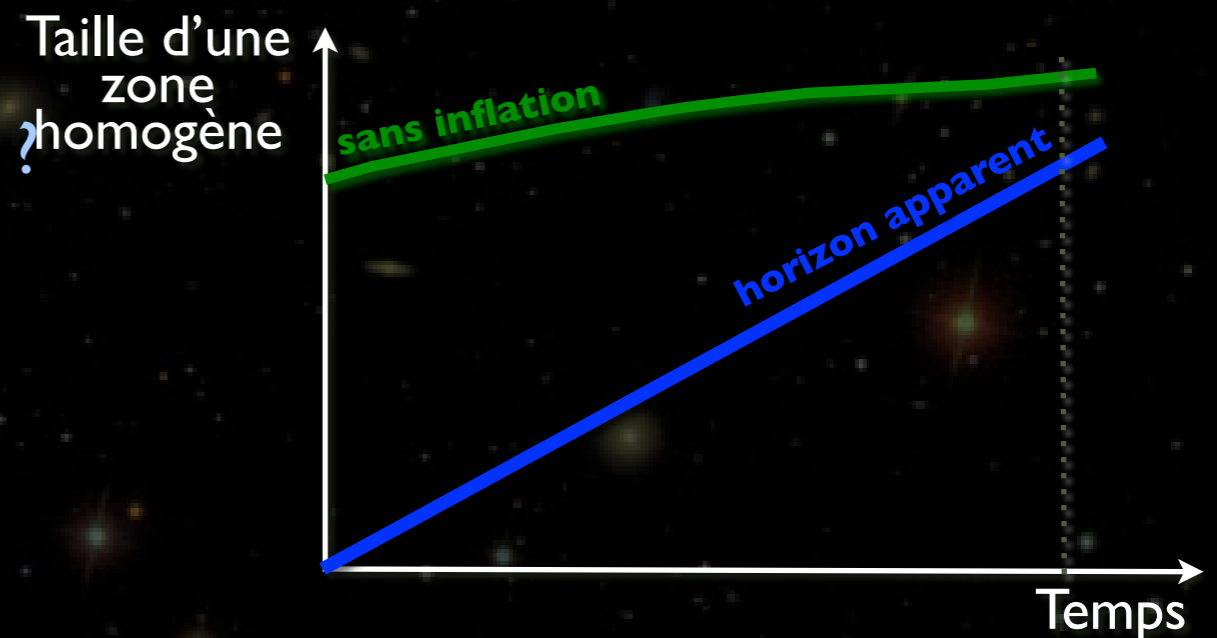
Problème de l'horizon

- L'Univers est très homogène aux grandes échelles
- Cela signe un processus de «thermalisation» dans l'Univers jeune
- Or l'horizon au moment du découplage était ~ 1 degré
- Comment des zones déconnectées causalement se sont-elles thermalisées ?
- **Solution : Inflation**



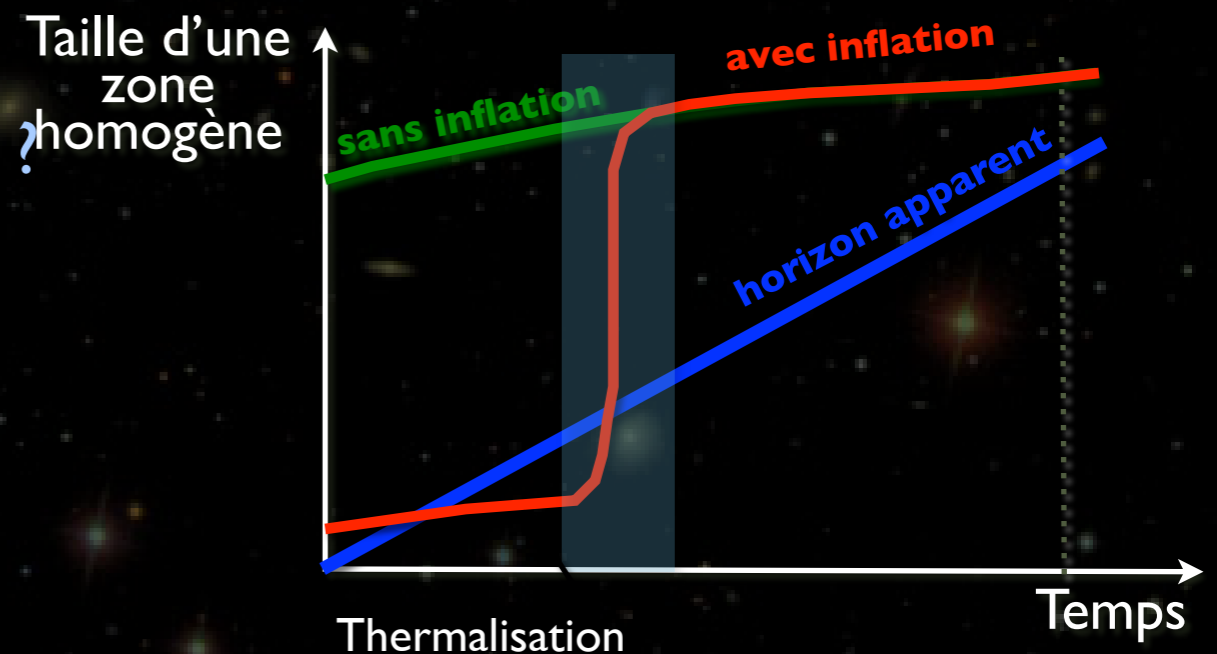
Problème de l'horizon

- L'Univers est très homogène aux grandes échelles
- Cela signe un processus de «thermalisation» dans l'Univers jeune
- Or l'horizon au moment du découplage était ~ 1 degré
- Comment des zones déconnectées causalement se sont-elles thermalisées ?
- **Solution : Inflation**



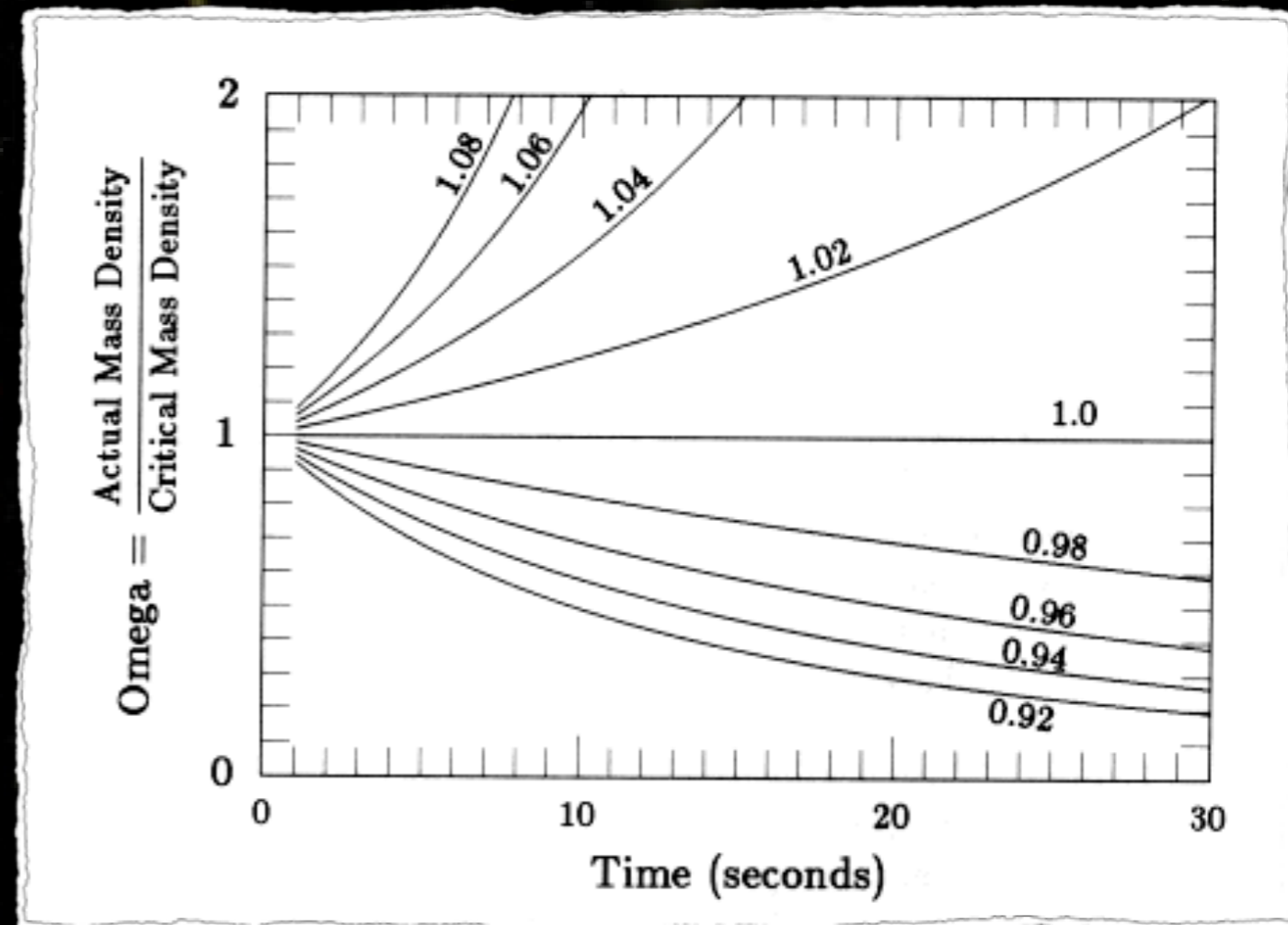
Problème de l'horizon

- L'Univers est très homogène aux grandes échelles
- Cela signe un processus de «thermalisation» dans l'Univers jeune
- Or l'horizon au moment du découplage était ~ 1 degré
- Comment des zones déconnectées causalement se sont-elles thermalisées ?
- **Solution : Inflation**



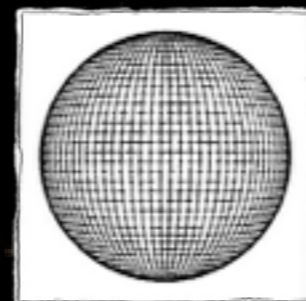
Problème de la platitude

- $\Omega_{\text{tot}}=1$ est «instable»
 - le moindre écart à la platitude à $t=0$ se traduirait aujourd'hui par un écart considérable
 - or on mesure $\Omega_{\text{tot}}=1$ avec 1% de précision !
 \Rightarrow à $t=10^{-43}$ sec : $|\Omega_{\text{tot}}-1| < 10^{-60}$



- Il faut un processus pour «aplatir» l'Univers

- Solution : Inflation

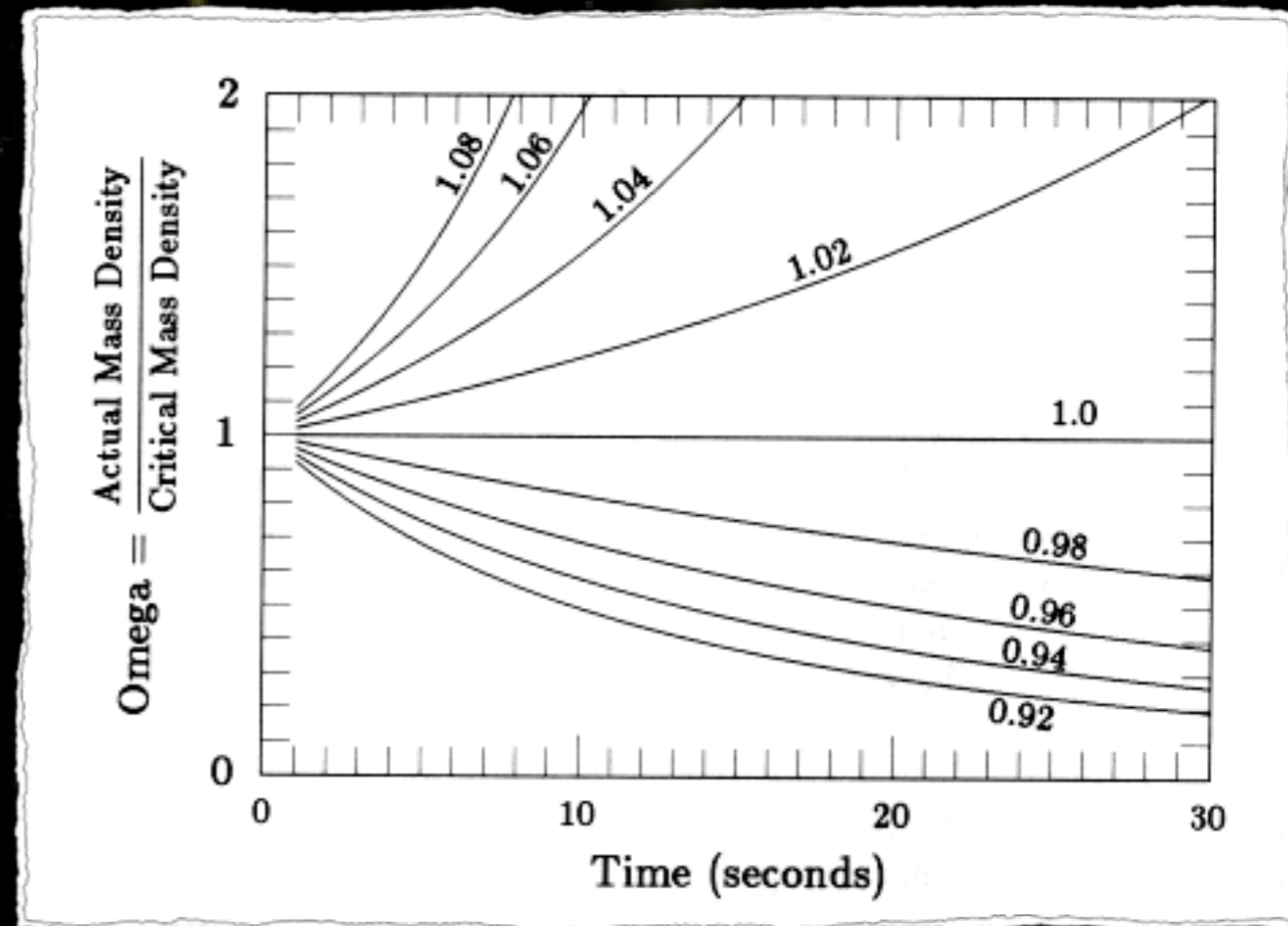


A. Guth



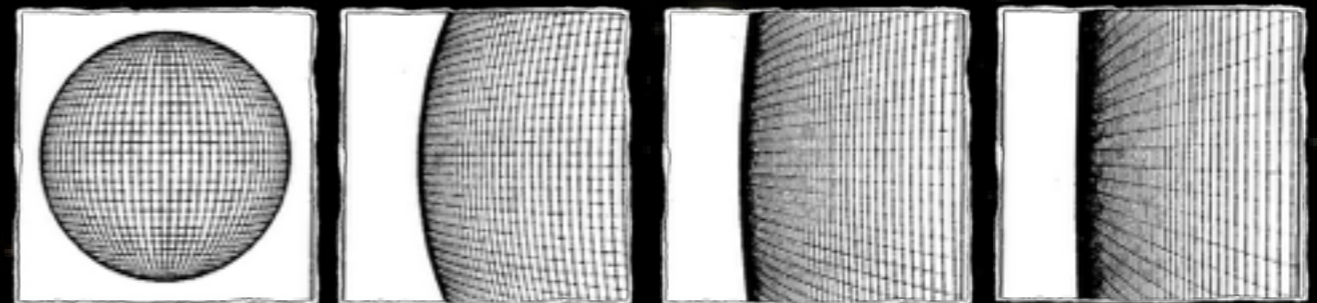
Problème de la platitude

- $\Omega_{\text{tot}}=1$ est «instable»
 - le moindre écart à la platitude à $t=0$ se traduirait aujourd'hui par un écart considérable
 - or on mesure $\Omega_{\text{tot}}=1$ avec 1% de précision !
 \Rightarrow à $t=10^{-43}$ sec : $|\Omega_{\text{tot}}-1| < 10^{-60}$



