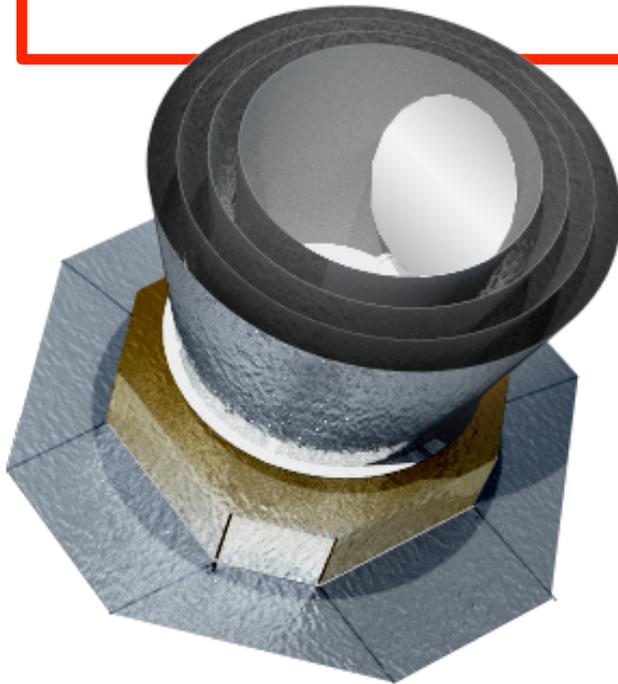


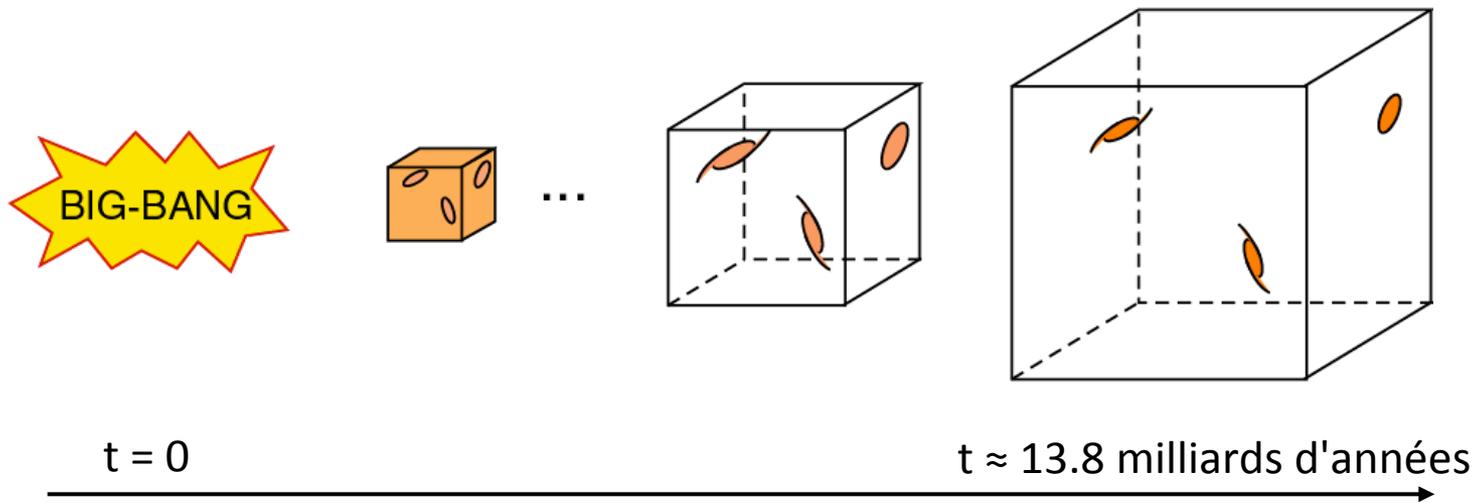
Polarisation du fond cosmologique



Jacques Delabrouille
CNRS, Laboratoire PAC, Paris

Plan de l'exposé

- ➔ • Petite histoire de l'Univers
- Fond de rayonnement cosmologique
- Polarisation
- Univers primordial et inflation
- Lentilles gravitationnelles
- Observations futures
- Conclusion



• Dense et chaud

expansion

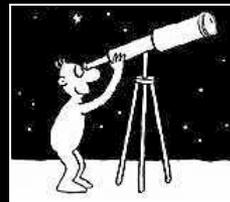
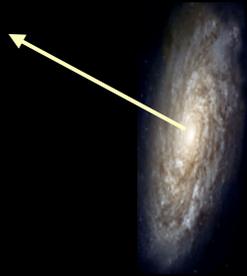
• Dilué et froid

• Homogène

gravité

• Structuré

L'expansion



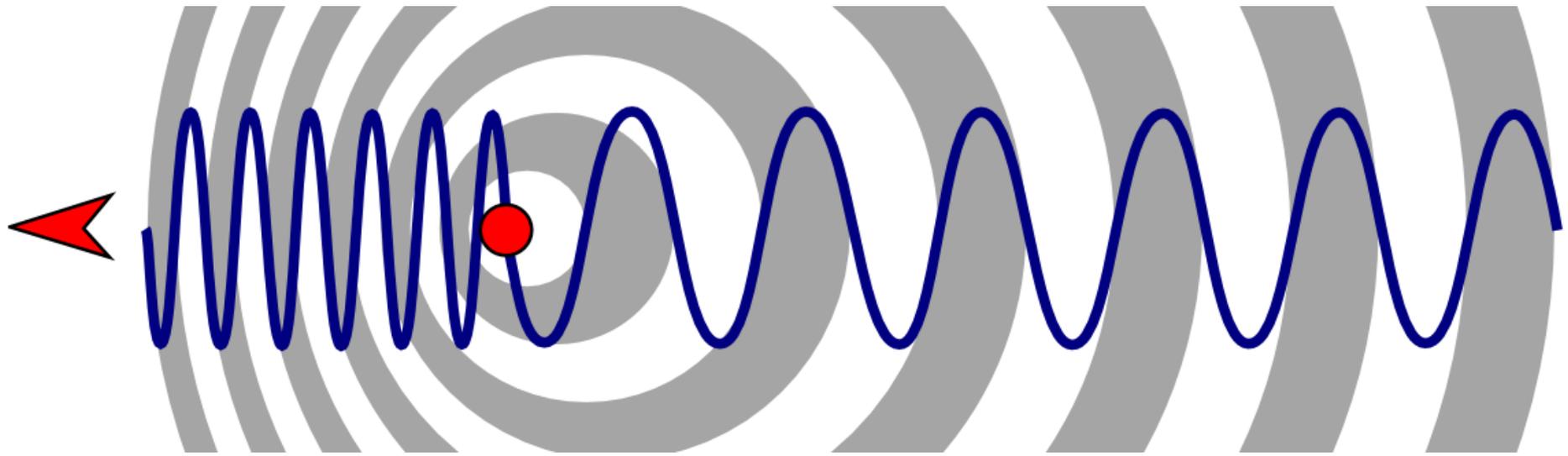
L'expansion : les clefs de la découverte

Clef numéro 1 : l'effet Doppler

Christian Doppler (1842)



Postule que la longueur d'onde d'une onde dépend du mouvement relatif de la source d'émission et de l'observateur. Il l'applique à l'observation d'étoiles doubles pour tenter d'expliquer leur différence de couleur.



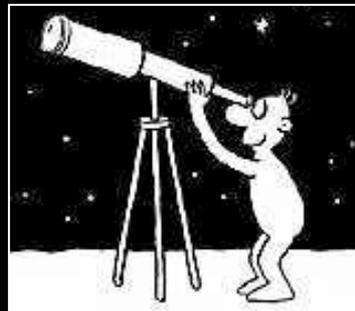
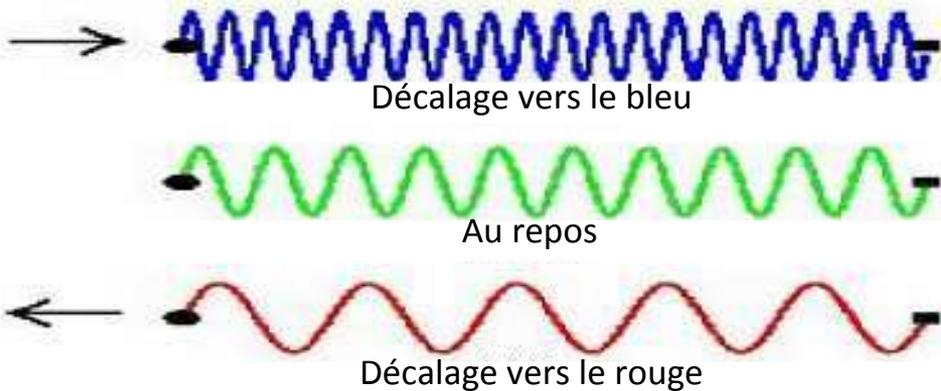
L'expansion : les clefs de la découverte

Clef numéro 2 : spectroscopie

Vesto Slipher (1912)



Vesto Slipher observe par spectroscopie que les raies d'émission des galaxies sont décalées vers le rouge: (presque) toutes les galaxies semblent s'éloigner de nous, plus ou moins vite !



Raies spectrales de l'Hydrogène (en laboratoire)



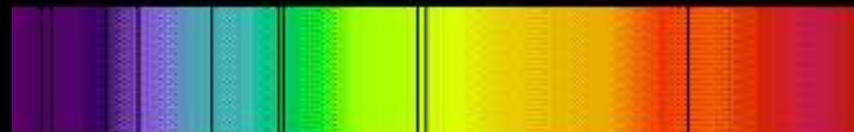
Galaxie 1



Galaxie 2



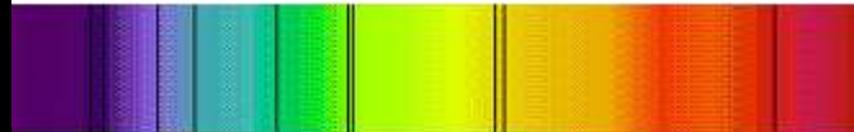
Galaxie 3



Galaxie venant vers l'observateur



Galaxie au repos par rapport à l'observateur



Galaxie s'éloignant de l'observateur

Amazon Fashion

WOMEN MEN GIRLS BOYS BABY LUGGAGE SALES & DEALS YOUR ♥S

FREE RETURNS Restrictions Apply

Clothing, Shoes & Jewelry > Costumes & Accessories > Costumes > Men



Roll over image to zoom in



Charades

Doppler Barcode Costume

★★★★☆ 7 customer reviews

Price: \$38.99

Size:

Select Size Chart | Fit As expected (66%)

- Includes: Shirt, Pants

Share [Email] [Facebook] [Twitter] [Pinterest]

To buy, select Size Choose from options to the left

Add to Cart

Add to Wish List

Customers Who Bought This Brand Also Shopped For



13 février 2015 Doppler Effect Costume [Apparel]



Sheldon Cooper Doppler Effect Adult Costume



Mystery House Sheldon's Doppler Effect Costume



L'expansion : les clefs de la découverte

Clef numéro 3 : Les Céphéides

Henrietta Lewitt (1912)

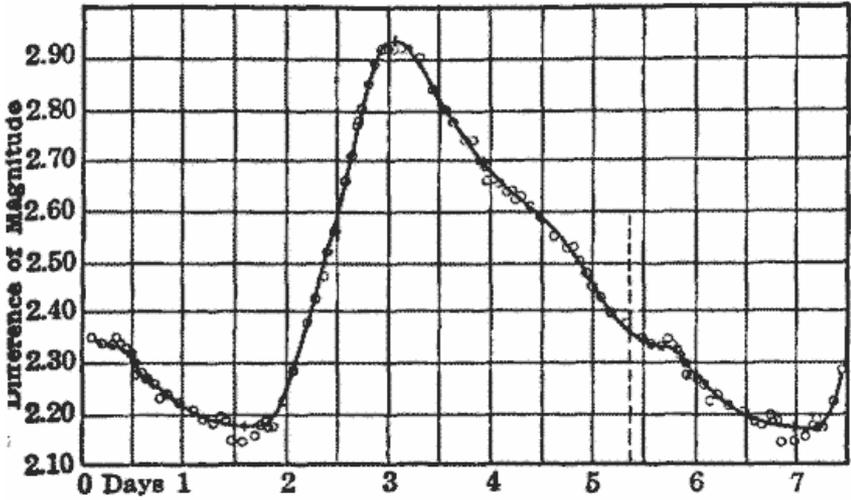


Les céphéides (un type d'étoiles variables – géantes rouges instables) ont une période proportionnelle à leur luminosité.

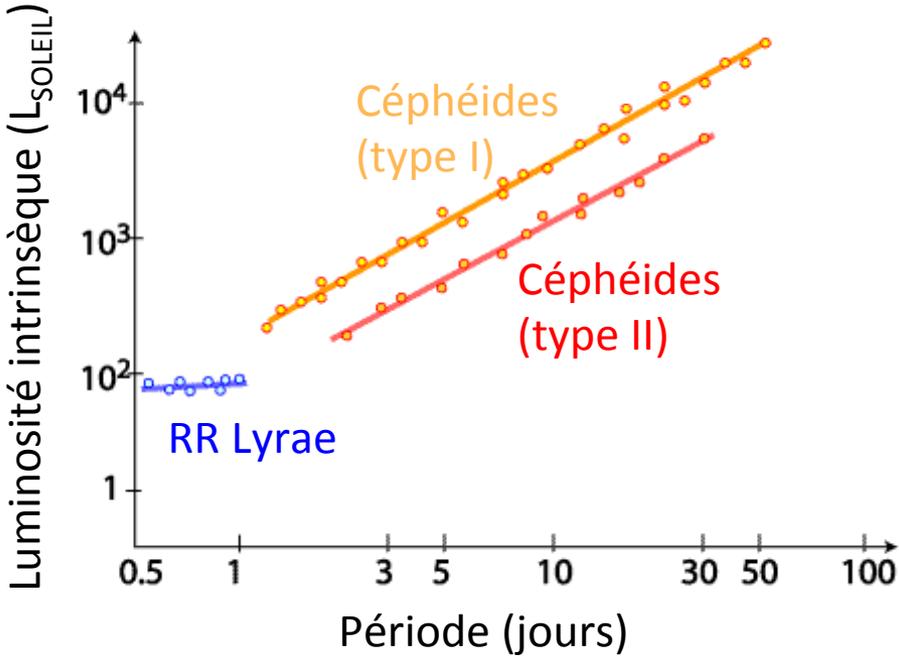
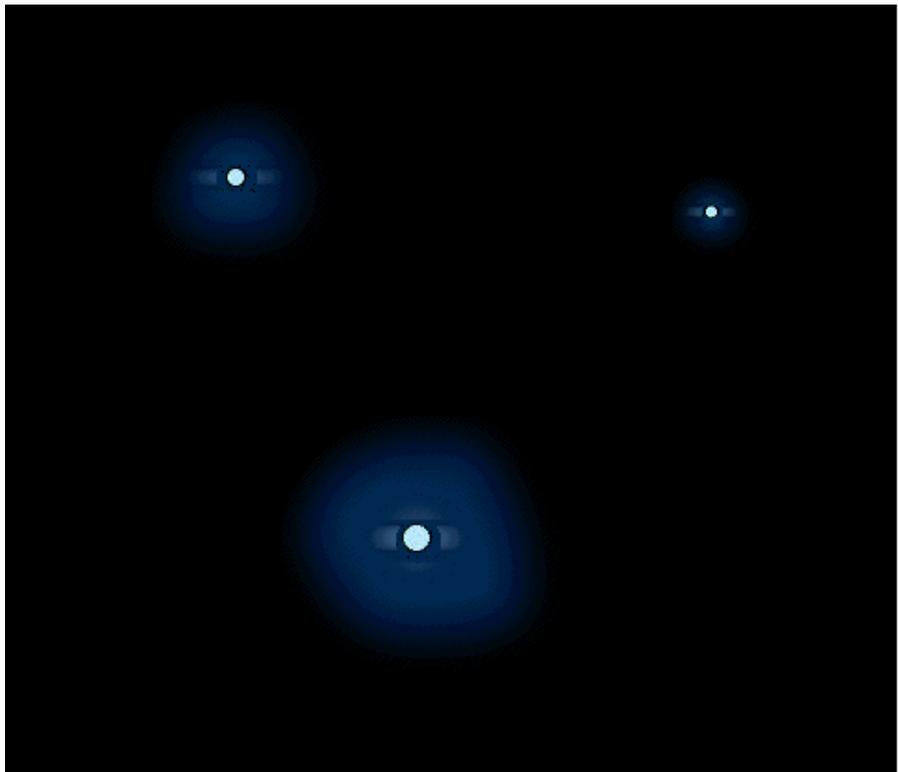
En mesurant la période (facile) d'étoiles lointaines on a accès à leur luminosité *intrinsèque*.

En mesurant leur luminosité *apparente* (directement observée) on en déduit leur distance, et donc la distance de la galaxies hôte !

Courbe de lumière de δ Cephei



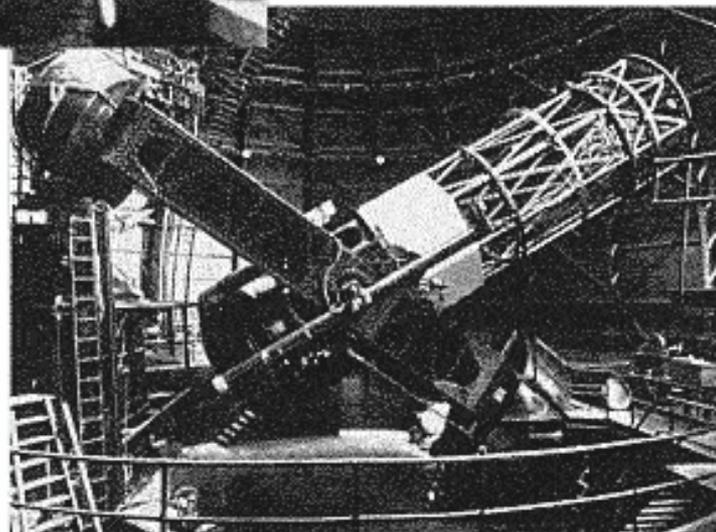
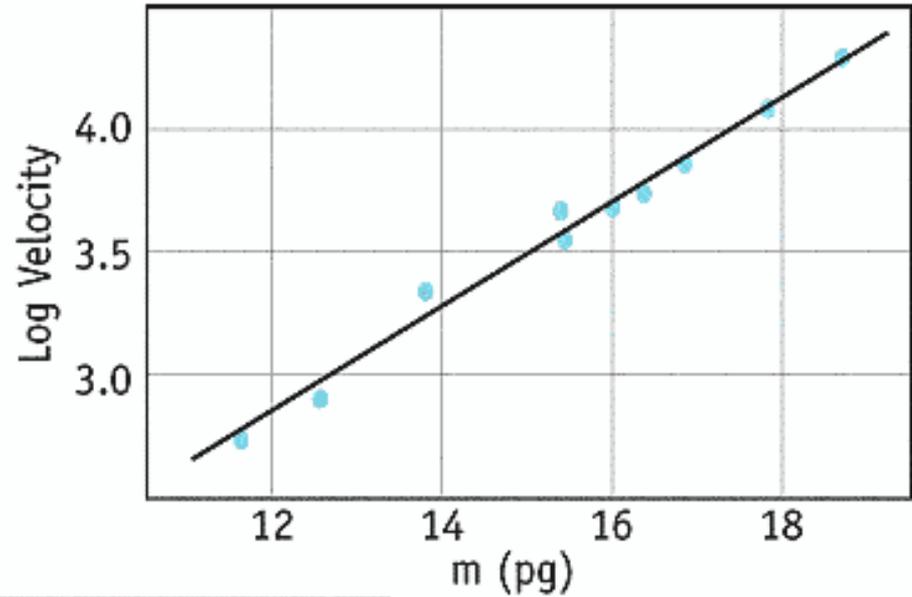
Tiré de Nick Strobel's Astronomy notes