- Il faut un processus pour «aplatir» l'Univers

- Solution : Inflation



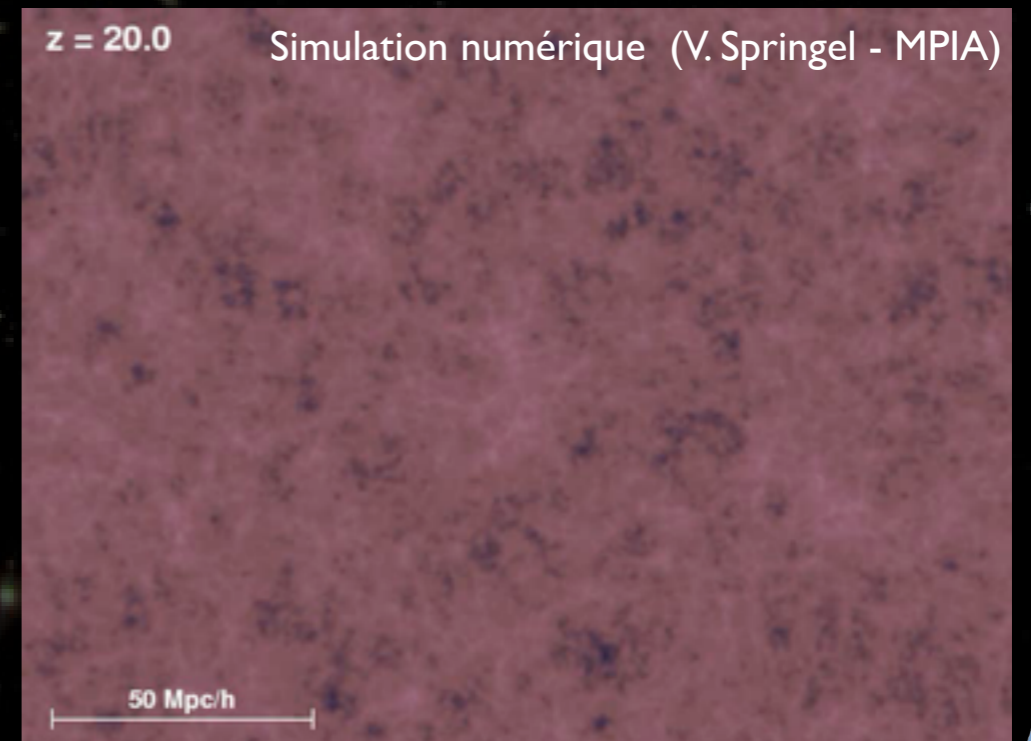
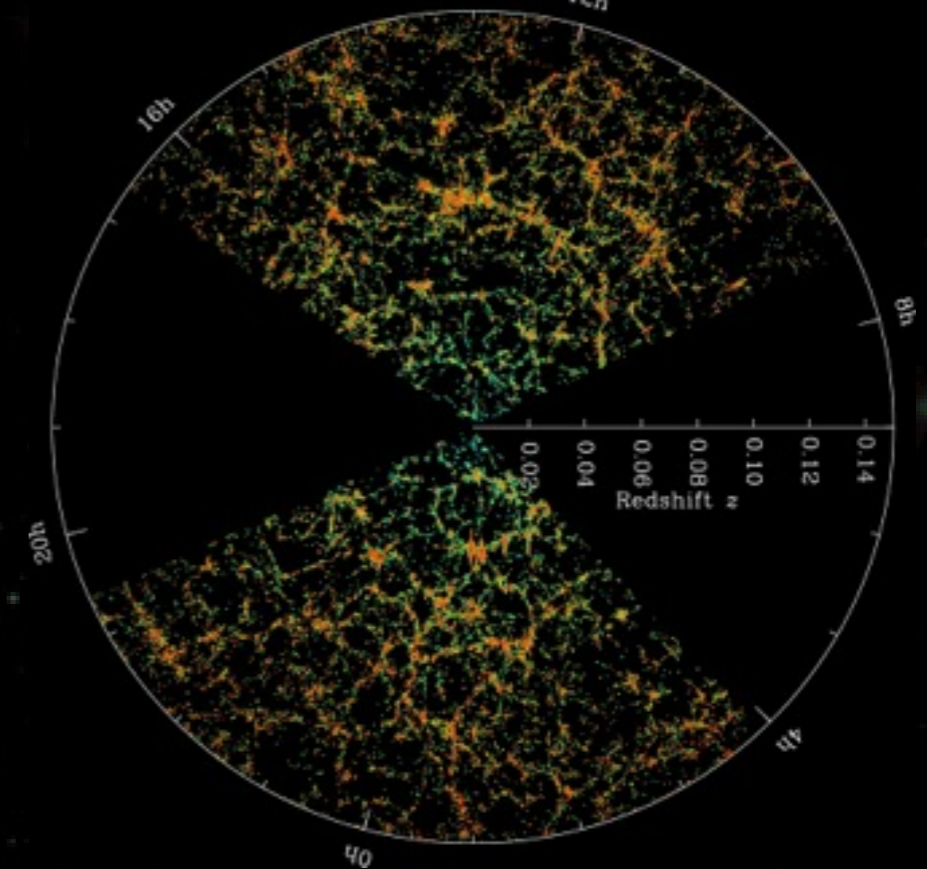
A. Guth



D'où viennent les structures ?

- On observe de nombreuses structures denses autour de nous (galaxies, amas, filaments)
- le Big-Bang «simple» n'explique pas leur origine
- si on «suppose» les graines alors on explique bien les structures
- Deux alternatives :
 - ★ conditions initiales ad-hoc
 - ★ processus permettant de les générer : **L'inflation**

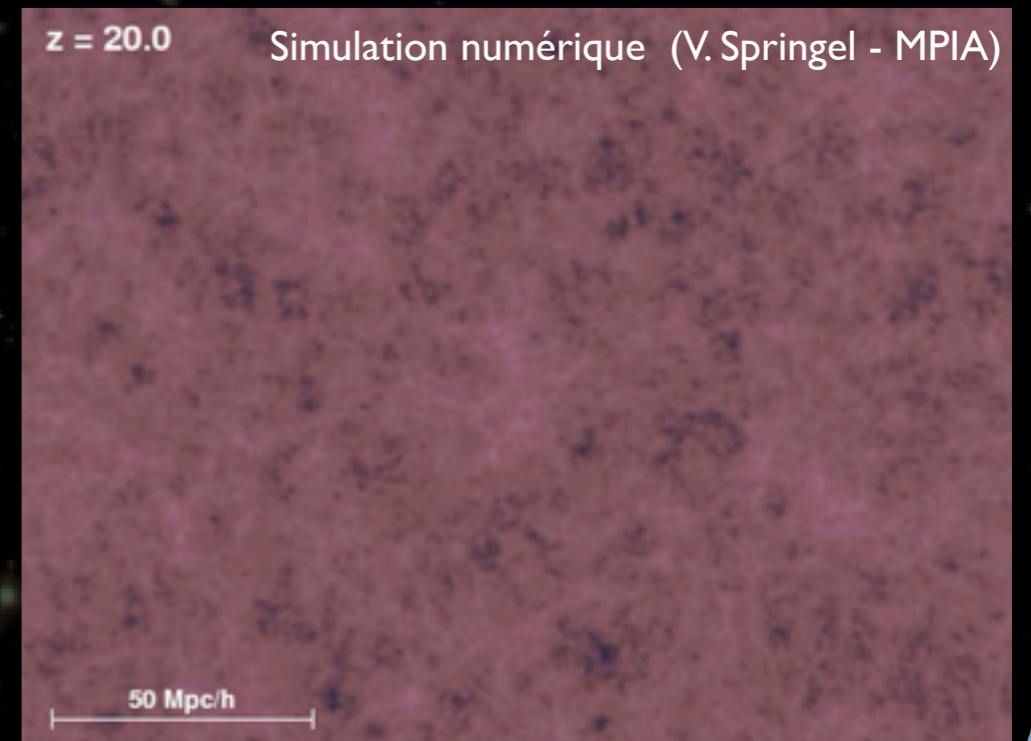
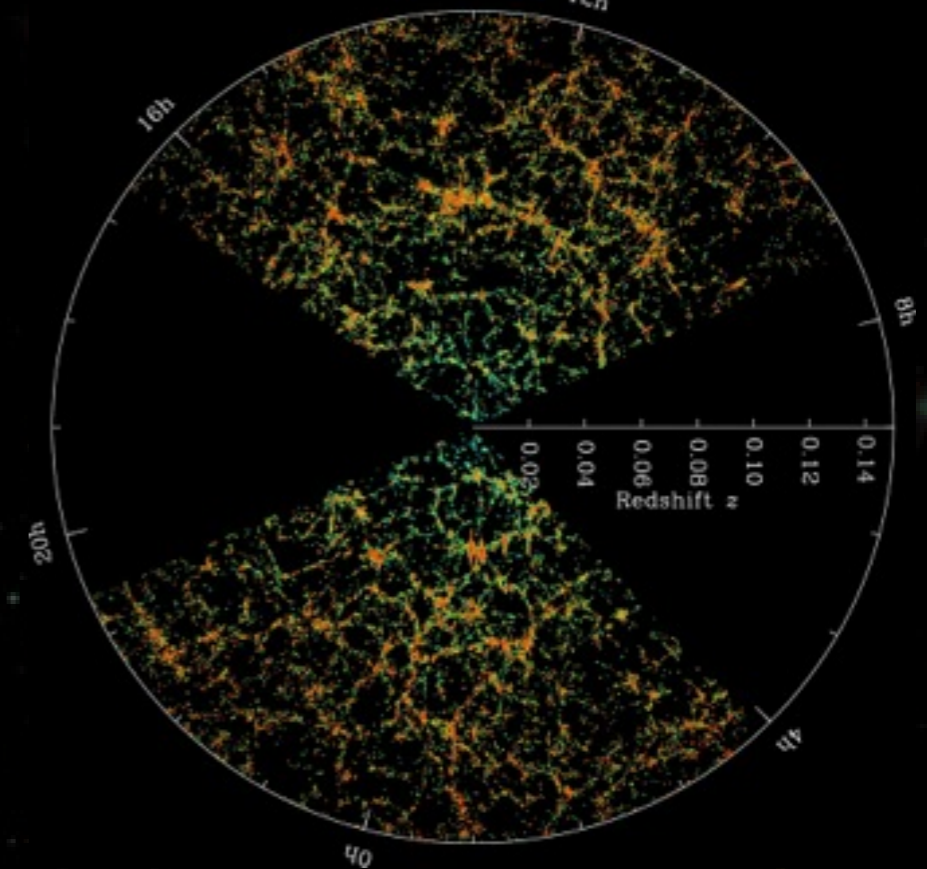
Galaxies dans une tranche en déclinaison de SDSS



D'où viennent les structures ?

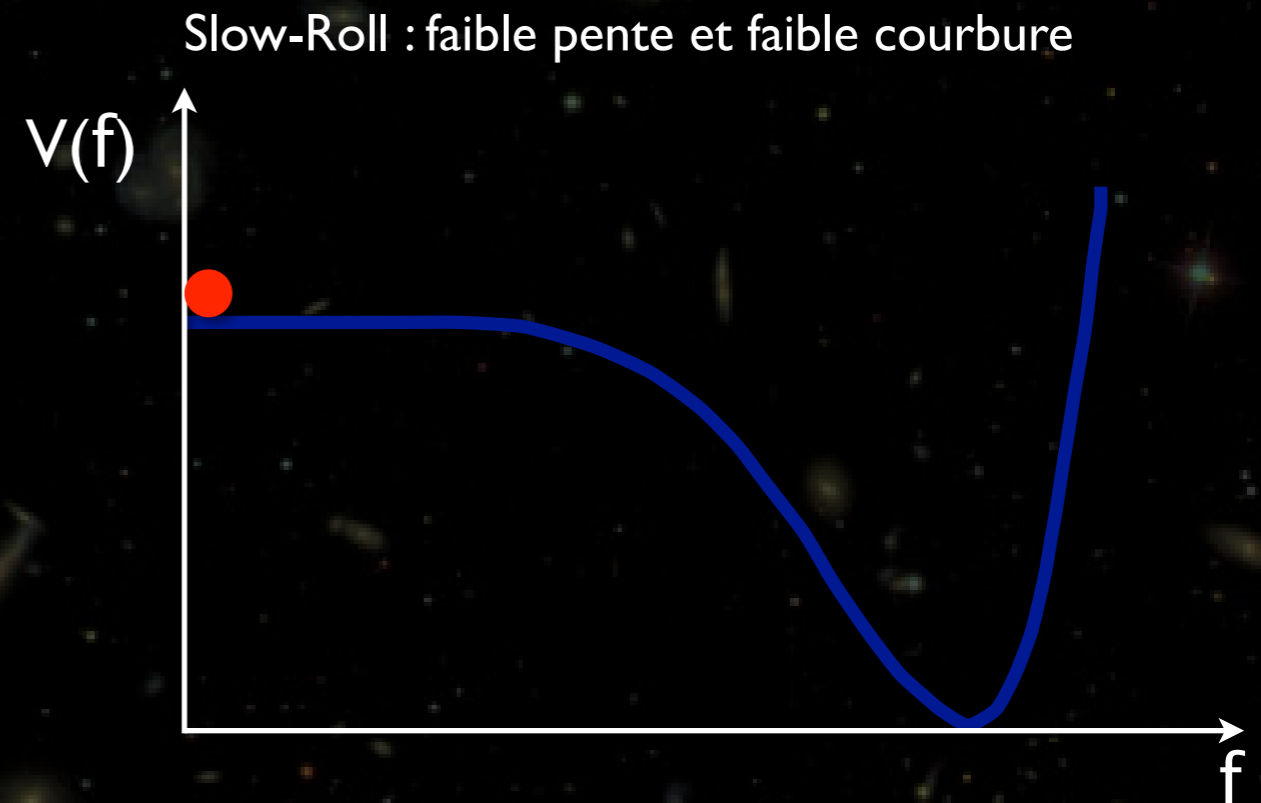
- On observe de nombreuses structures denses autour de nous (galaxies, amas, filaments)
- le Big-Bang «simple» n'explique pas leur origine
- si on «suppose» les graines alors on explique bien les structures
- Deux alternatives :
 - ★ conditions initiales ad-hoc
 - ★ processus permettant de les générer : **L'inflation**