DISCOVERY OF EXPANDING UNIVERSE

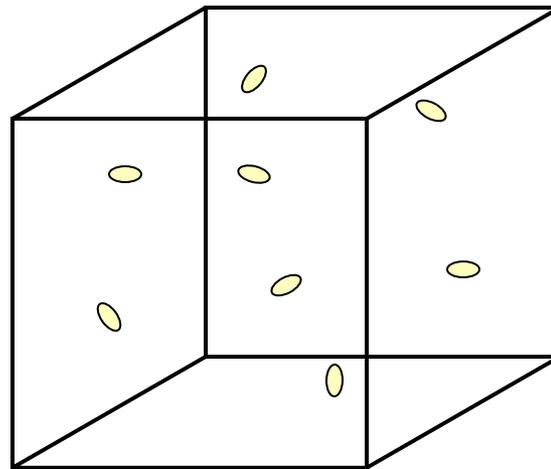


Edwin Hubble
1929

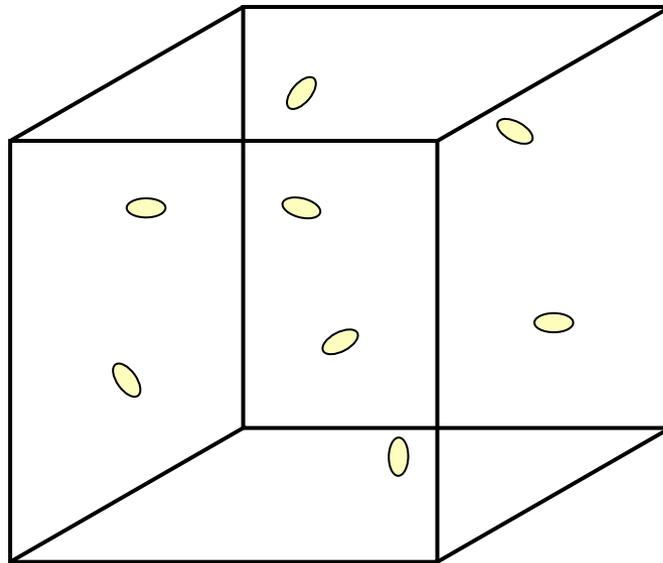


Mt. Wilson
100 Inch
Telescope

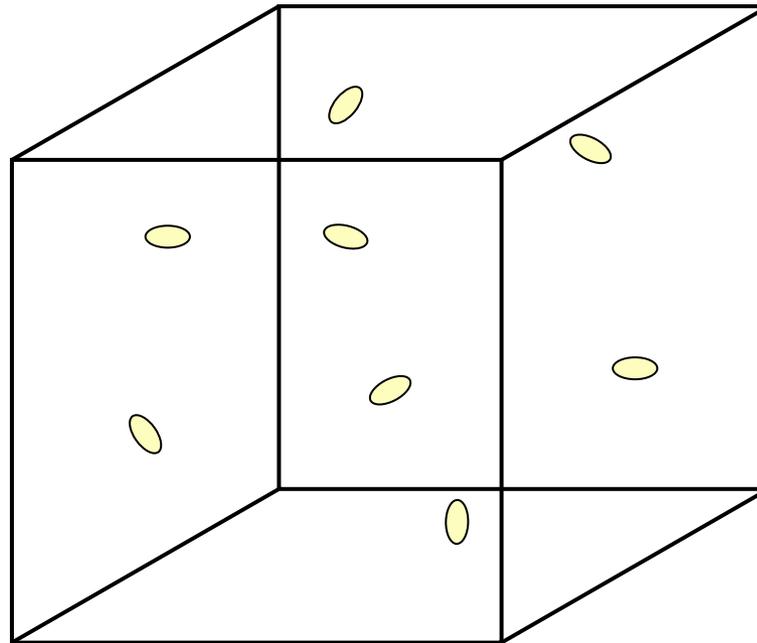
L'expansion



L'expansion



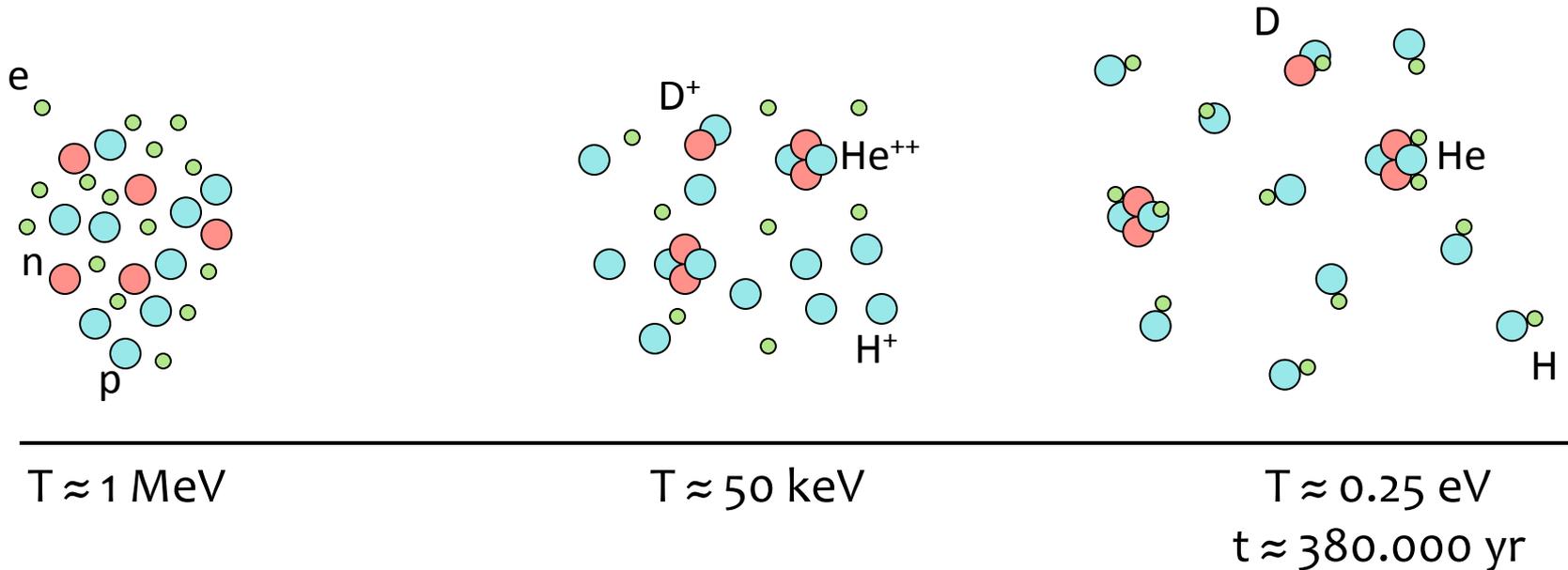
L'expansion



Plan de l'exposé

- Petite histoire de l'Univers
- • Fond de rayonnement cosmologique
- Polarisation
- Univers primordial et inflation
- Lentilles gravitationnelles
- Observations futures
- Conclusion

Une brève histoire des atomes



1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Joule

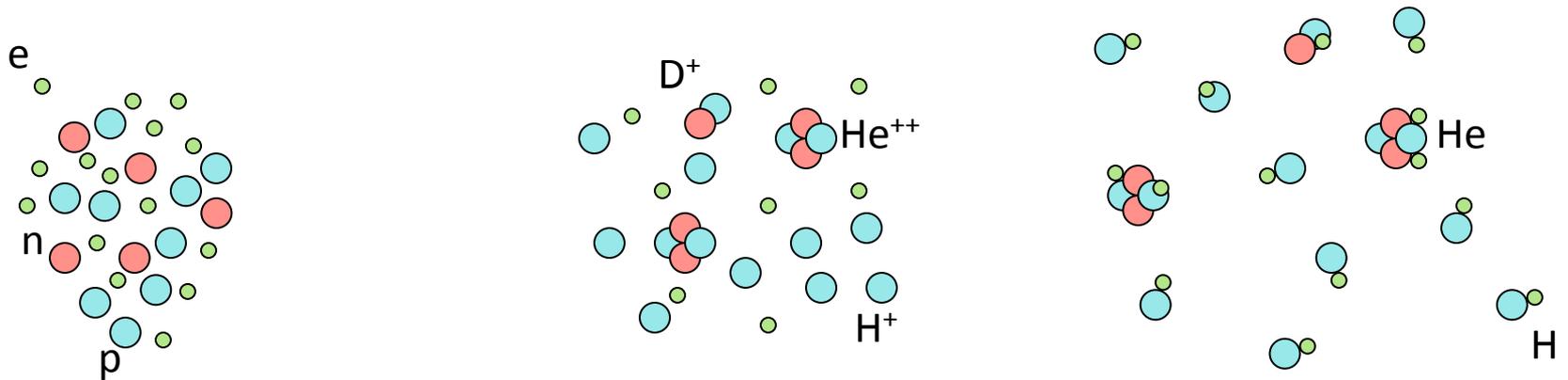
= 11 600 Kelvin

(Température telle que $kT = 1 \text{ eV}$)

Ionisation de l'atome d'Hydrogène : 13,6 eV

Energie de liaison du Deuterium : 2,2 MeV

Une brève histoire des atomes



Nucléosynthèse
primordiale

=

formation des éléments légers

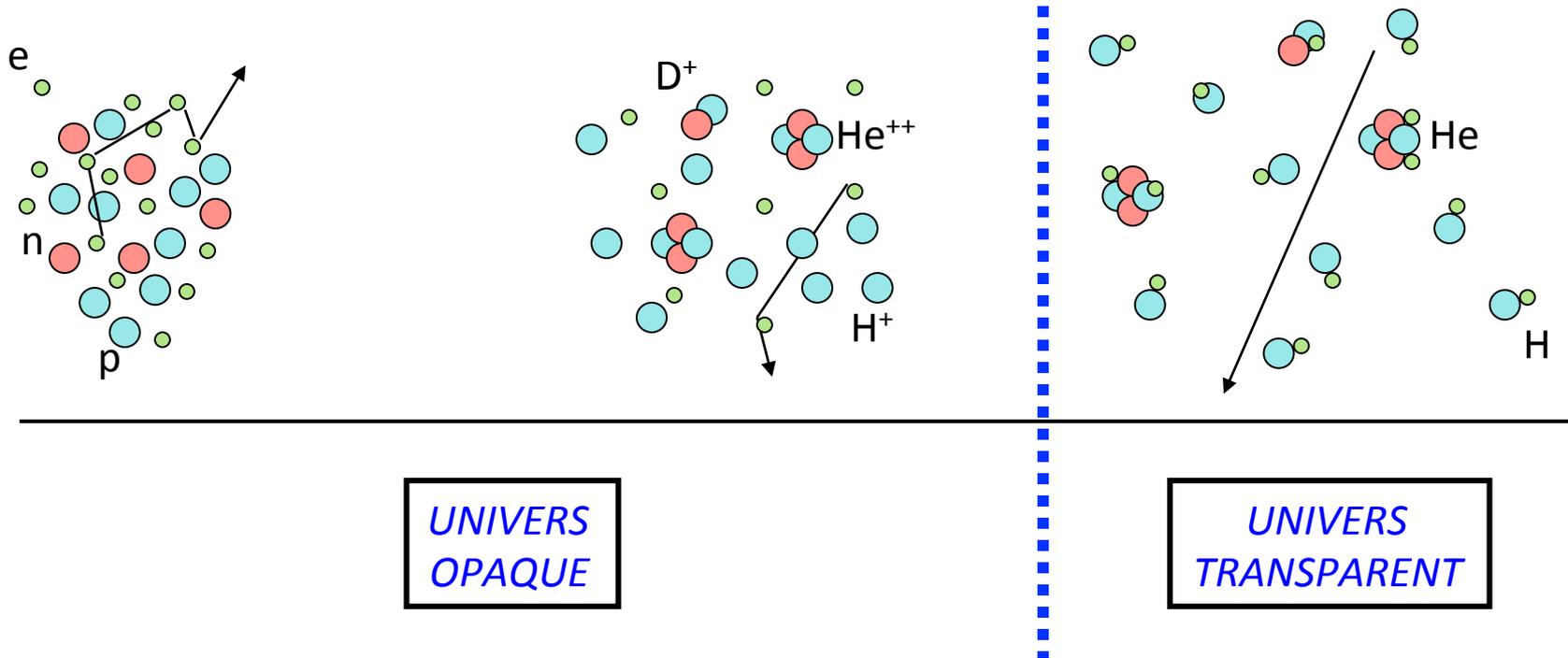


"Recombinaison"