Galaxies dans une tranche en déclinaison de SDSS



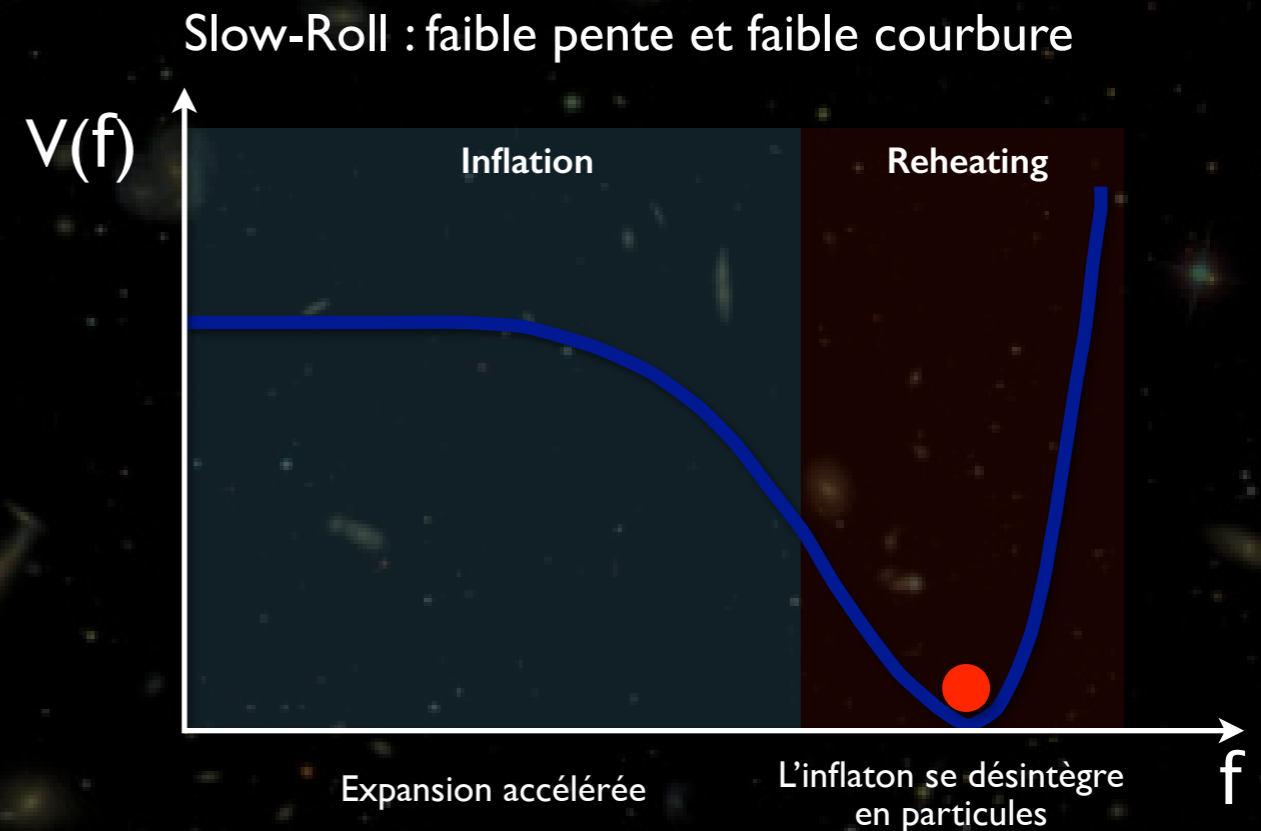
La Phase d'inflation

- Un champ scalaire, l'inflaton, domine l'Univers primordial
- Potentiel de slow-roll
⇒ expansion accélérée ⇔ inflation
- L'inflation s'arrête quand le champ approche de son minimum
⇒ Reheating : production de particules
- L'univers suit alors une évolution classique



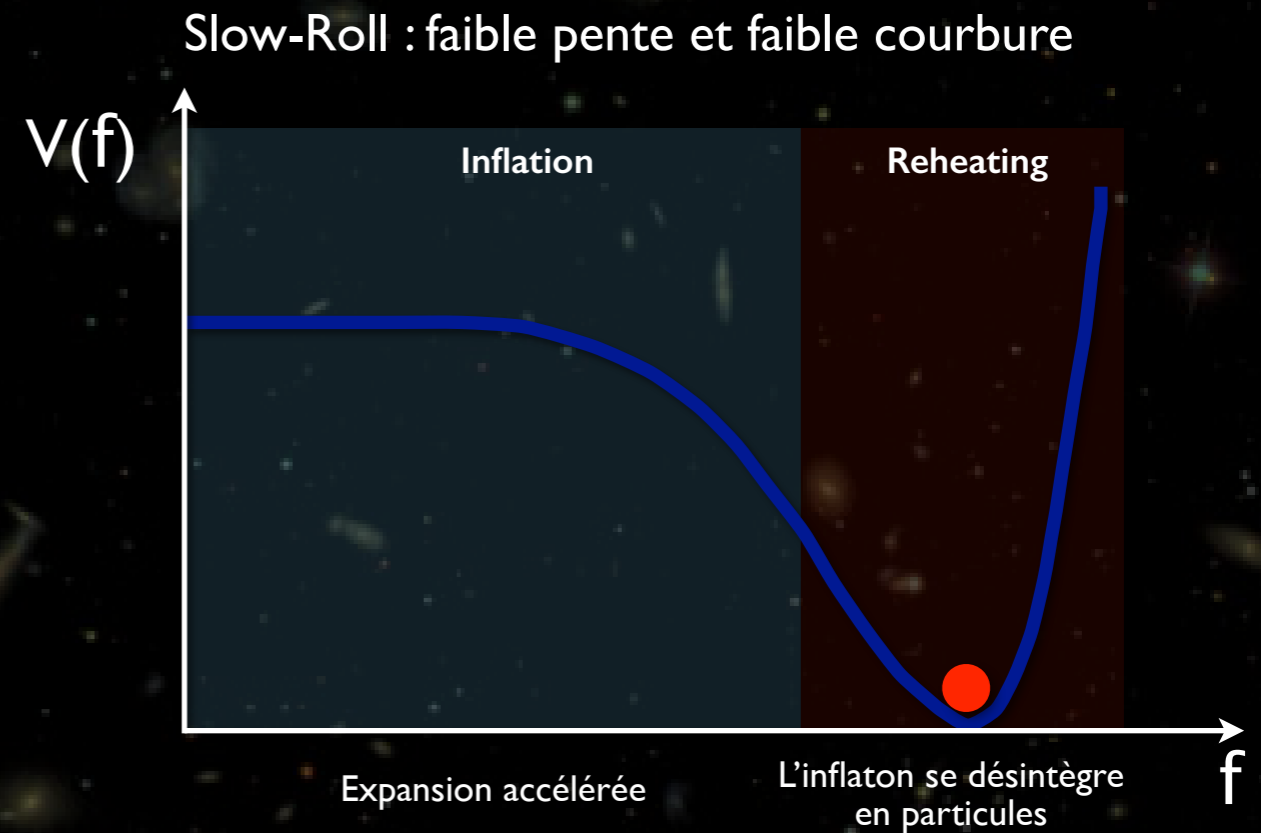
La Phase d'inflation

- Un champ scalaire, l'inflaton, domine l'Univers primordial
- Potentiel de slow-roll
⇒ expansion accélérée ⇔ inflation
- L'inflation s'arrête quand le champ approche de son minimum
⇒ Reheating : production de particules
- L'univers suit alors une évolution classique



La Phase d'inflation

- Un champ scalaire, l'inflaton, domine l'Univers primordial
- Potentiel de slow-roll
⇒ expansion accélérée ⇔ inflation
- L'inflation s'arrête quand le champ approche de son minimum
⇒ Reheating : production de particules
- L'univers suit alors une évolution classique



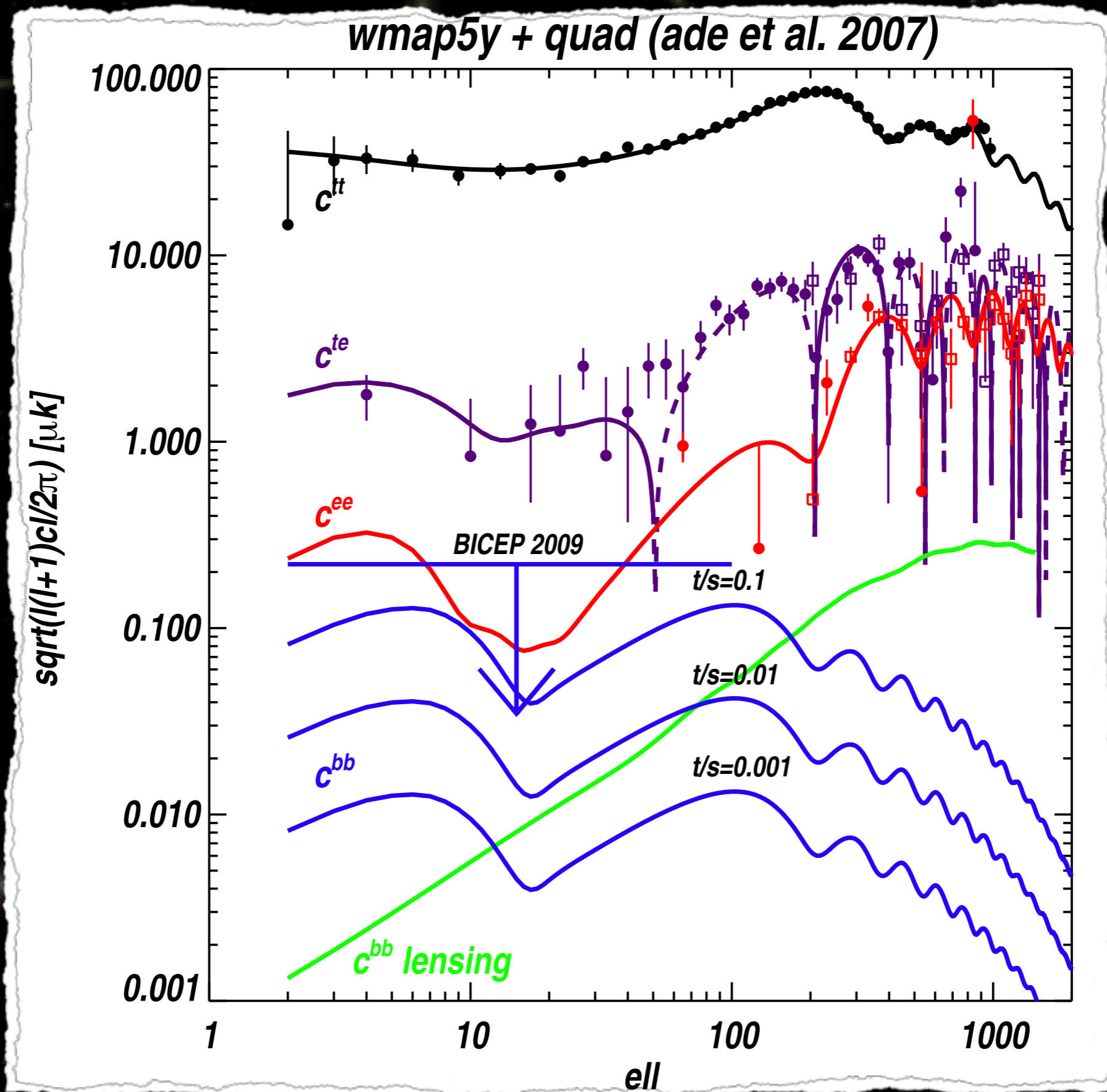
les fluctuations quantiques du potentiel de l'inflaton sont «grossies» par l'inflation et donnent des fluctuations macroscopiques dont on peut prédire la forme

⇒ graines pour la formation des structures

- modes scalaires et tenseurs
- spectre presque invariant d'échelle
- fluctuations presque gaussiennes

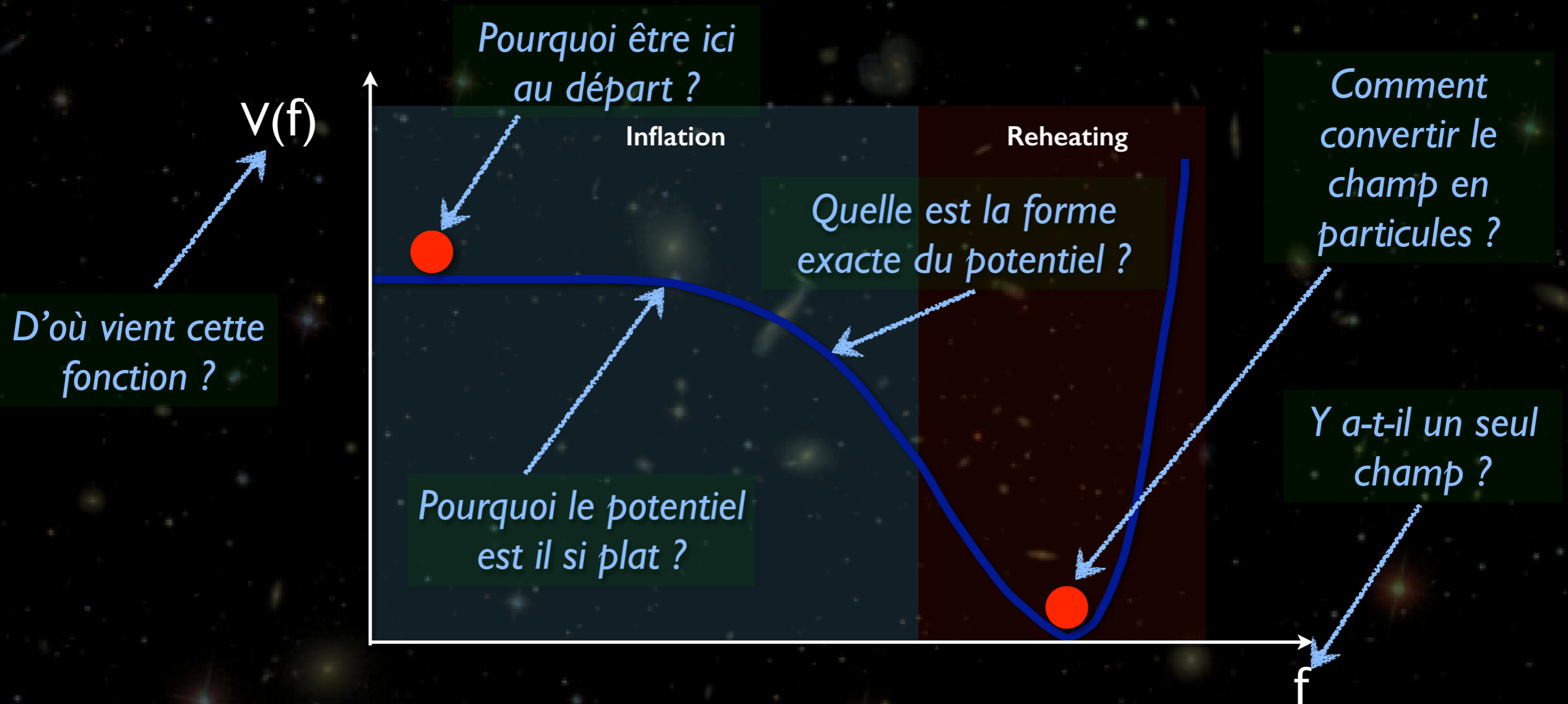


Prédictions de l'inflation



Beaucoup de questions

a.k.a. «rien n'est gratuit dans ce bas monde»