=

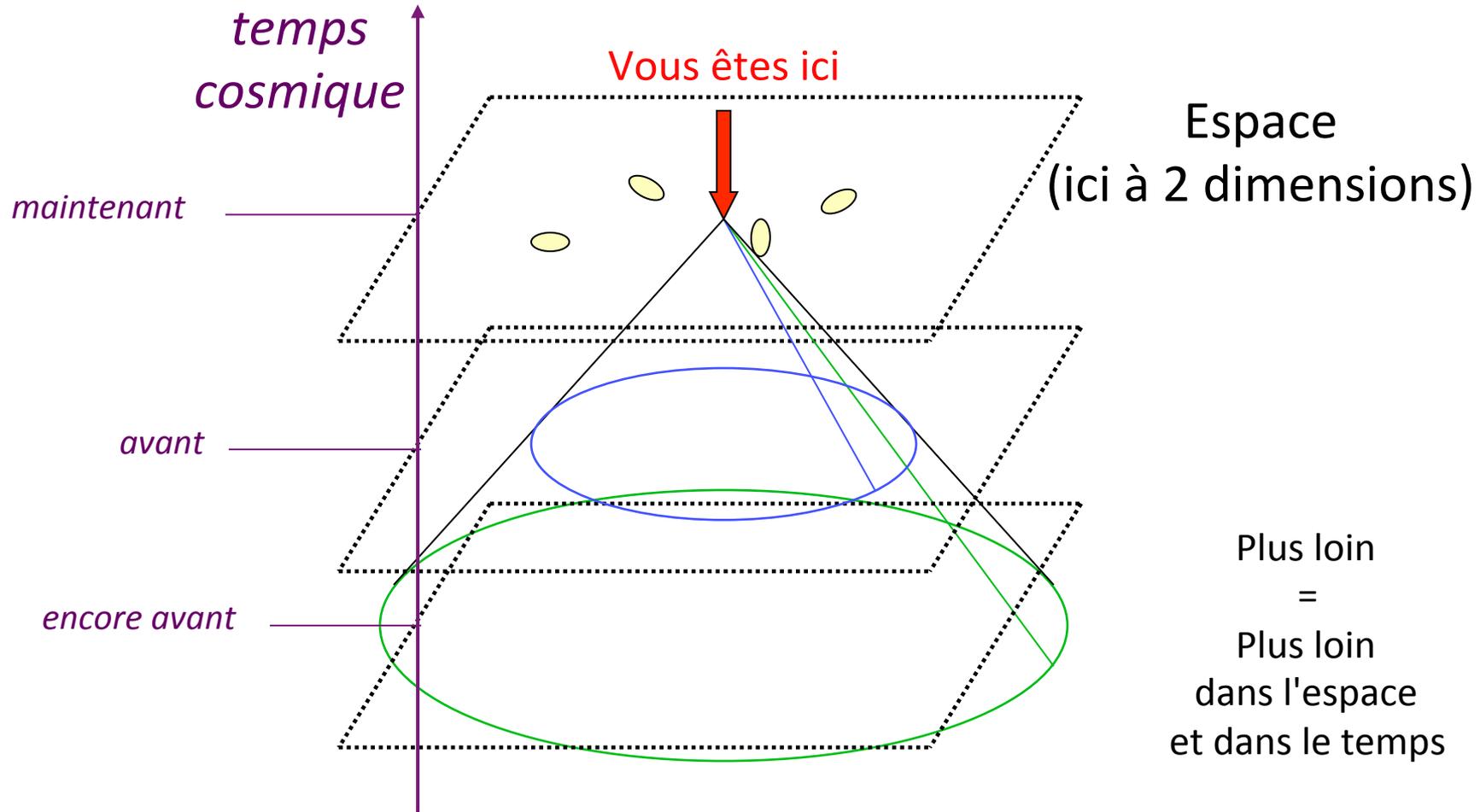
formation des atomes

Le fond cosmologique



Emission of d'un rayonnement fossile :
le fond diffus cosmologique
(Cosmic Microwave Background – CMB)

Regarder le passé



Regarder le passé

AVANTAGE

On peut voir le passé !!

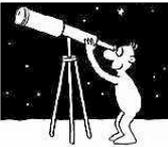
Regarder le passé

INCONVÉNIENT

On ne peut voir que le passé !!
(et en plus, pas ici)

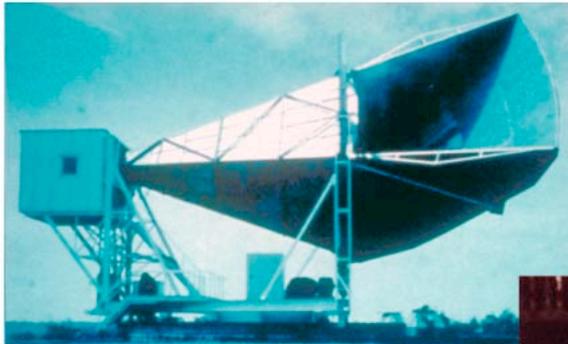
Rayonnement émis
quand l'univers avait
380.000 ans

13,8 milliards d'années



La découverte (il y a 50 ans)

DISCOVERY OF COSMIC BACKGROUND



Microwave Receiver



Robert Wilson



Arno Penzias

MAP990045

Penzias & Wilson 1964

1964: Arno Penzias & Robert Wilson
découvrent le
Fond diffus cosmologique

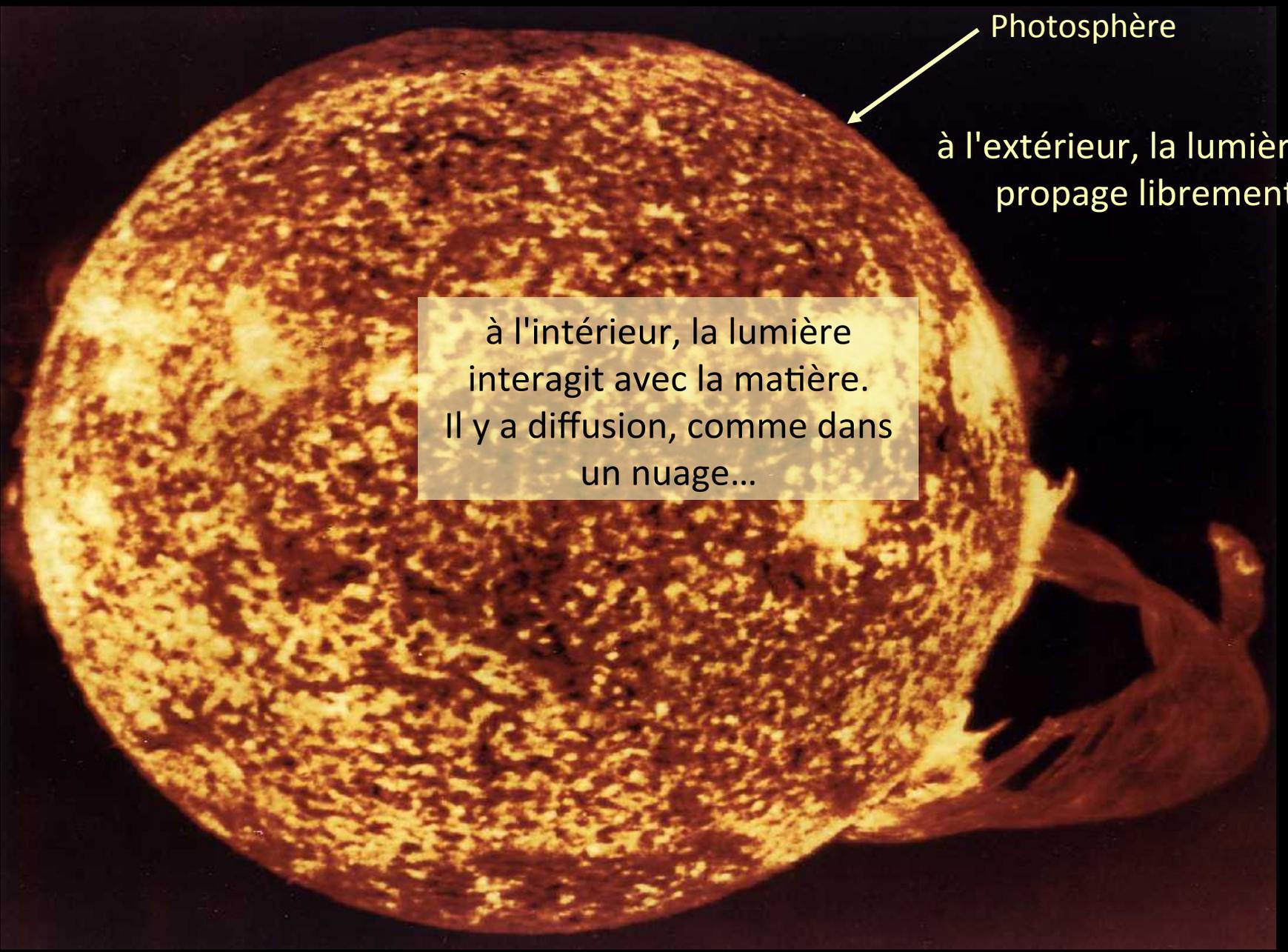
Un rayonnement homogène
(extragalactique)

Une confirmation spectaculaire du scénario
de Big-Bang chaud !

La température observable
dépend de

- de la température intrinsèque
- de la gravité locale
- des vitesses



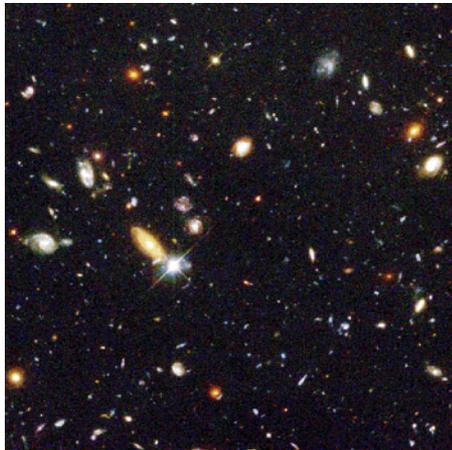
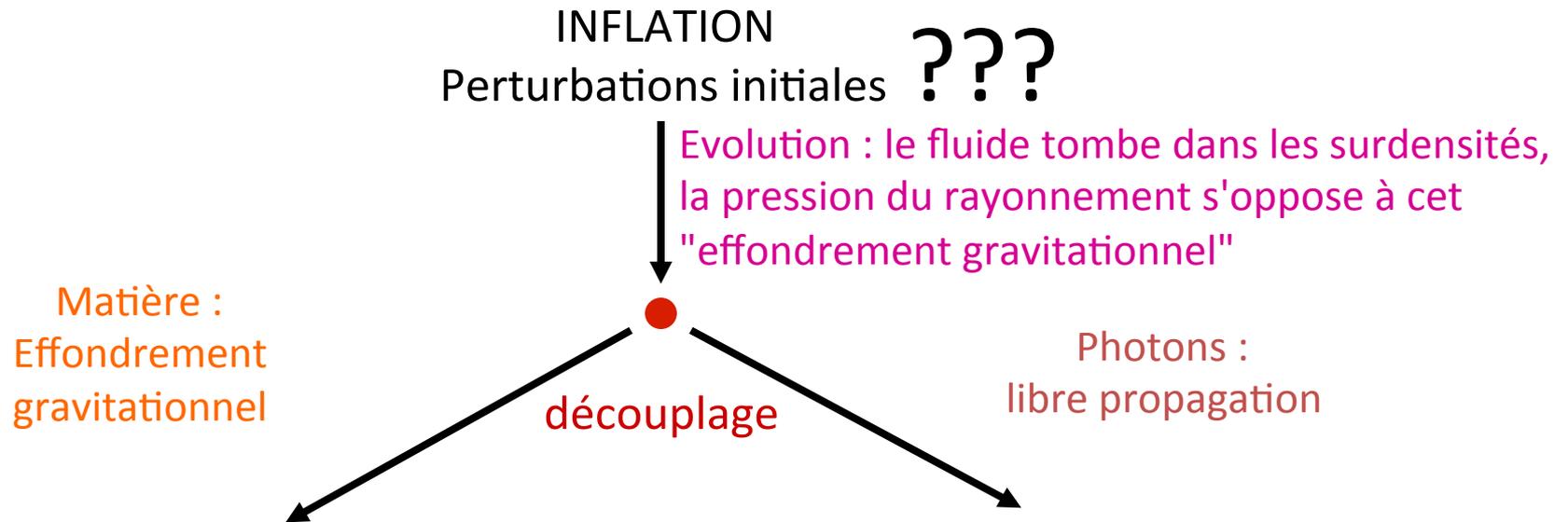


Photosphère

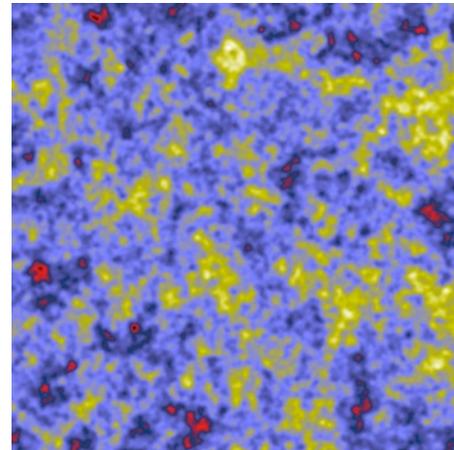
à l'extérieur, la lumière se propage librement

à l'intérieur, la lumière interagit avec la matière.
Il y a diffusion, comme dans un nuage...