Le CMB (température et polarisation) contient des réponses à ces questions fondamentales mais actuellement, presque tous les modèles d'inflation sont compatibles avec les données



Modes Scalaires & tenseurs

Polarisation E & B

- **Perturbations scalaires** $P_s(k) = A_s \left(\frac{k}{k_0} \right)^{n_s - 1}$

- **Fluctuations de densité**

- Température
- Polarisation E
- Pas de Polarisation B

$$\sigma_{scal}^T \simeq 100 \mu\text{K}$$

$$\sigma_{scal}^E \simeq 4 \mu\text{K}$$

- **Perturbations tensorielles** $P_r(k) = A_t \left(\frac{k}{k_0} \right)^{n_t}$

- Prédiction spécifique de l'inflation !
- Ondes gravitationnelles primordiales

- Température
- Polarisation E
- Polarisation B

$$\sigma_{tens}^T \leq 30 \mu\text{K}$$

$$\sigma_{tens}^E \leq 1 \mu\text{K}$$

$$\sigma_{tens}^B \leq 0.3 \mu\text{K}$$

$$r = \frac{P_t(k_0)}{P_s(k_0)}$$

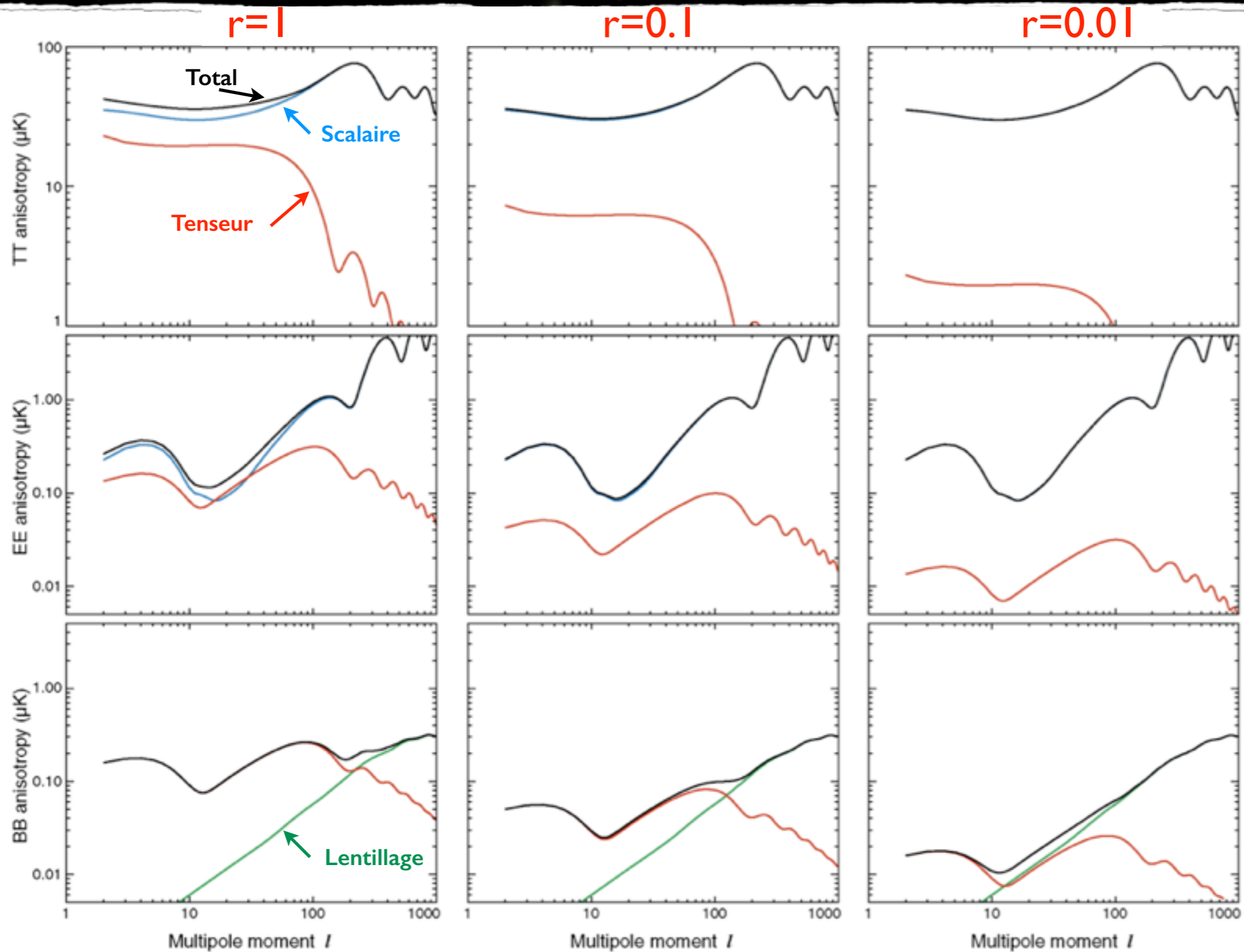
~ rapport entre modes B et E

⇒ détecter les modes B c'est :

- ▶ Mettre en évidence les modes tenseurs
- ▶ «Prouver» qu'il y a eu inflation
- ▶ Mesurer son échelle en énergie

$$V^{1/4} = 1.06 \times 10^{16} \text{ GeV} \left(\frac{r_{\text{CMB}}}{0.01} \right)^{1/4}$$

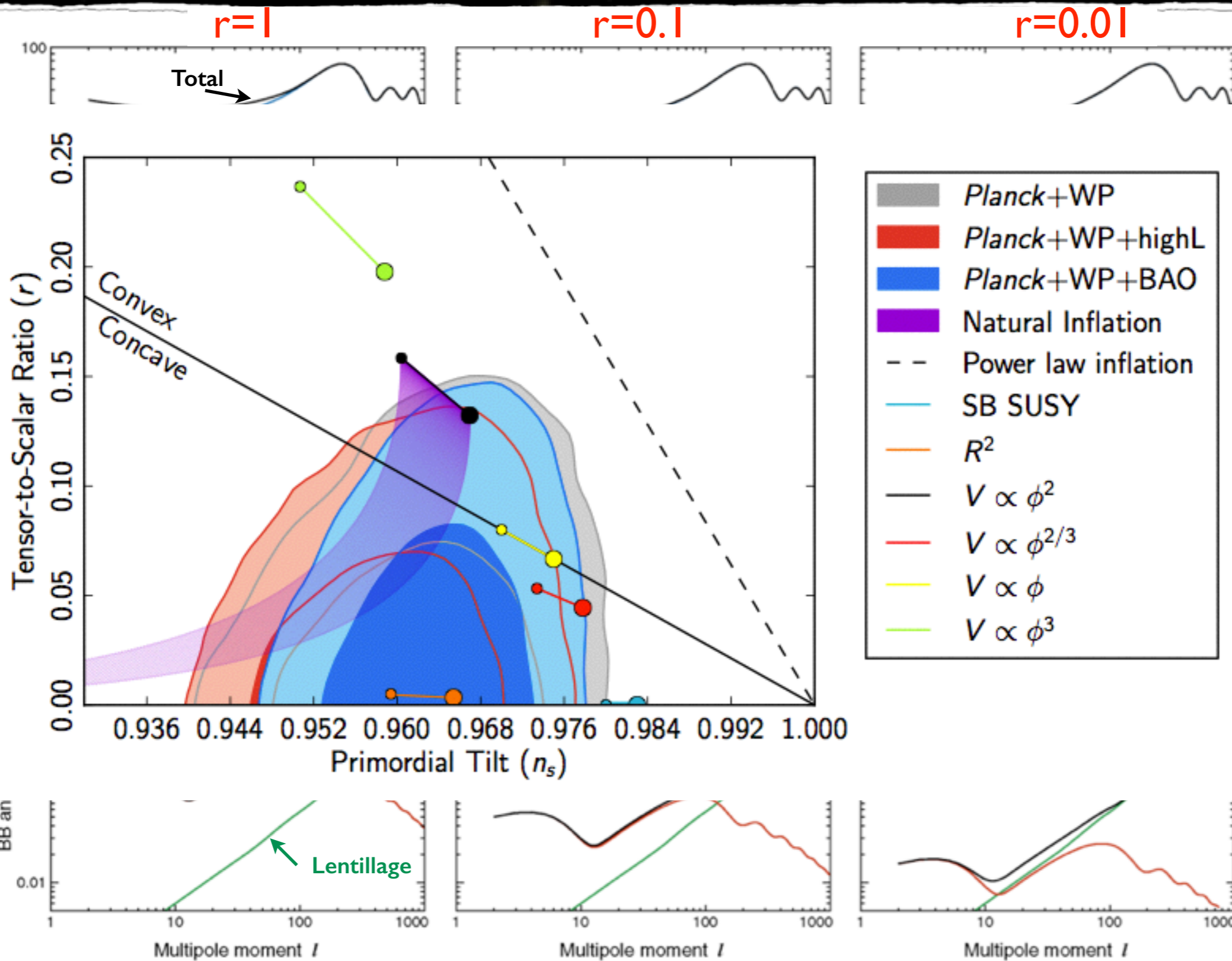




c/o Gary Hinshaw

Seuls les modes B permettent de «voir» les modes tenseurs directement





c/o Gary Hinshaw

Seuls les modes B permettent de «voir» les modes tenseurs directement



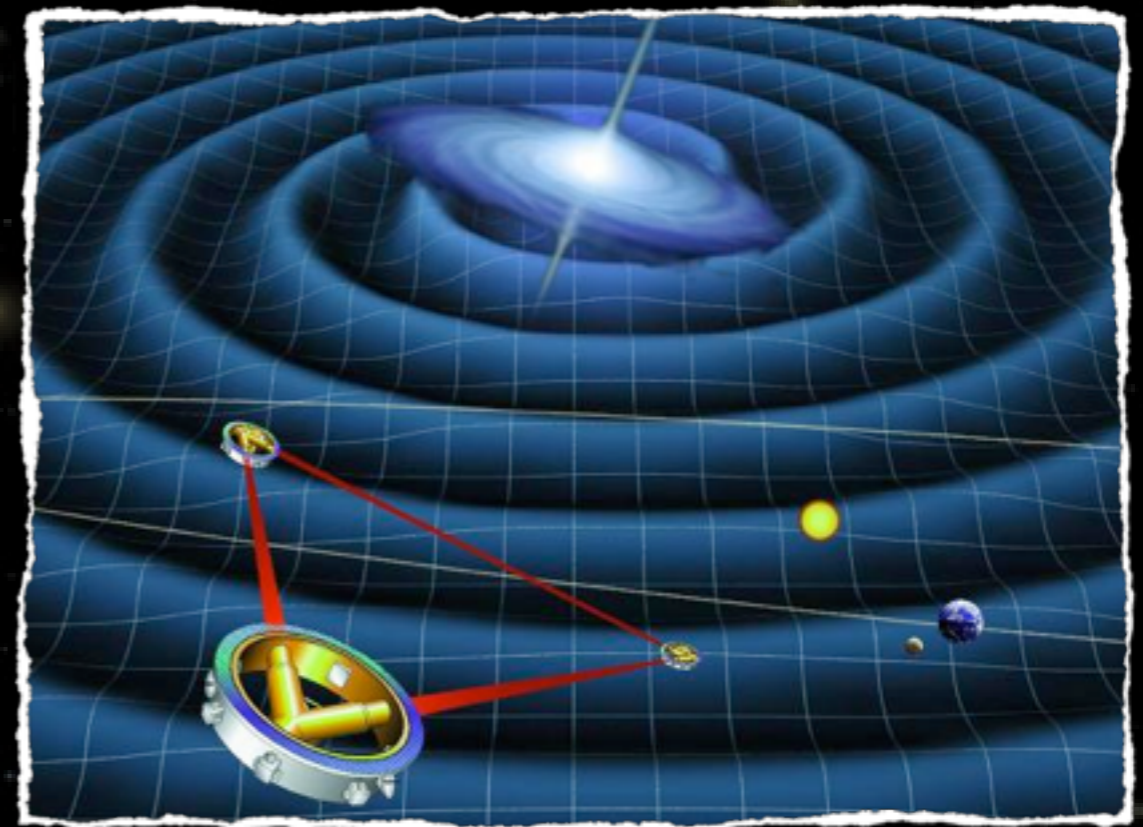
Seule autre approche

- Détecteurs directs d'ondes Gravitationnelles :