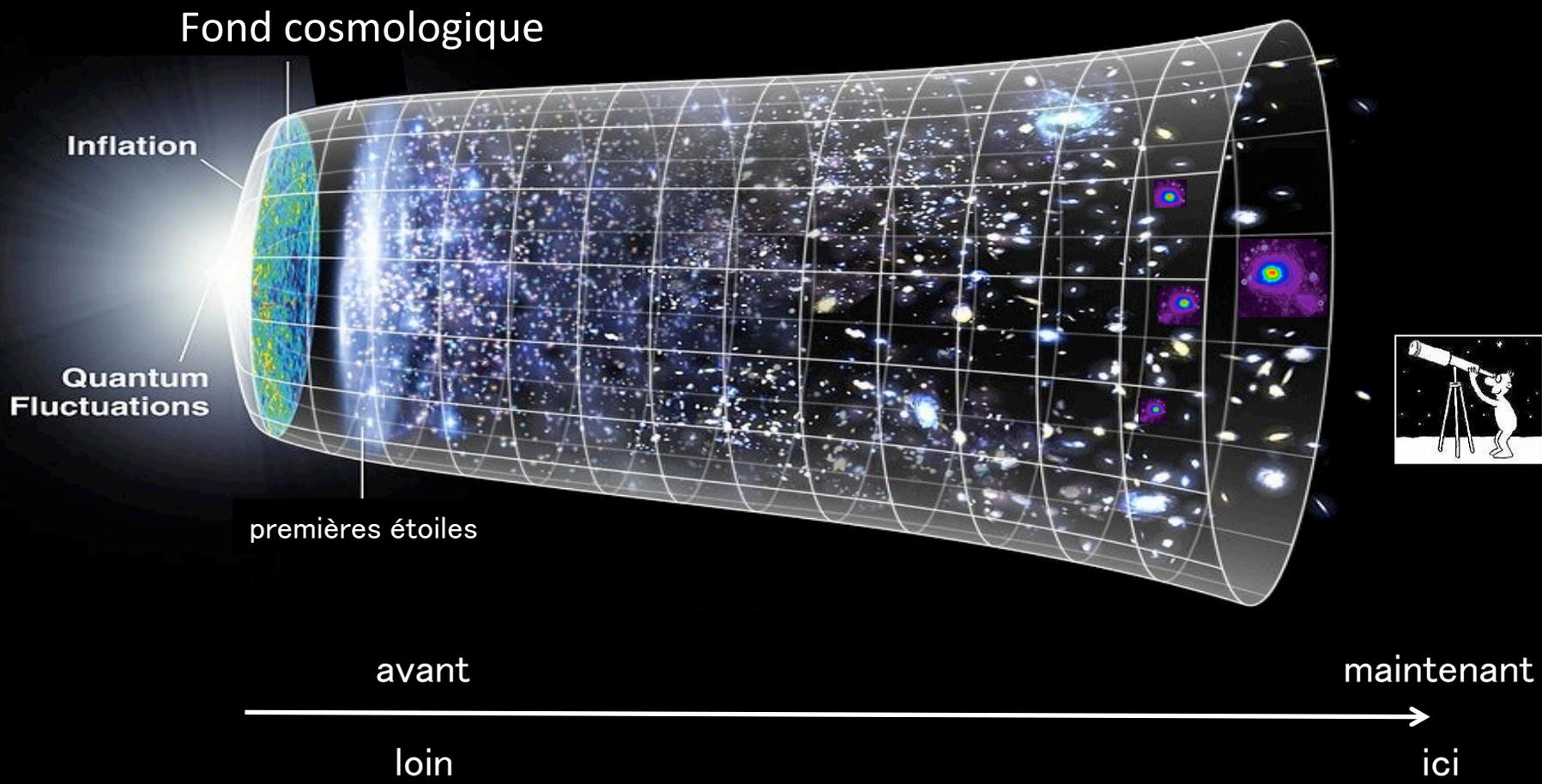
Un brève histoire des structures



structures



CMB

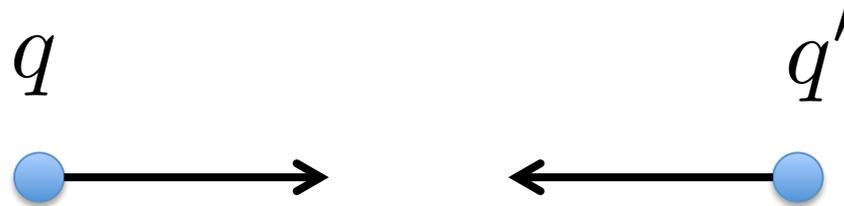


Plan de l'exposé

- Petite histoire de l'Univers
- Fond de rayonnement cosmologique
- • Polarisation
- Univers primordial et inflation
- Lentilles gravitationnelles
- Observations futures
- Conclusion

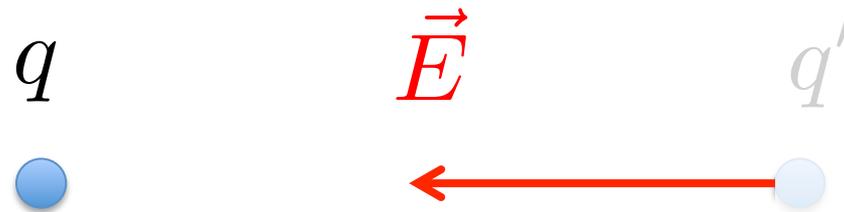
Force électrique

Deux particules chargées

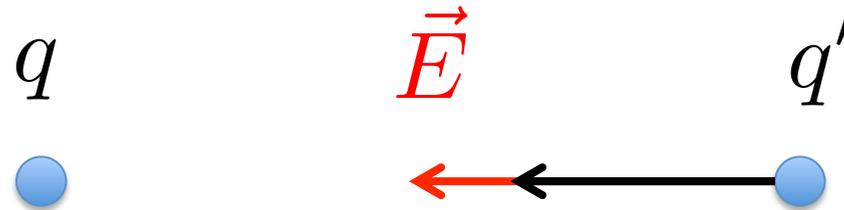


$$F \propto \frac{qq'}{r^2}$$

Champ électrique



Champ électrique



$$\vec{F} = q' \vec{E}$$

Champ créé par une "antenne"...