Virgo/Ligo

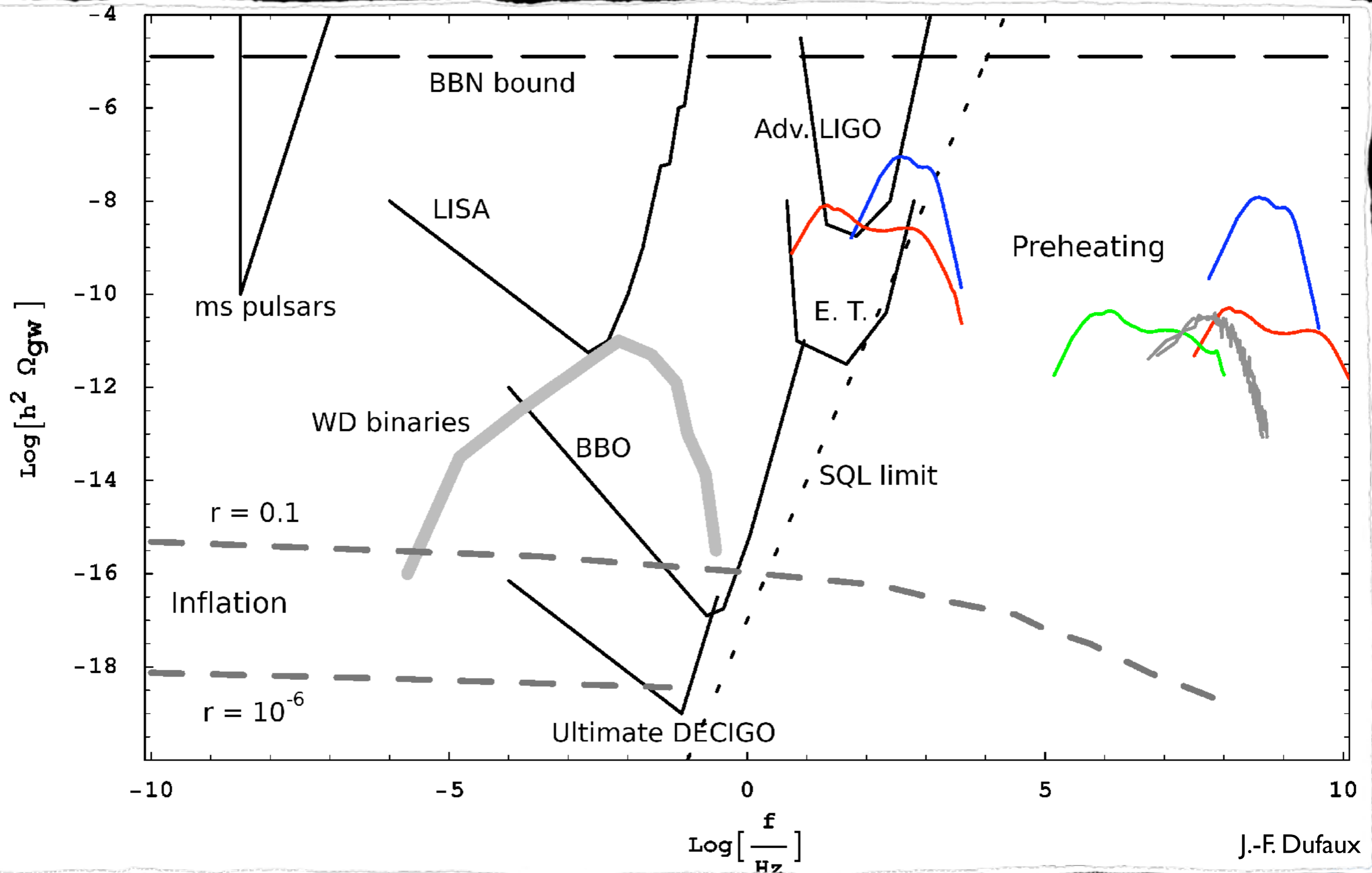


LISA (~2018)

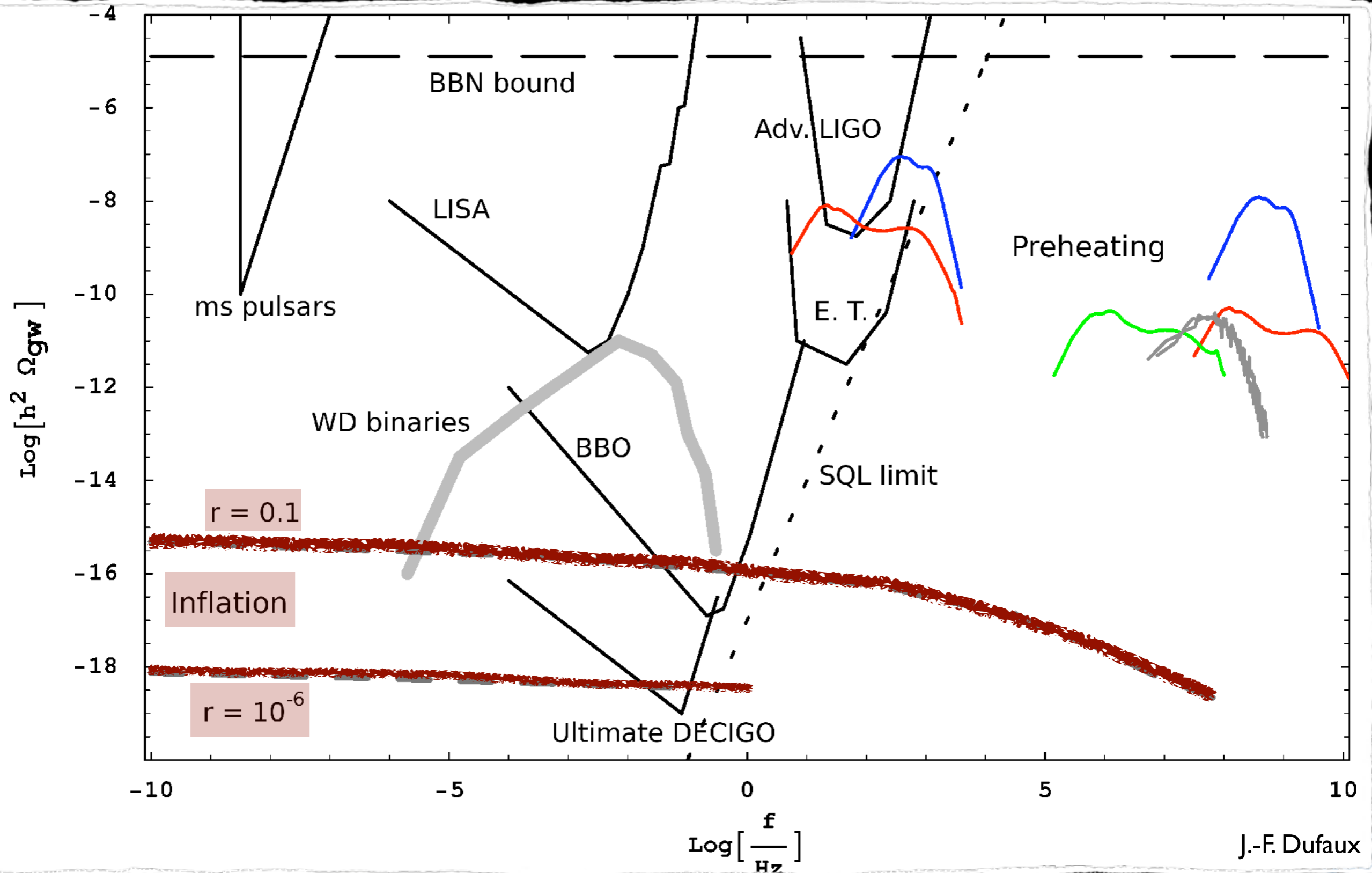


- La détection sera difficile : plus adaptés aux événements violents

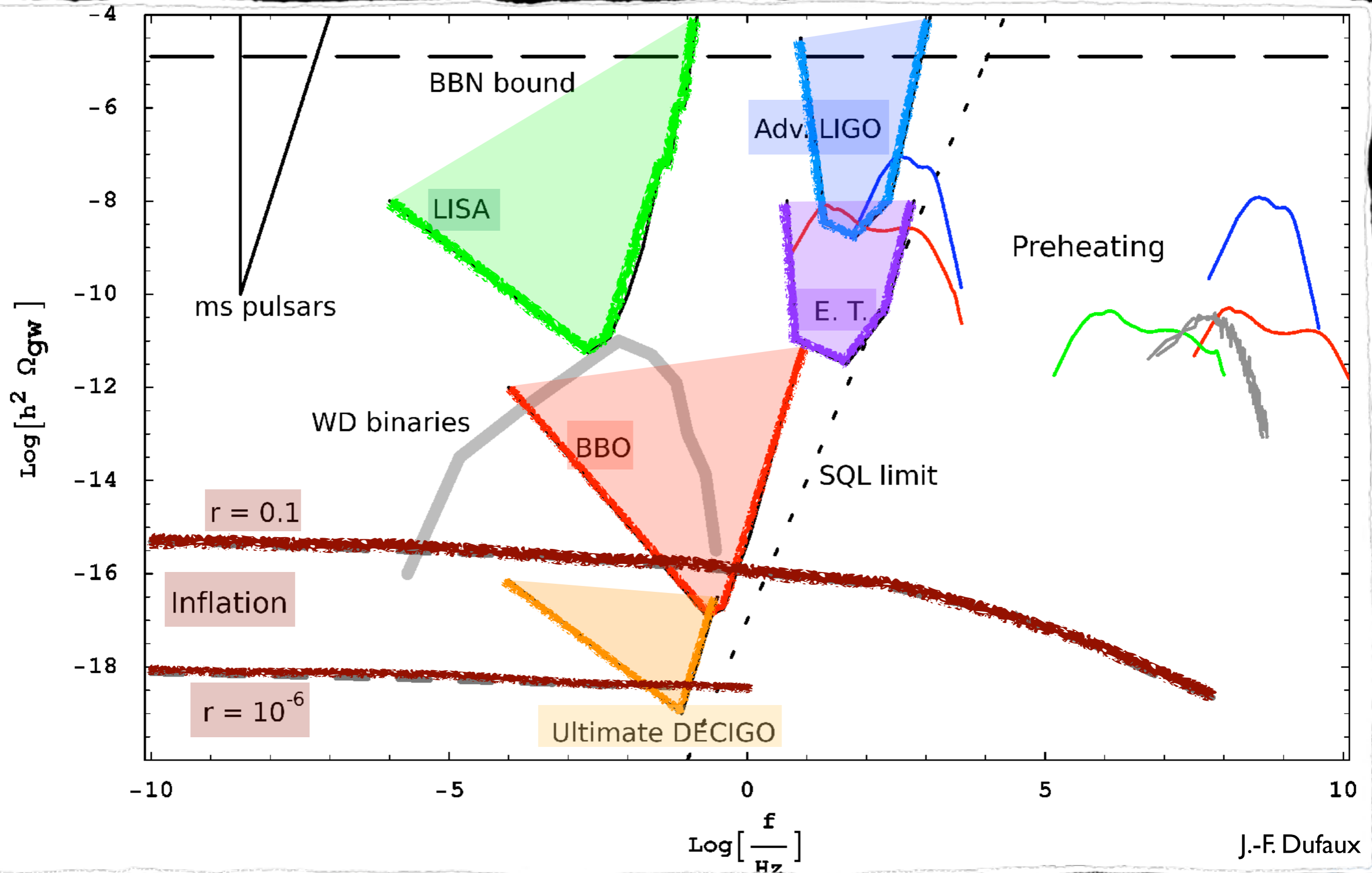
Perspectives de détection directe



Perspectives de détection directe



Perspectives de détection directe



Mesurer l'inflation avec le CMB ?

Quatre quantités à mesurer :

- ★ A_s : connu
- ★ n_s : connu
- ★ A_t ou r : inconnu, requiert une détection du spectre B
- ★ n_t : inconnu, requiert une mesure du spectre B

- Prédiction générique de l'inflation : $r = -8n_t$

*Test de cohérence
de l'inflation*

- Mesure directe du potentiel par développement de Taylor:

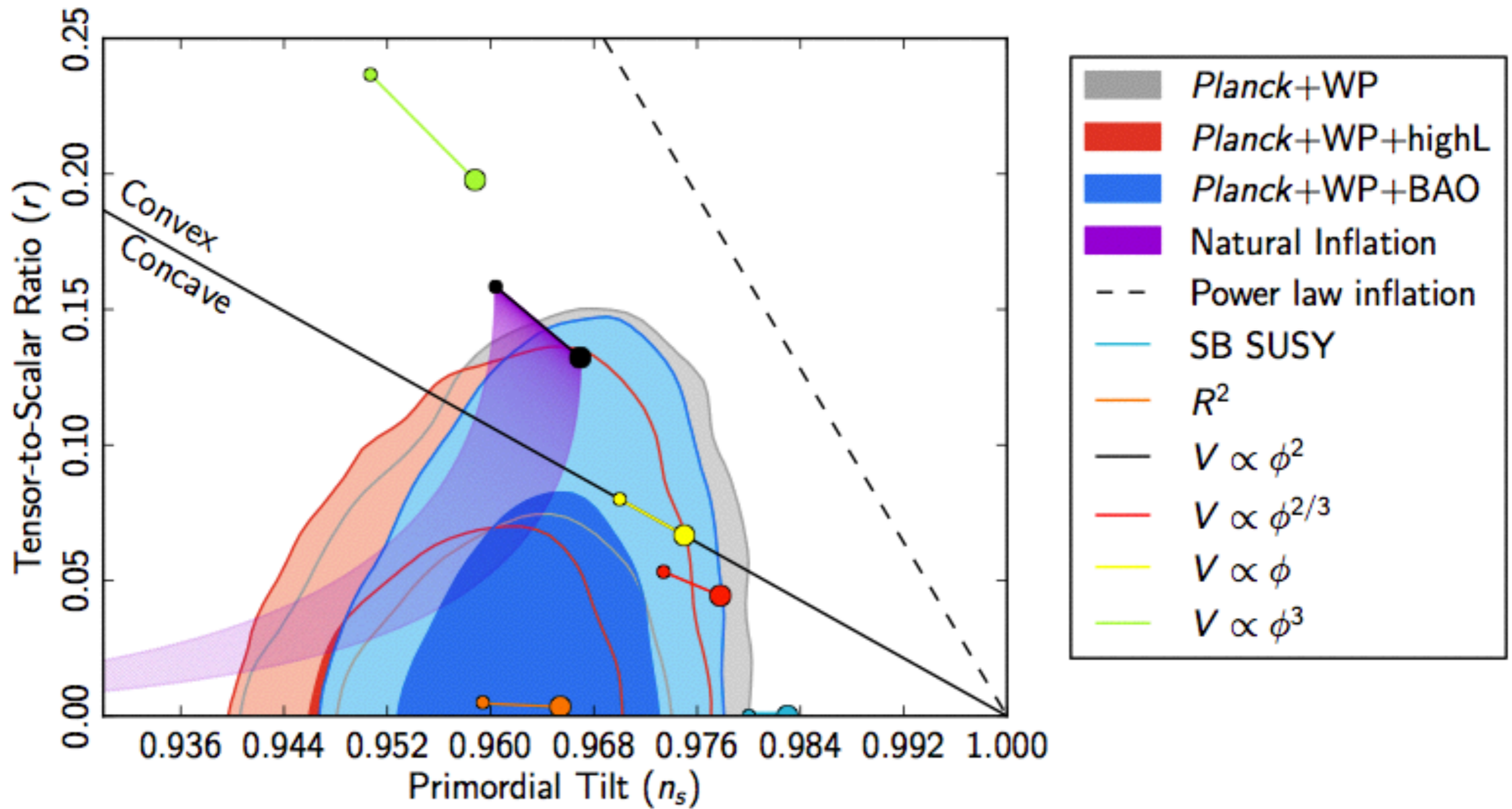
$$V(\phi) \simeq V|_{\phi_{\text{CMB}}} + V'|_{\phi_{\text{CMB}}} (\phi - \phi_{\text{CMB}}) + \frac{1}{2} V''|_{\phi_{\text{CMB}}} (\phi - \phi_{\text{CMB}})^2 + \frac{1}{3!} V'''|_{\phi_{\text{CMB}}} (\phi - \phi_{\text{CMB}})^3$$

- ★ A_s relié à V'
- ★ n_s relié à V''
- ★ *running de n_s* relié à V'''
- ★ A_t relié à V

*Reconstruction de la forme
du potentiel de l'inflaton !*



n_s et r



Fluctuations primordiales : où en sommes nous ?