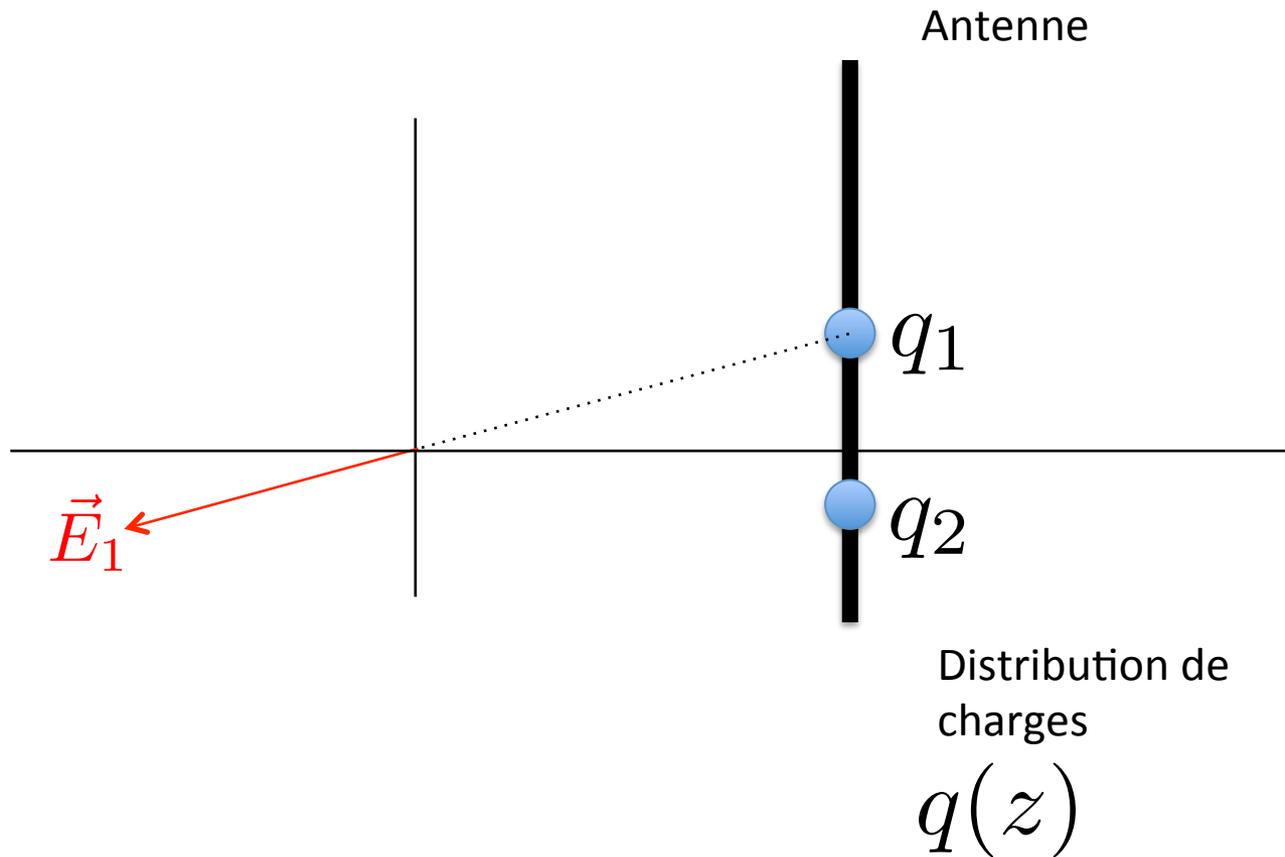
Antenne



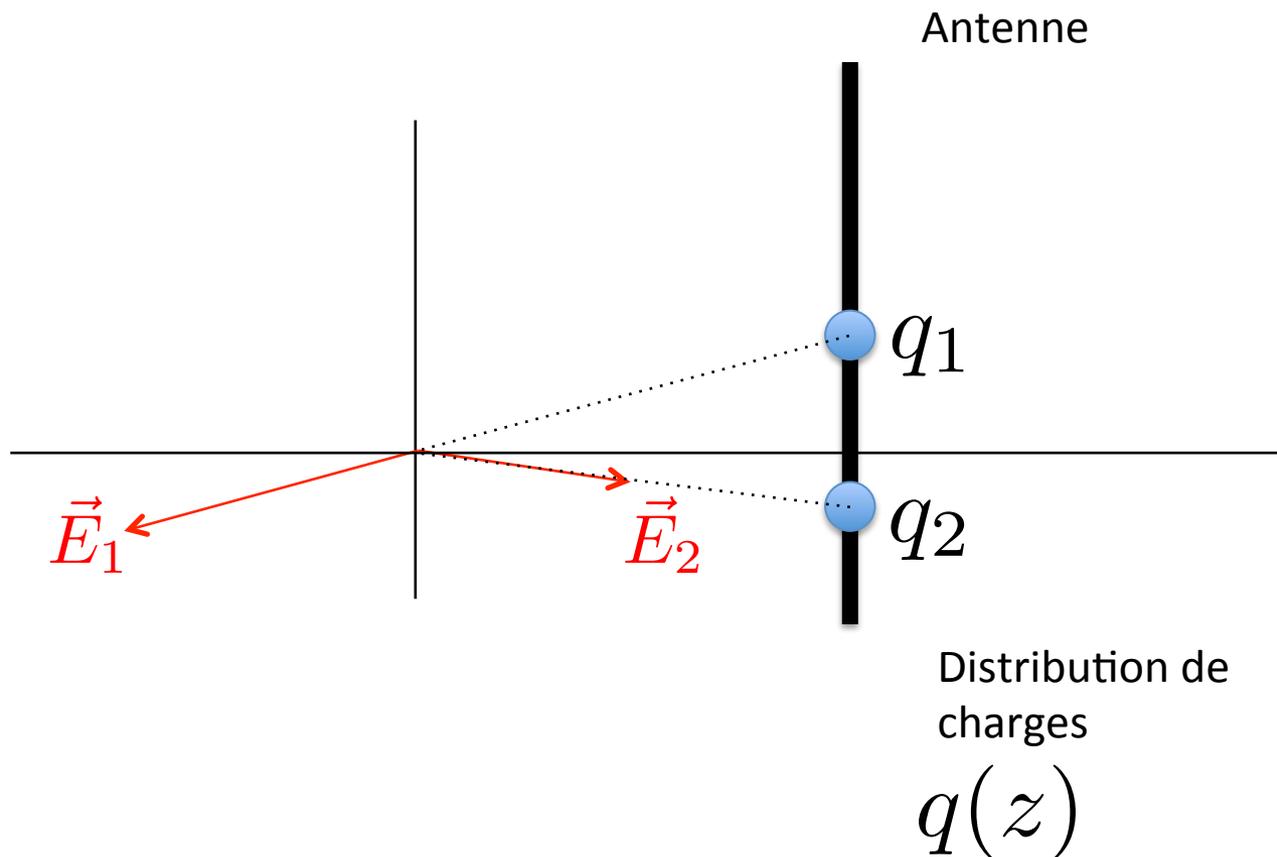
Distribution de
charges

$$q(z, t)$$

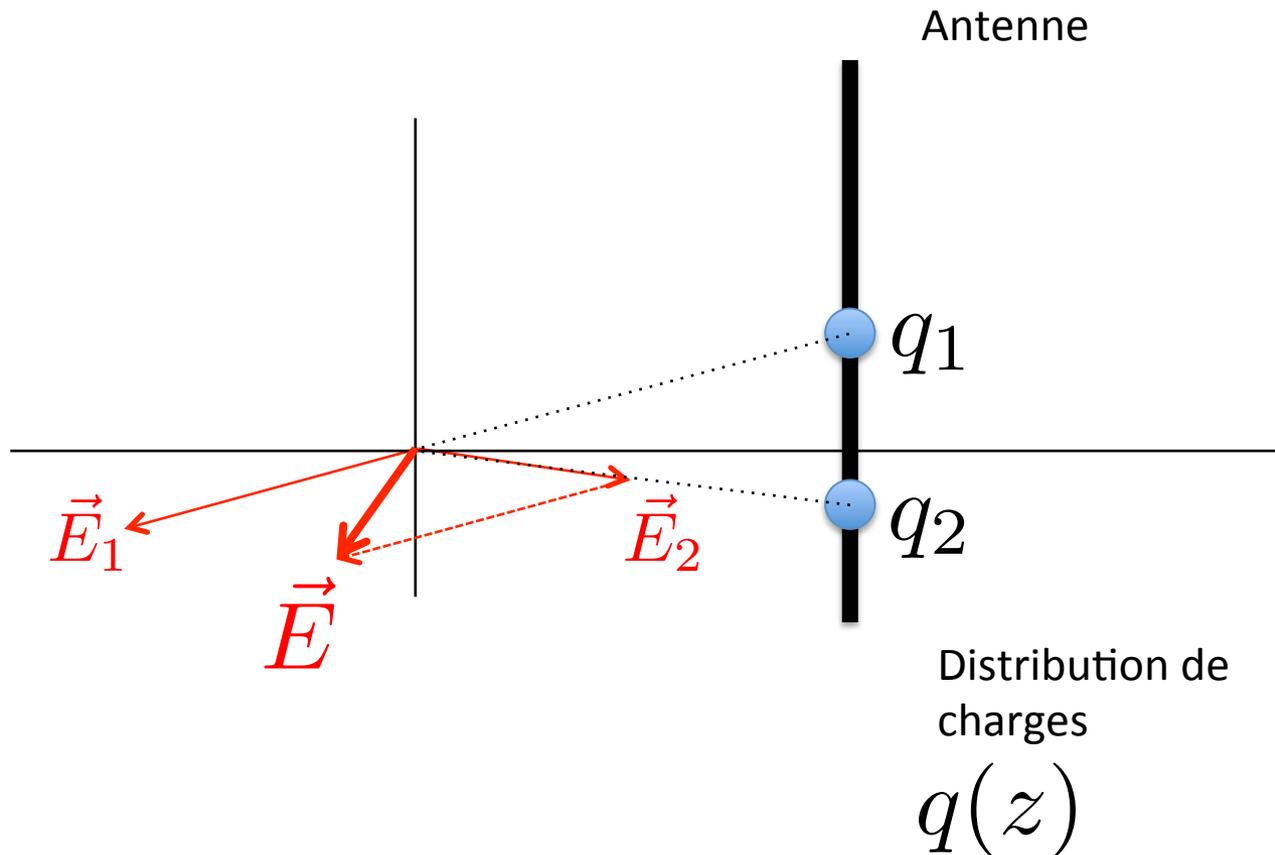
Champ créé par une "antenne"...



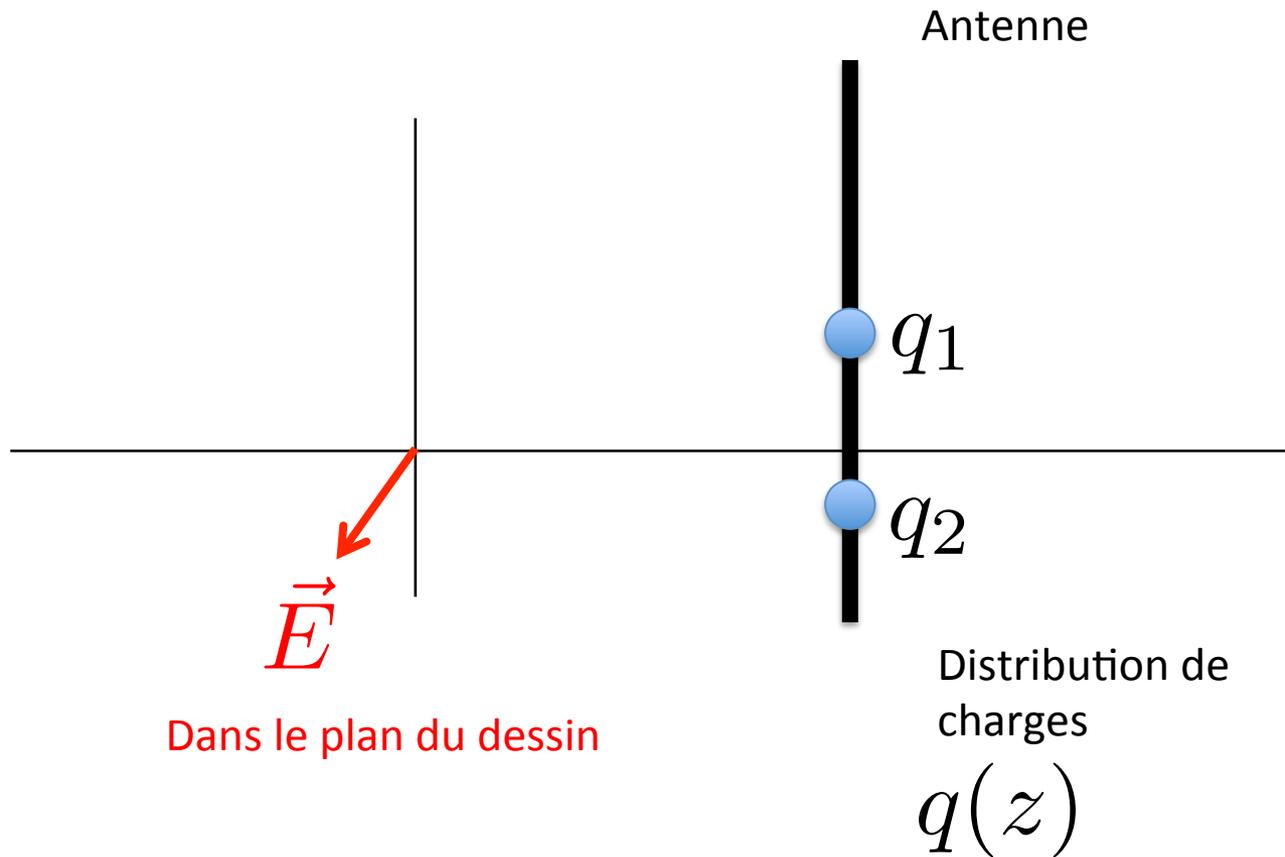
Champ créé par une "antenne"...



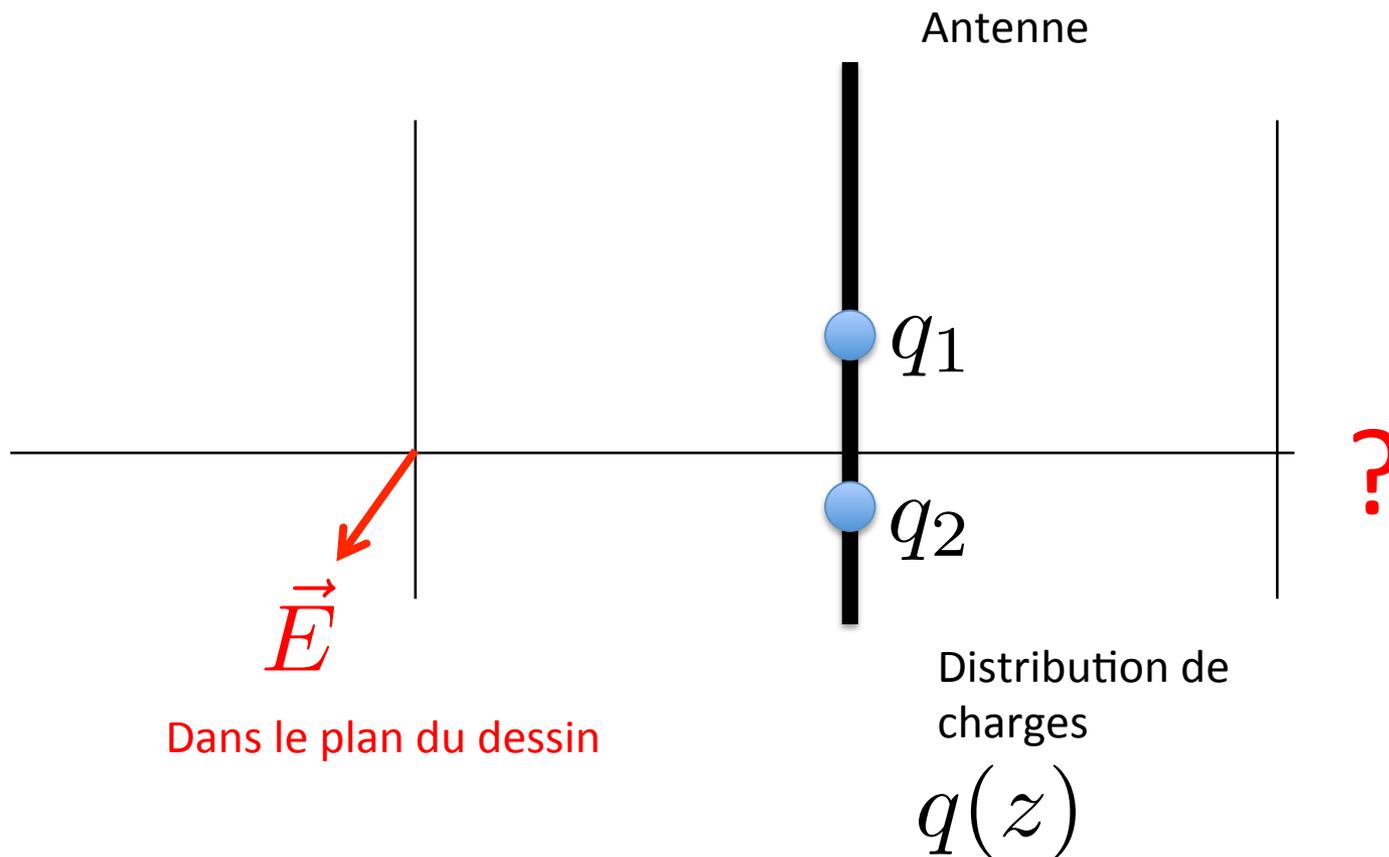
Champ créé par une "antenne"...