Prédictions de l'inflation

<ul style="list-style-type: none">● Platitude, homogénéité	✓
<ul style="list-style-type: none">● Nature des perturbations:<ul style="list-style-type: none">★ Pics de TT superposés aux creux de EE➔ Perturbations adiabatiques	✓
<ul style="list-style-type: none">● Indice spectral $P(k) \propto k^{n_s-1}$<ul style="list-style-type: none">★ Planck TT + WMAP Pol + High l + BAO$n_s = 0.9608 \pm 0.0054$ (7.2σ from 1)➔ Spectre presque invariant d'échelle	✓
<ul style="list-style-type: none">● Gaussianités<ul style="list-style-type: none">★ Aucun indice convaincant de non-gaussianité	✓
<ul style="list-style-type: none">● Perturbations tensorielles<ul style="list-style-type: none">★ Pas de détection	?

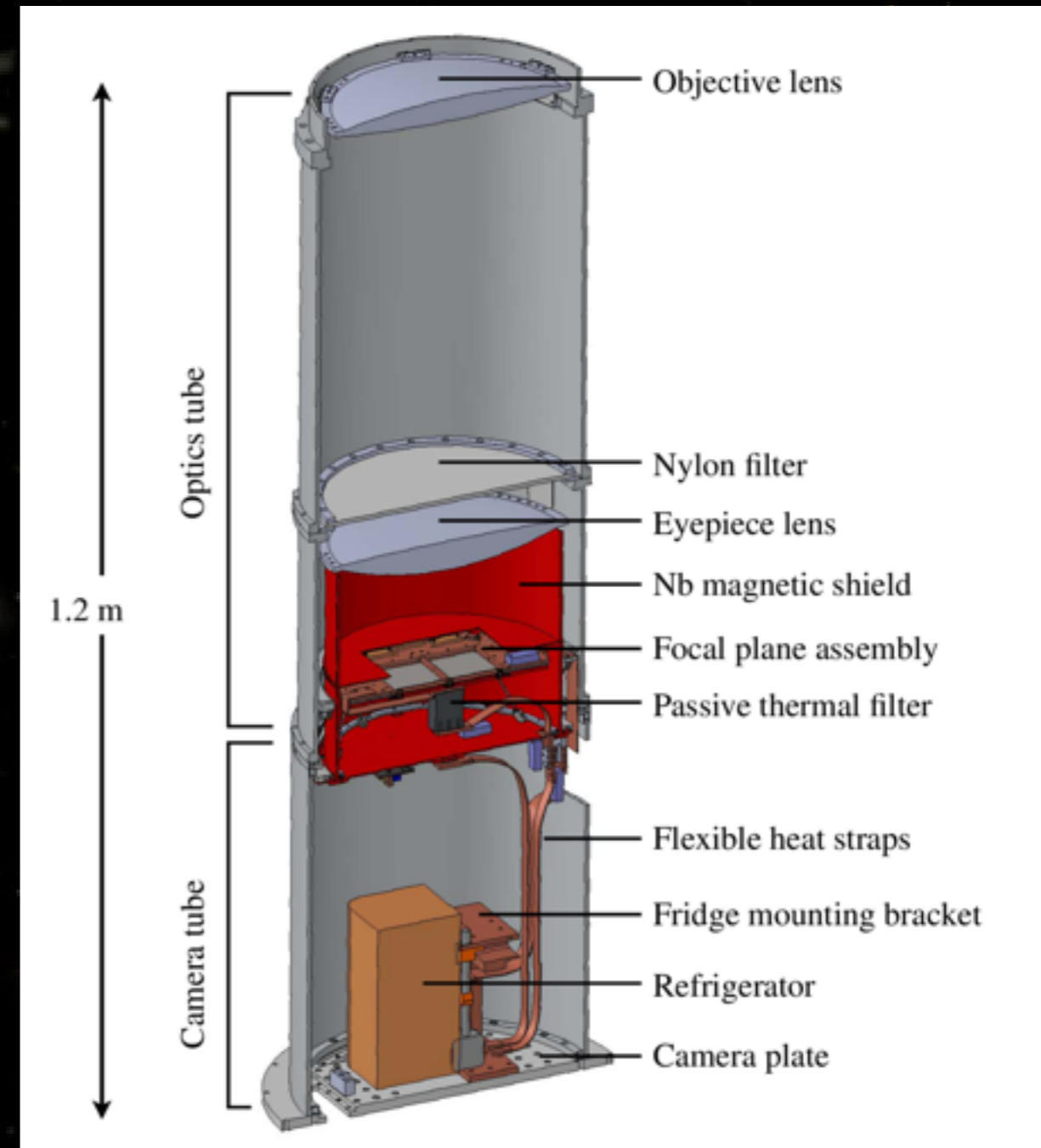
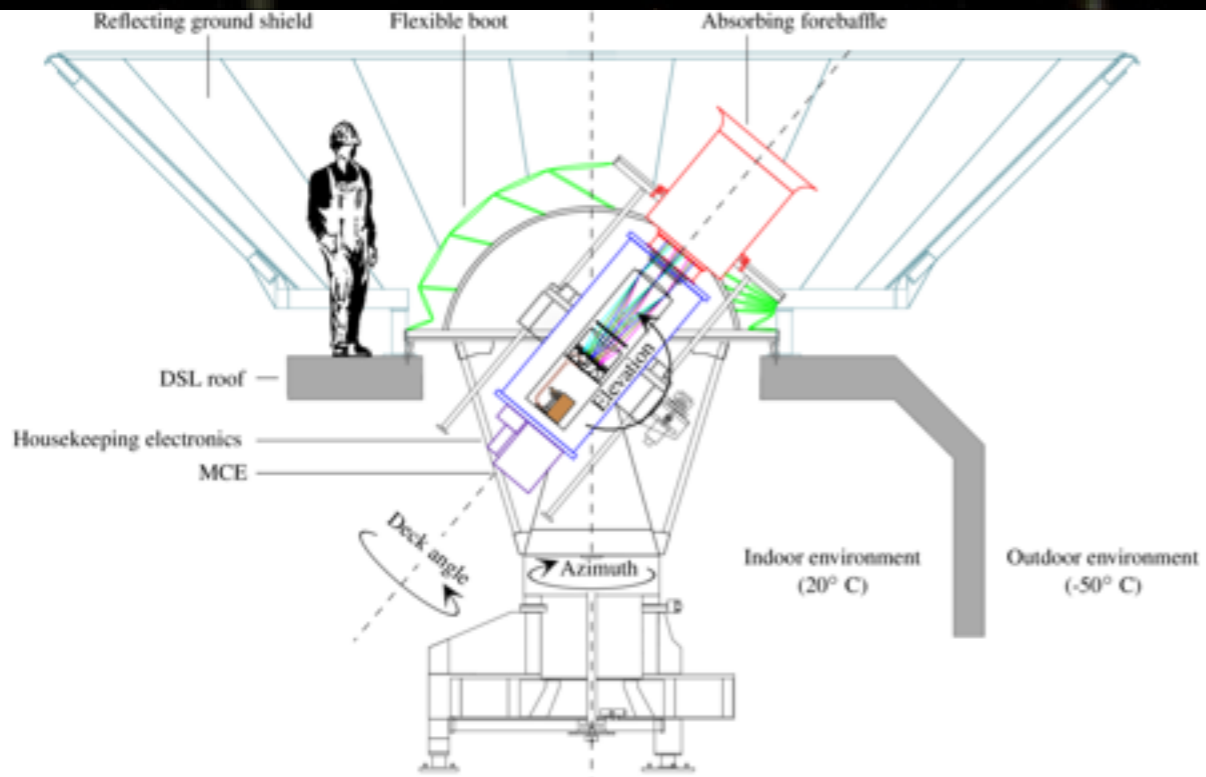
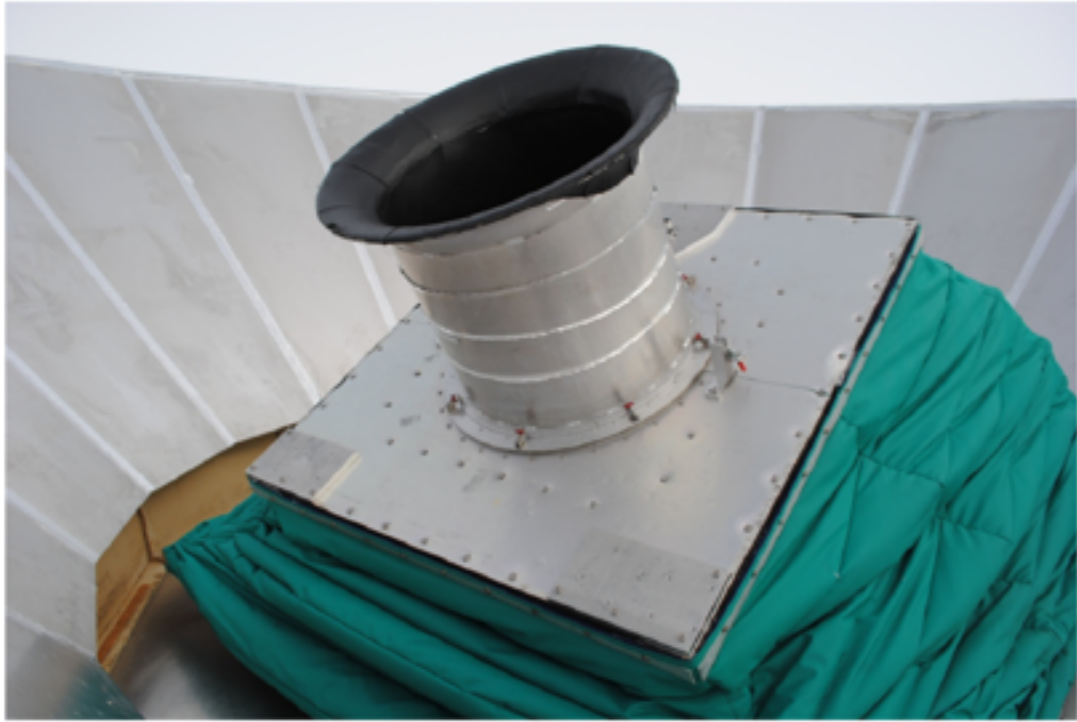


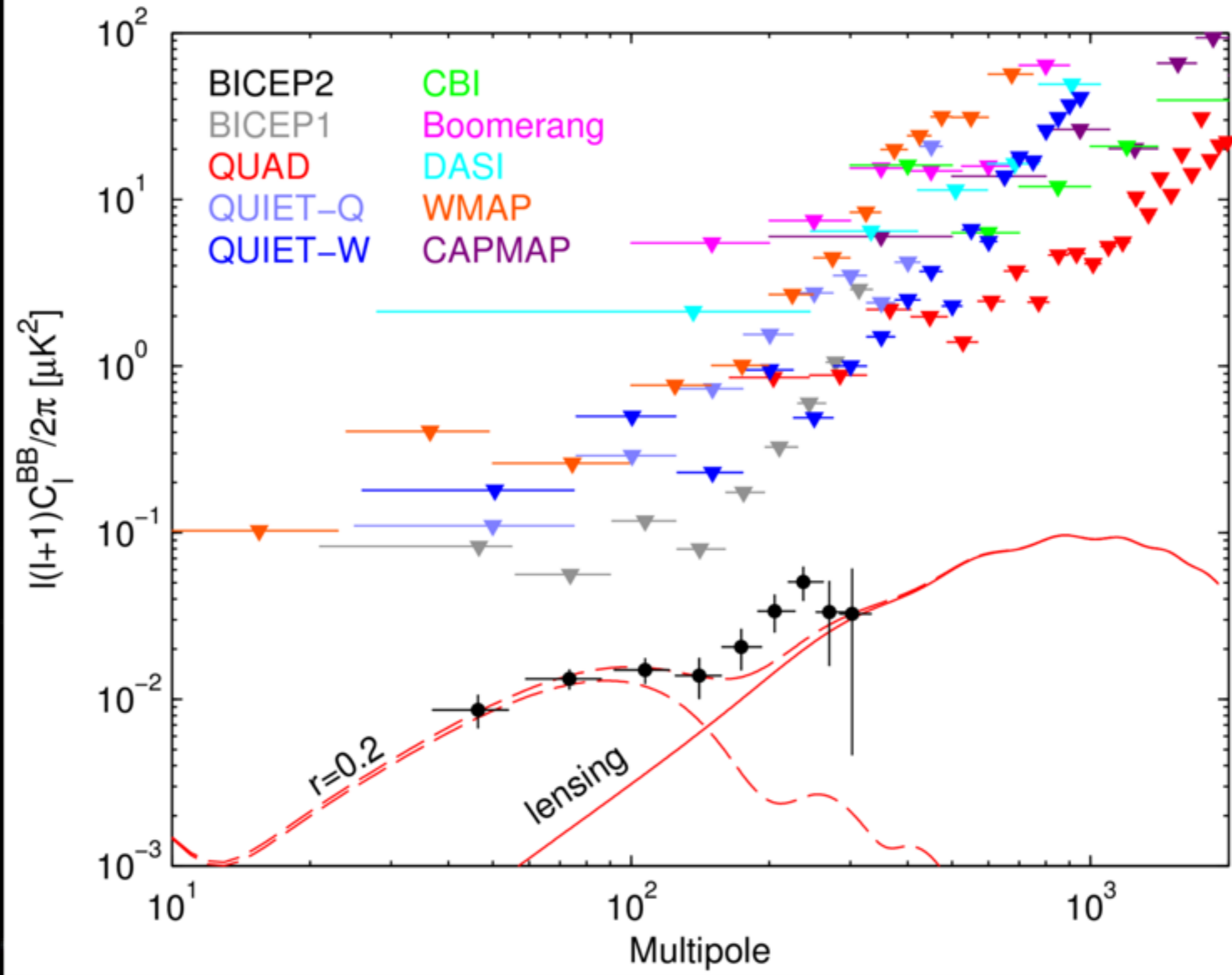
Les modes B : le Graal de la cosmologie

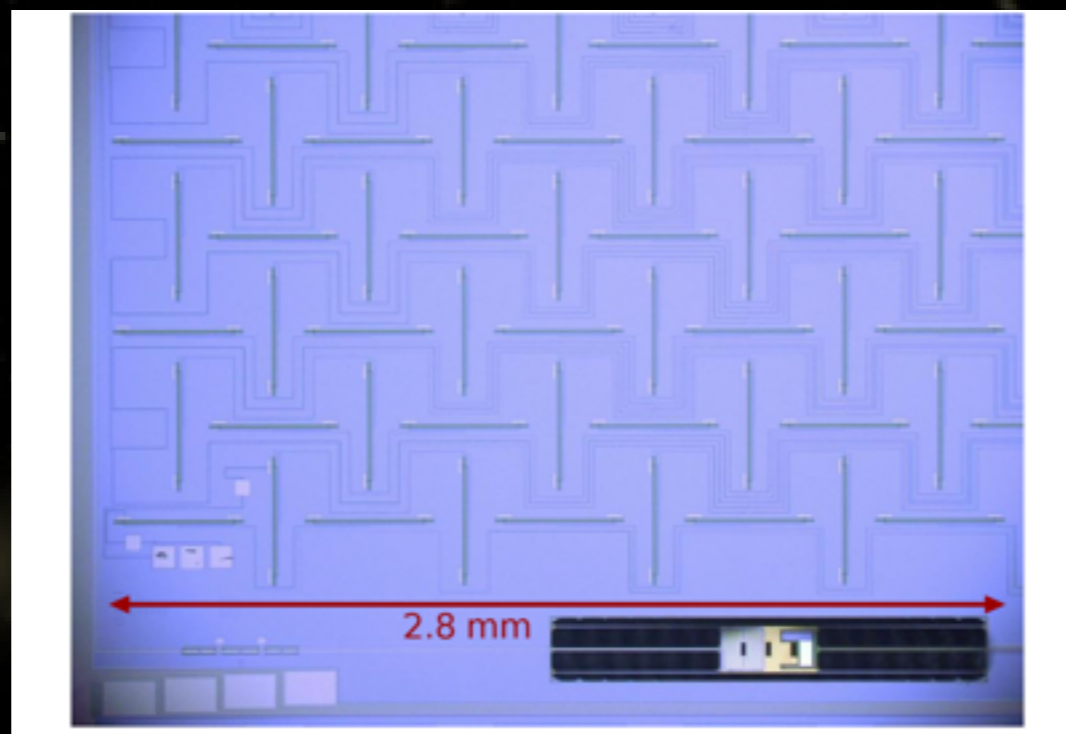
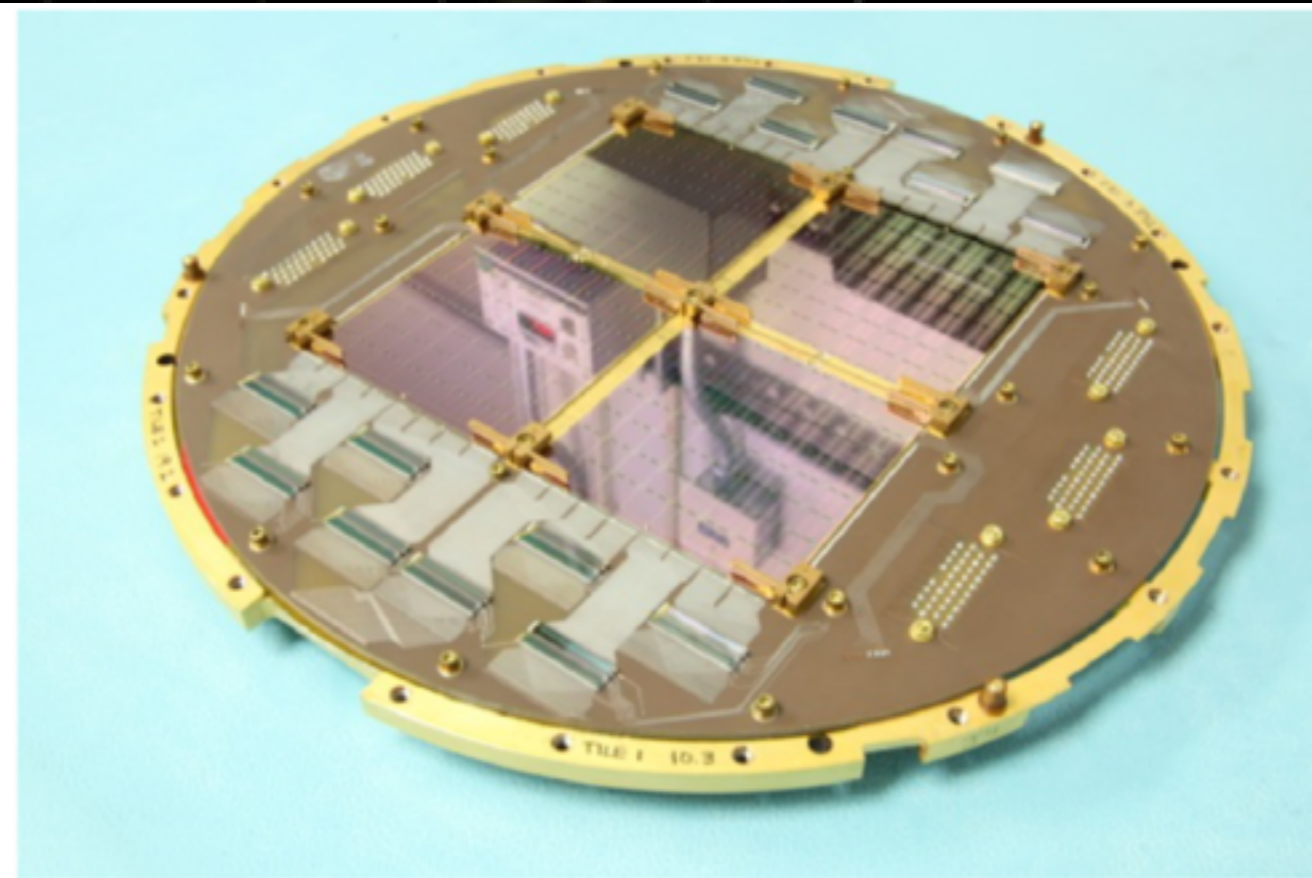
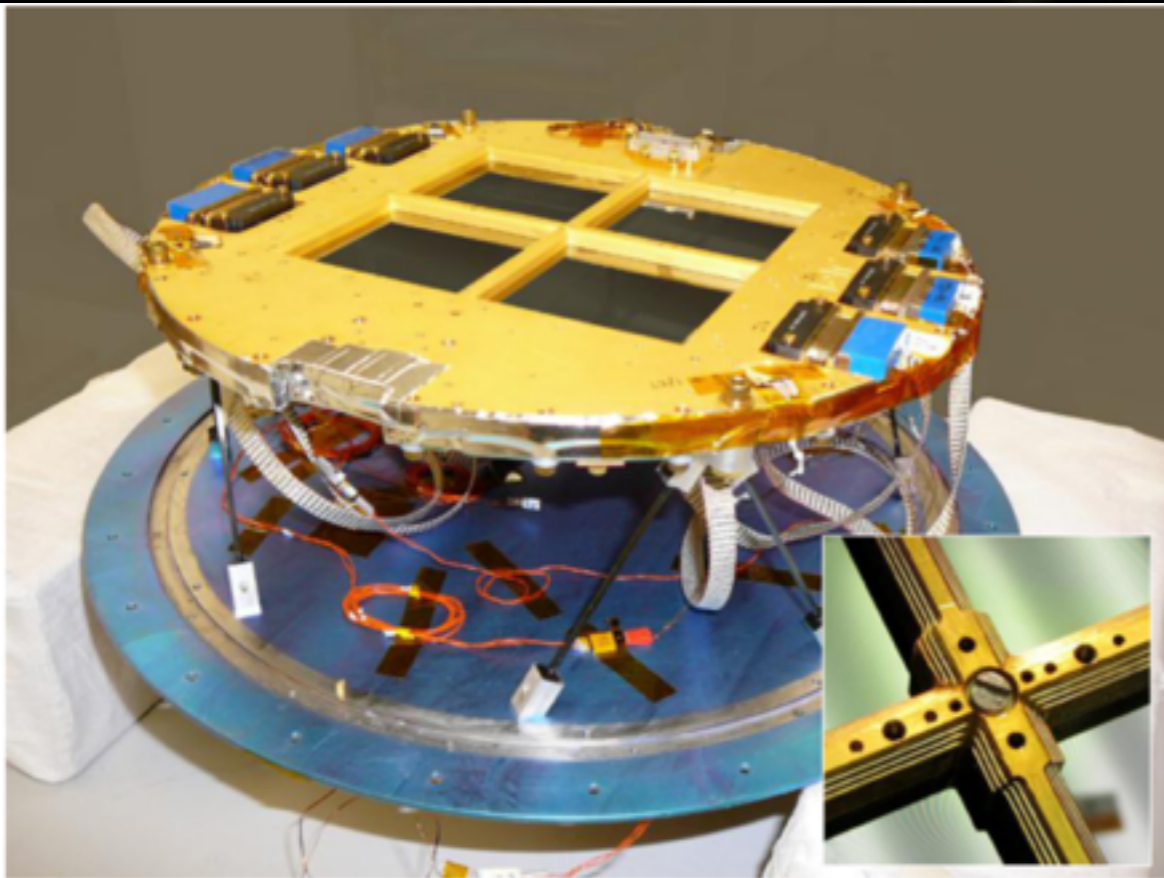
- Signature directe de l'inflation
 - Ondes gravitationnelles primordiales : modes tenseur
 - Prédiction spécifique de l'inflation
 - rapport T/S :
 - < 0.2 [contribution au spectre TT]
 - > 0.01 pour les modèles les plus simples d'inflation
 - peut être très bas pour des modèles plus complexes
- Cordes cosmiques et autres défauts ?
 - Faible contribution à la formation des structures
 - ... mais il devrait y en avoir «un peu» ...
 - Contribution significative aux modes B
 - [Bevis et al. (2007), Phys.Rev.D76:043005]
 - [Urrestilla et al. (2008), astro-ph/0803.2059]
 - [Pogosian et Wyman (2007), astro-ph/0711.0747]
- Supercordes ?
 - la plupart (toutes ?) des phases d'inflation issues de théories connues de supercordes prédisent $r \ll 1$
 - Opportunité unique de falsifier les théories de cordes !
 - [Kallosh & Linde (2007), JCAP 0704:017]