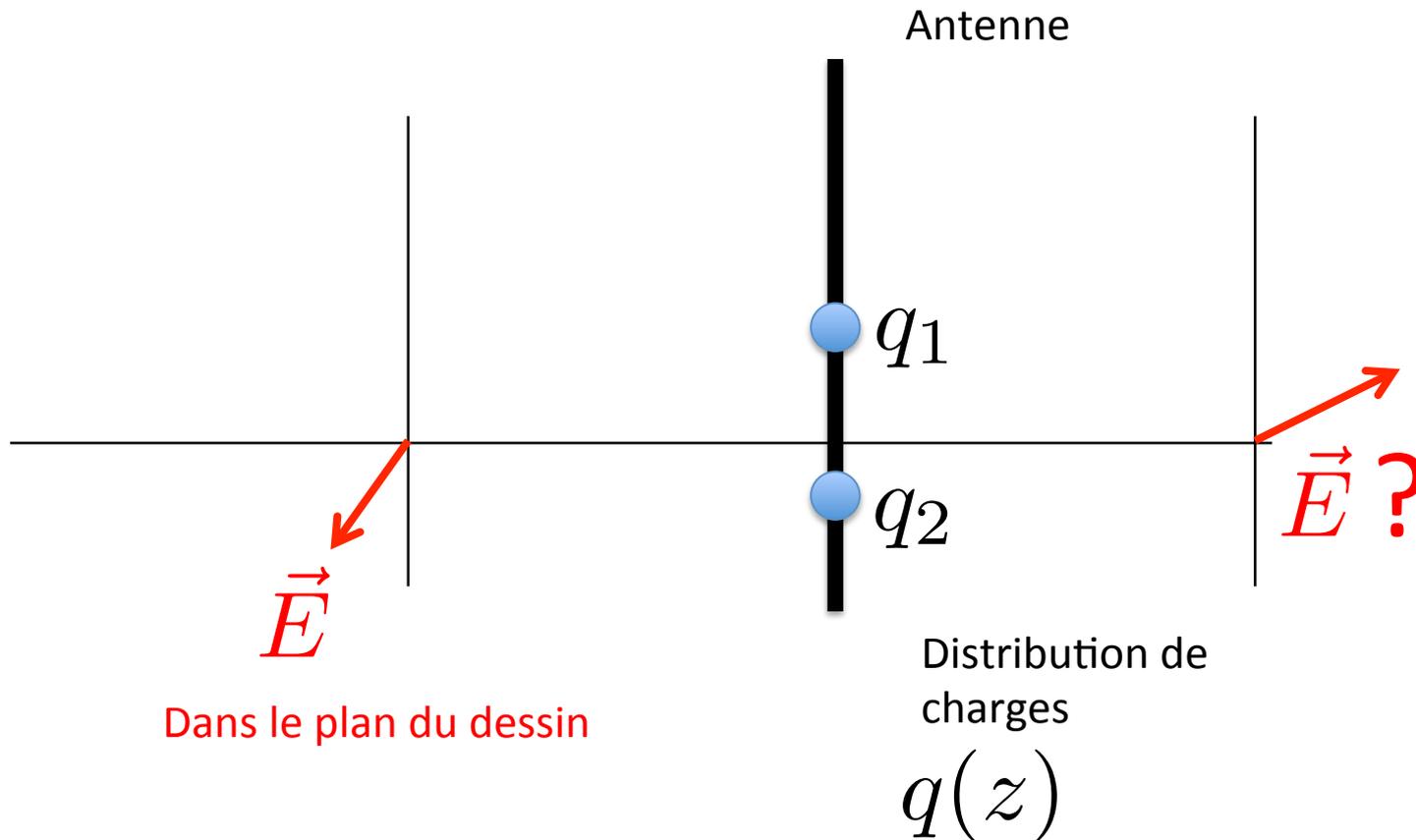
Champ créé par une "antenne"...



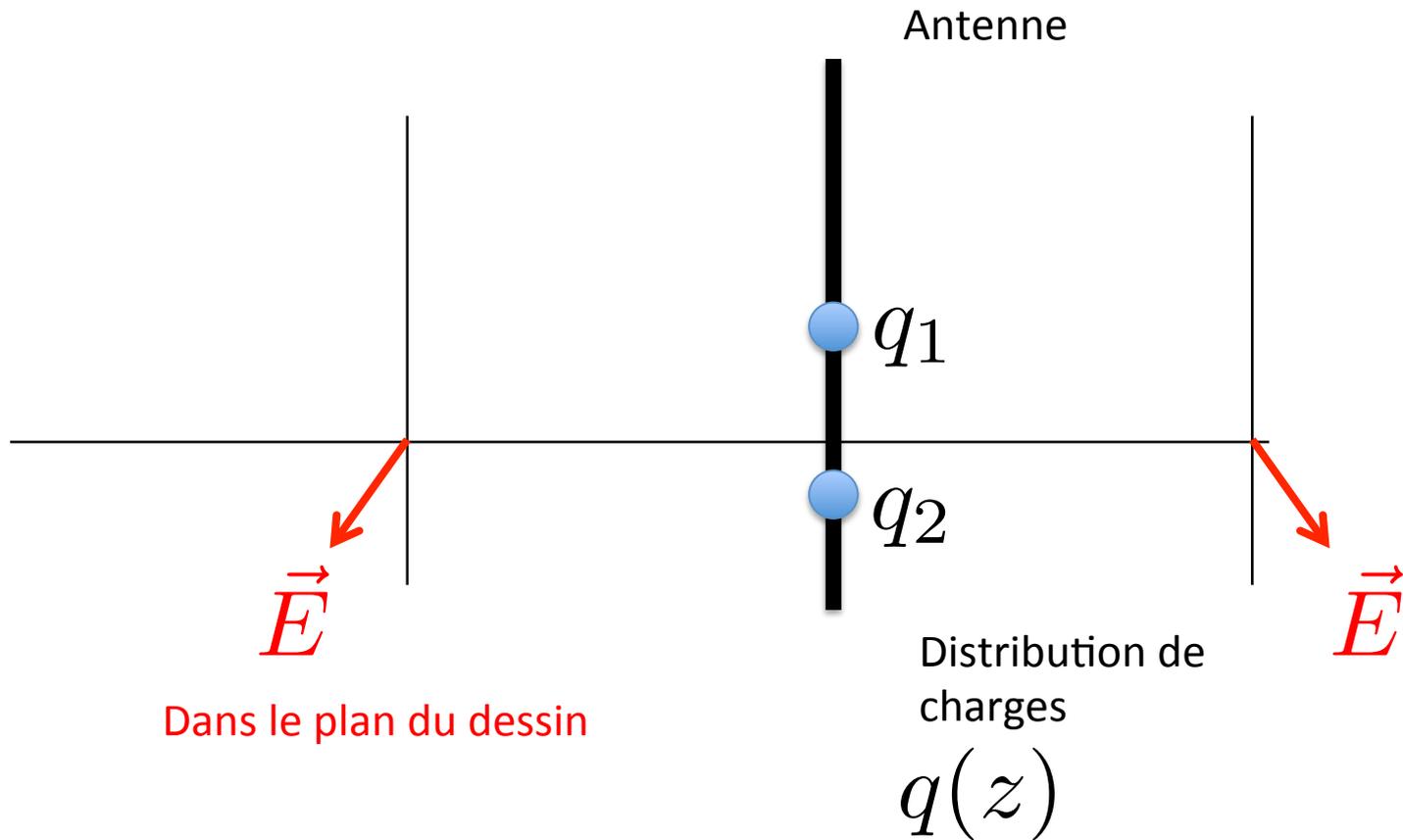
Champ créé par une "antenne"...



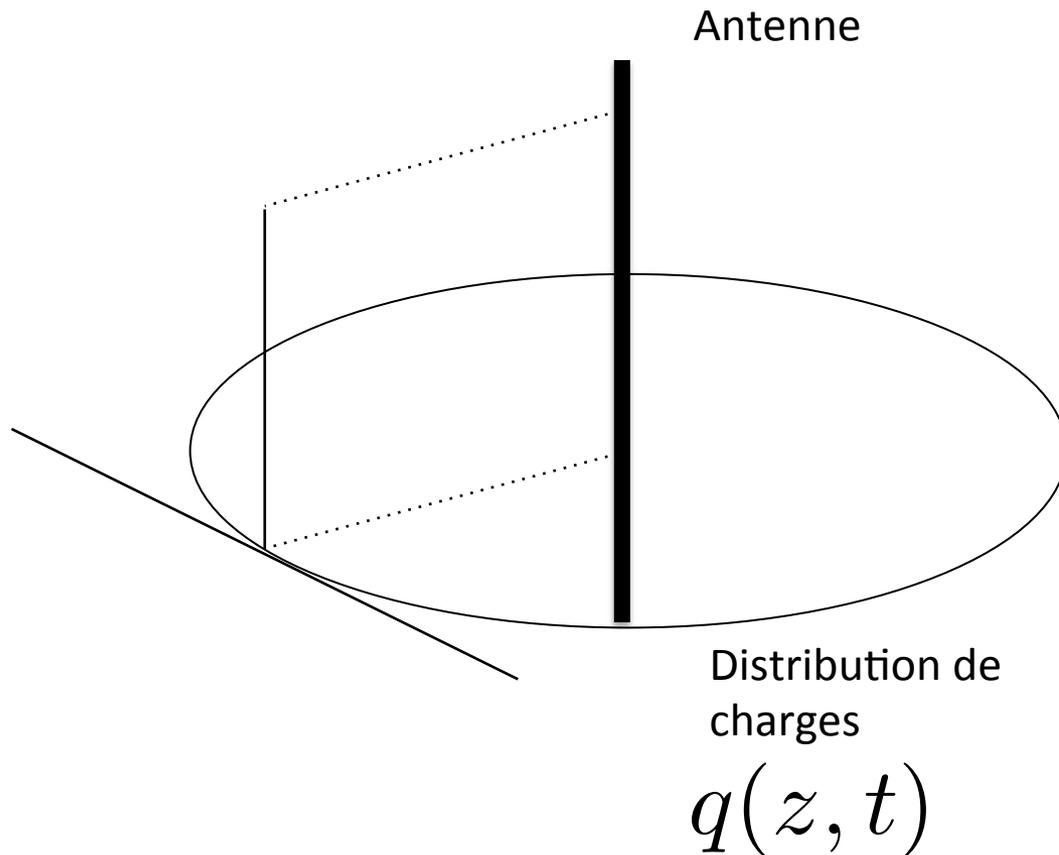
Champ créé par une "antenne"...