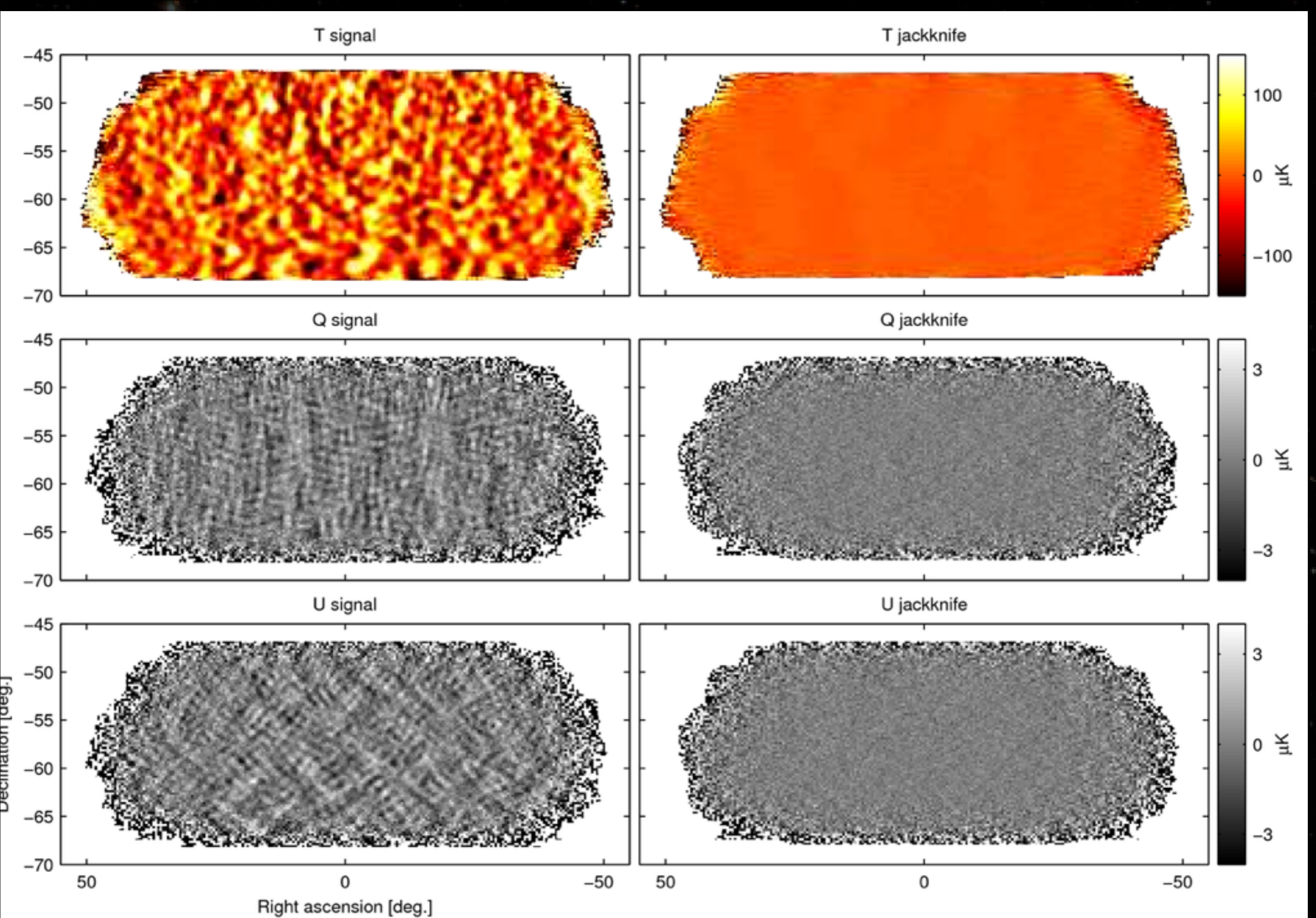


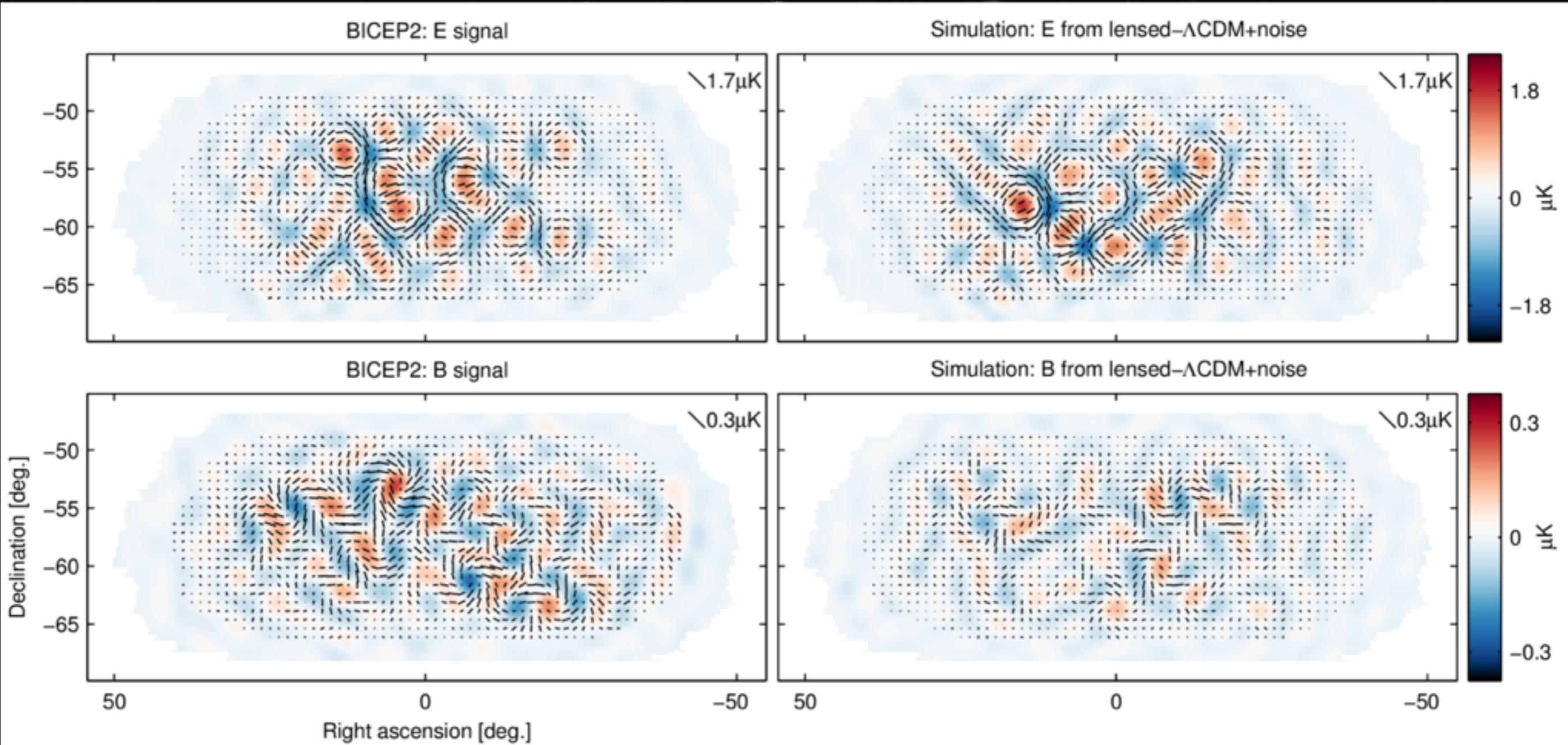
BICEP2

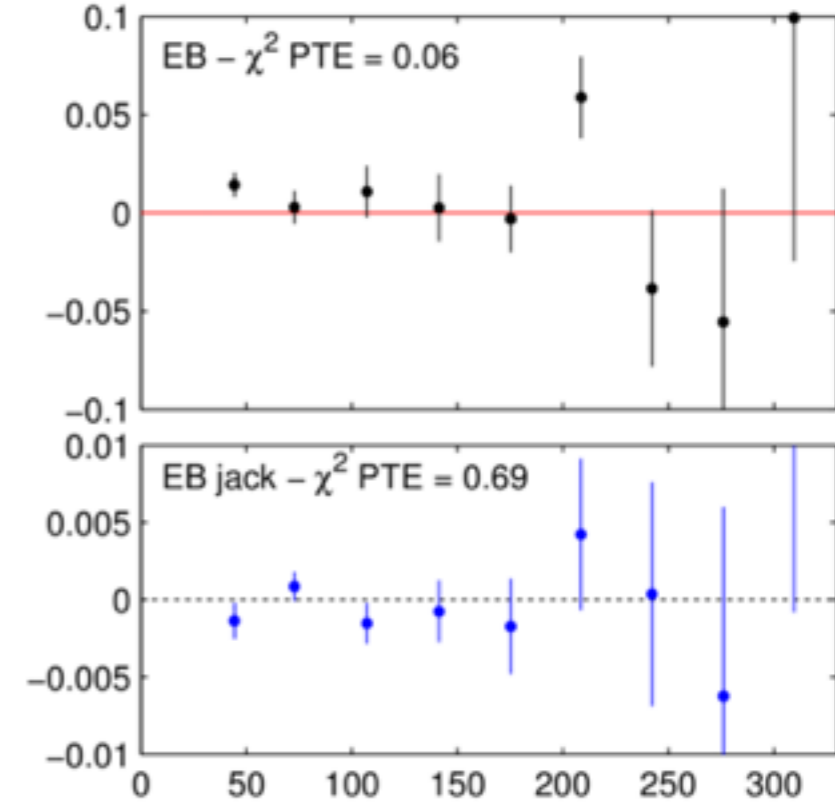
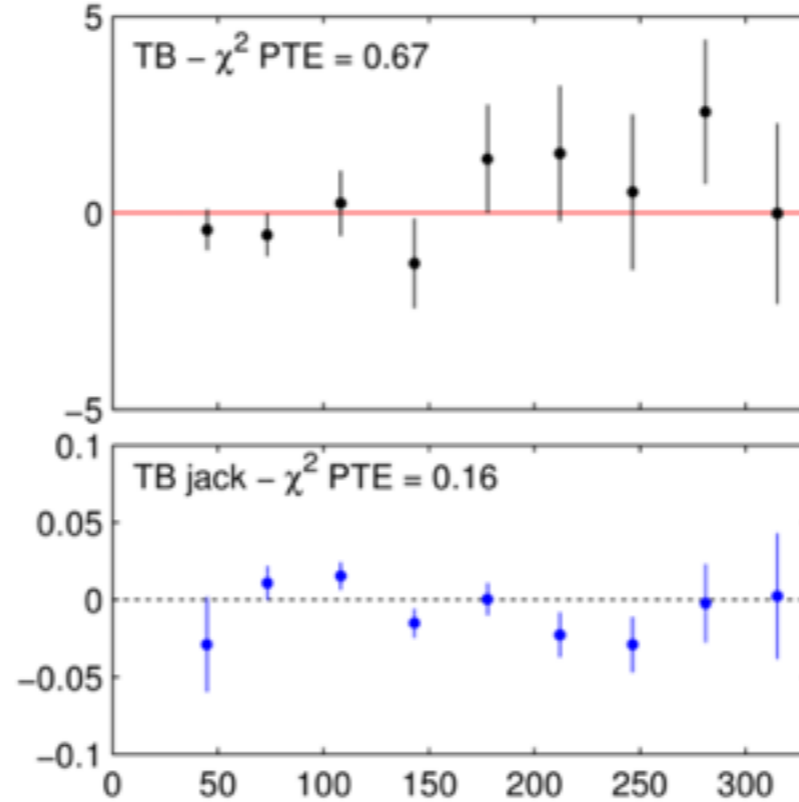
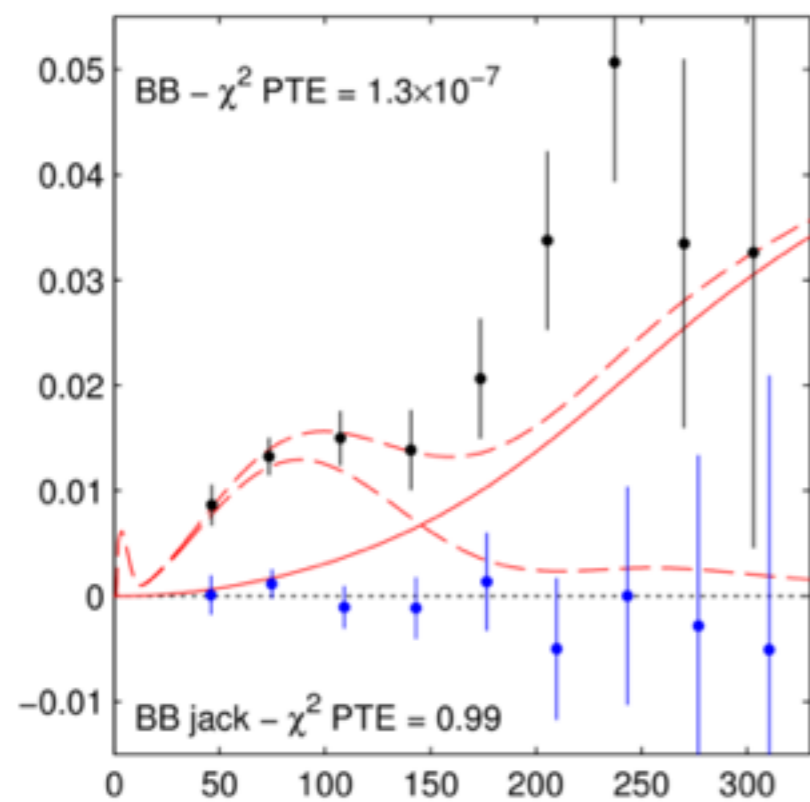
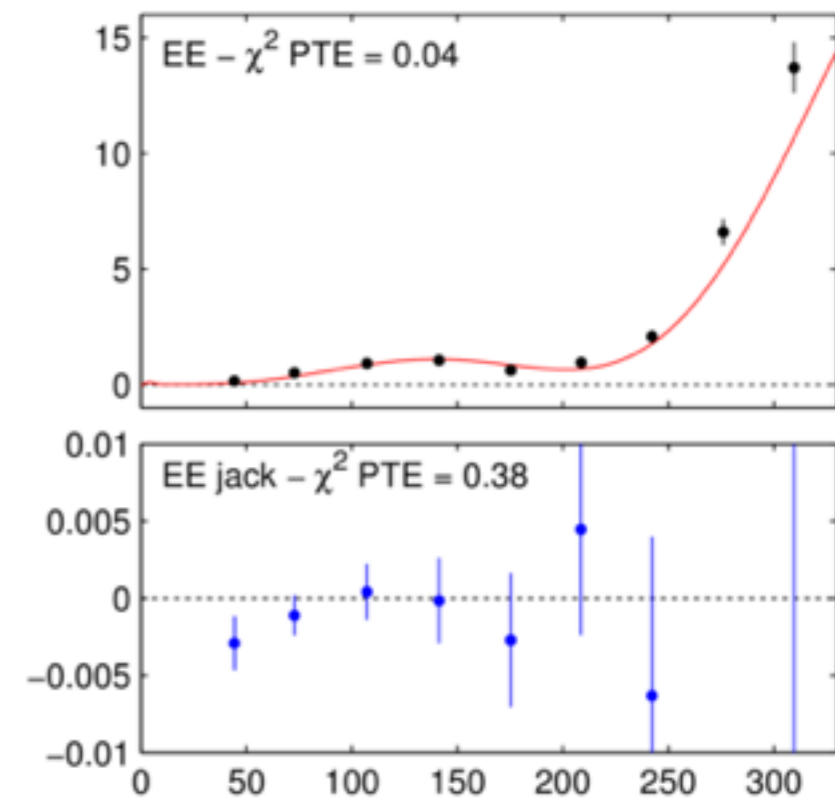
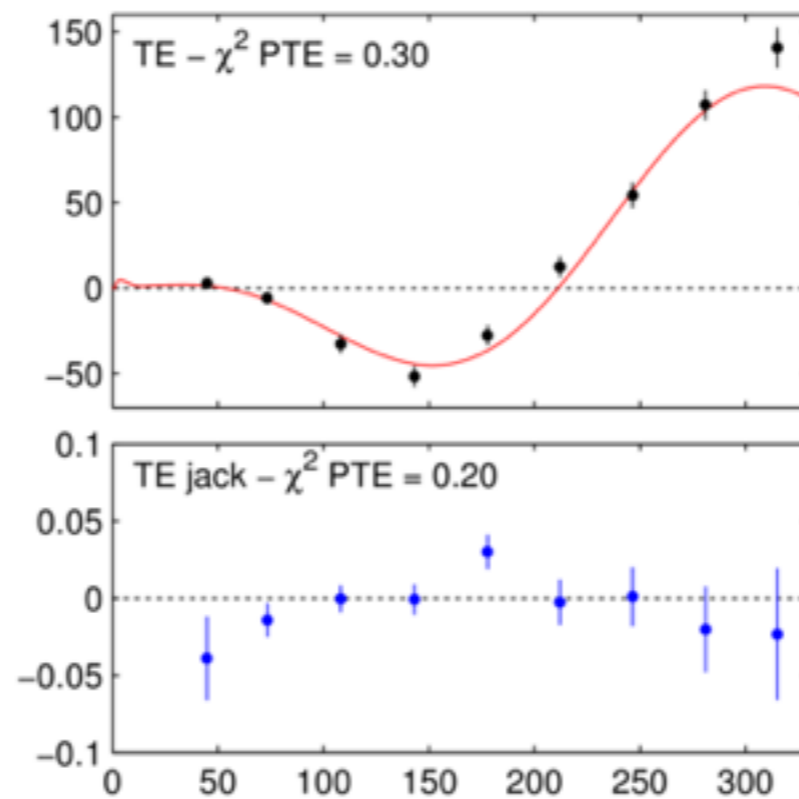
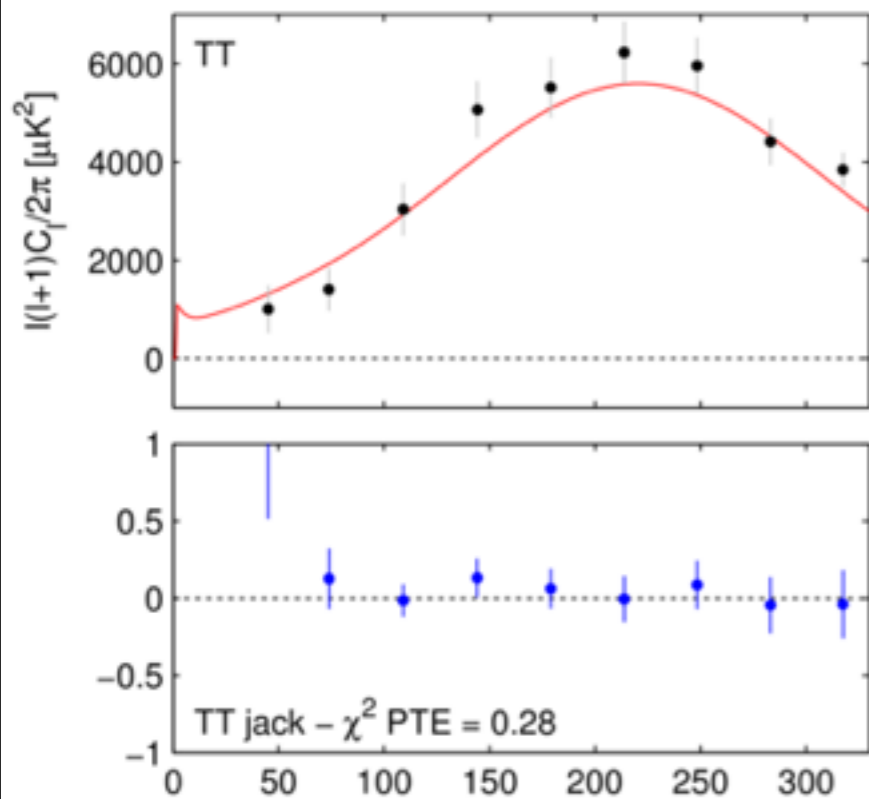












Multipole