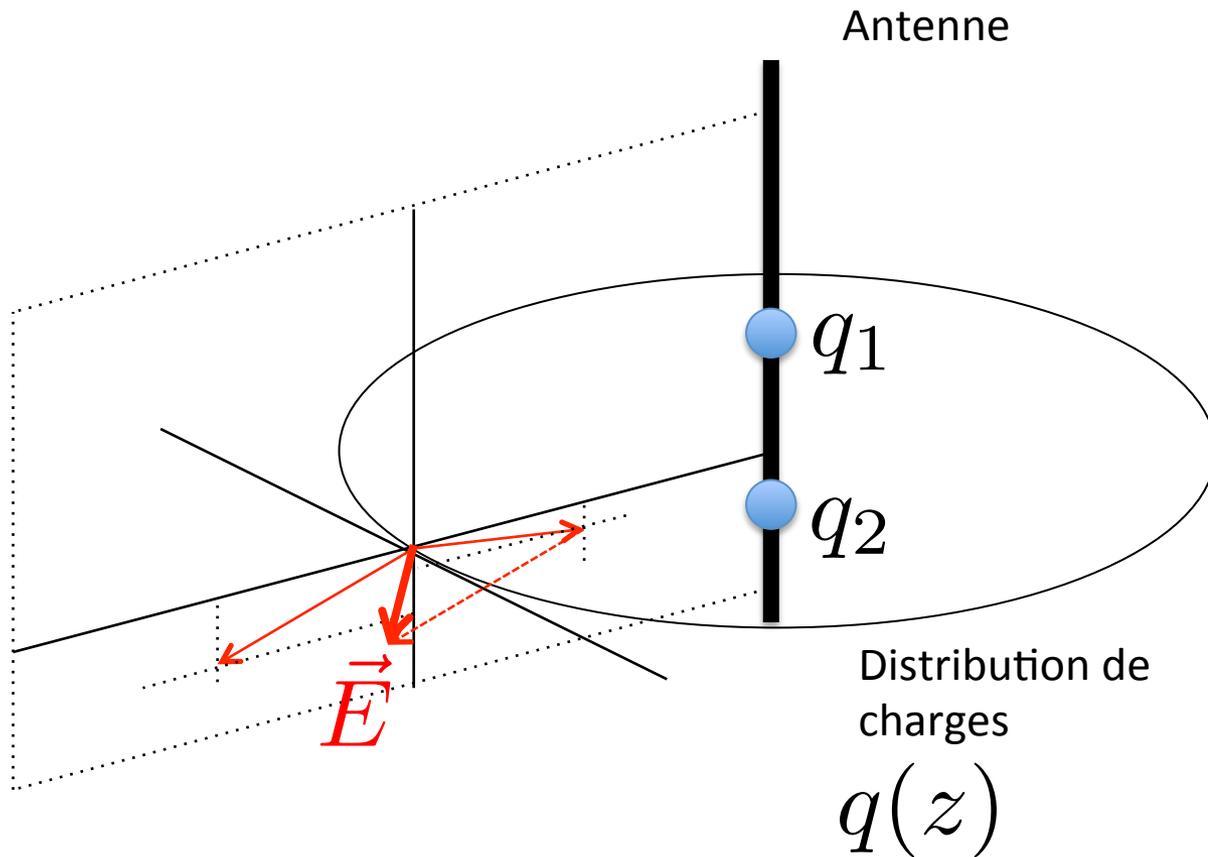
Champ créé par une "antenne"...



Champ créé par une "antenne"...

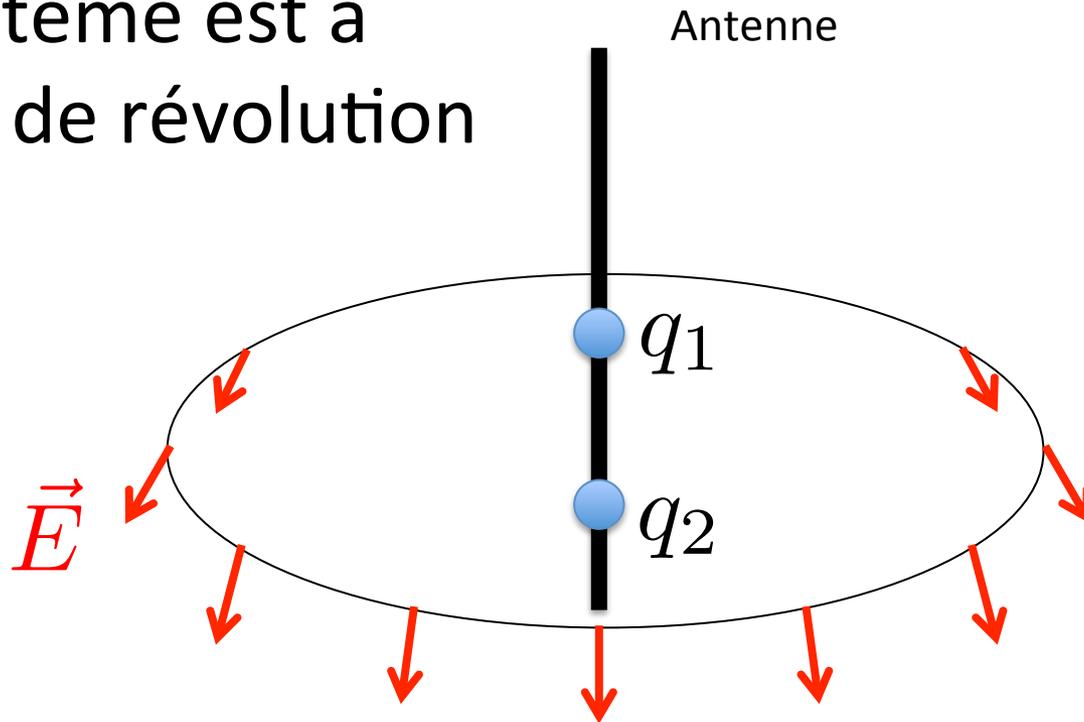


Champ créé par une "antenne"...

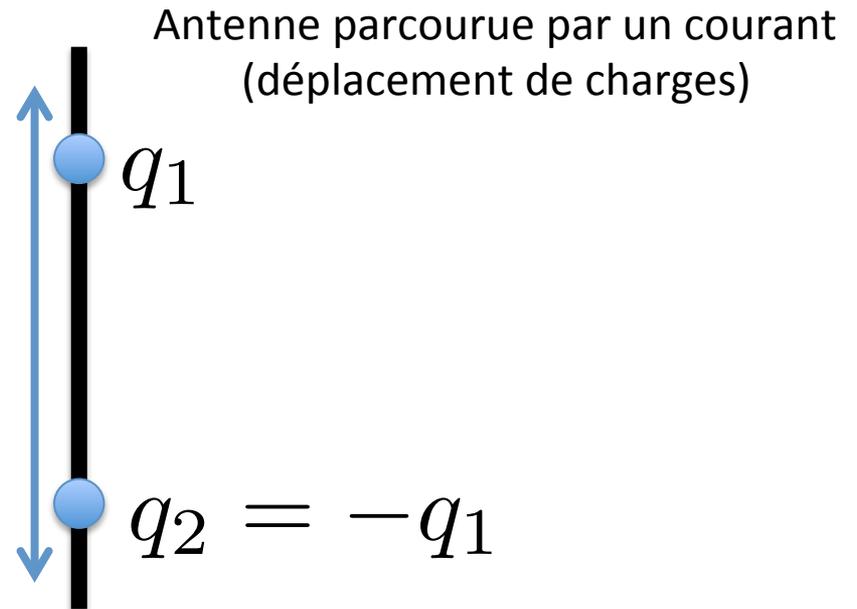


Symétrie ...

Le système est à symétrie de révolution



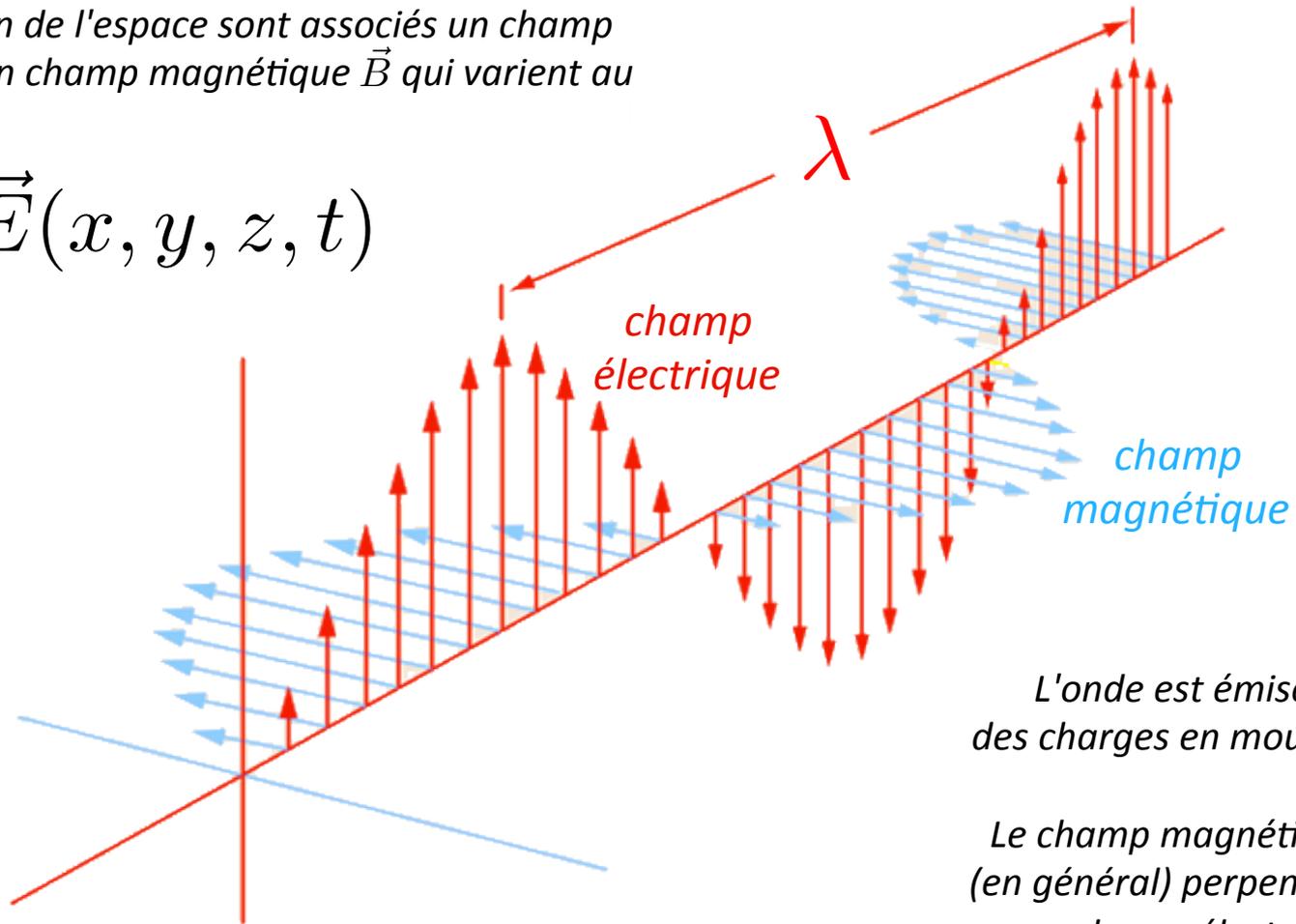
Antenne en émission...



Ondes électromagnétique

A chaque position de l'espace sont associés un champ électrique \vec{E} et un champ magnétique \vec{B} qui varient au cours du temps :

$$\vec{E}(x, y, z, t)$$



L'onde est émise par des charges en mouvement.

Le champ magnétique est (en général) perpendiculaire au champ électrique...

Des antennes d'émission radio



13 février 2015



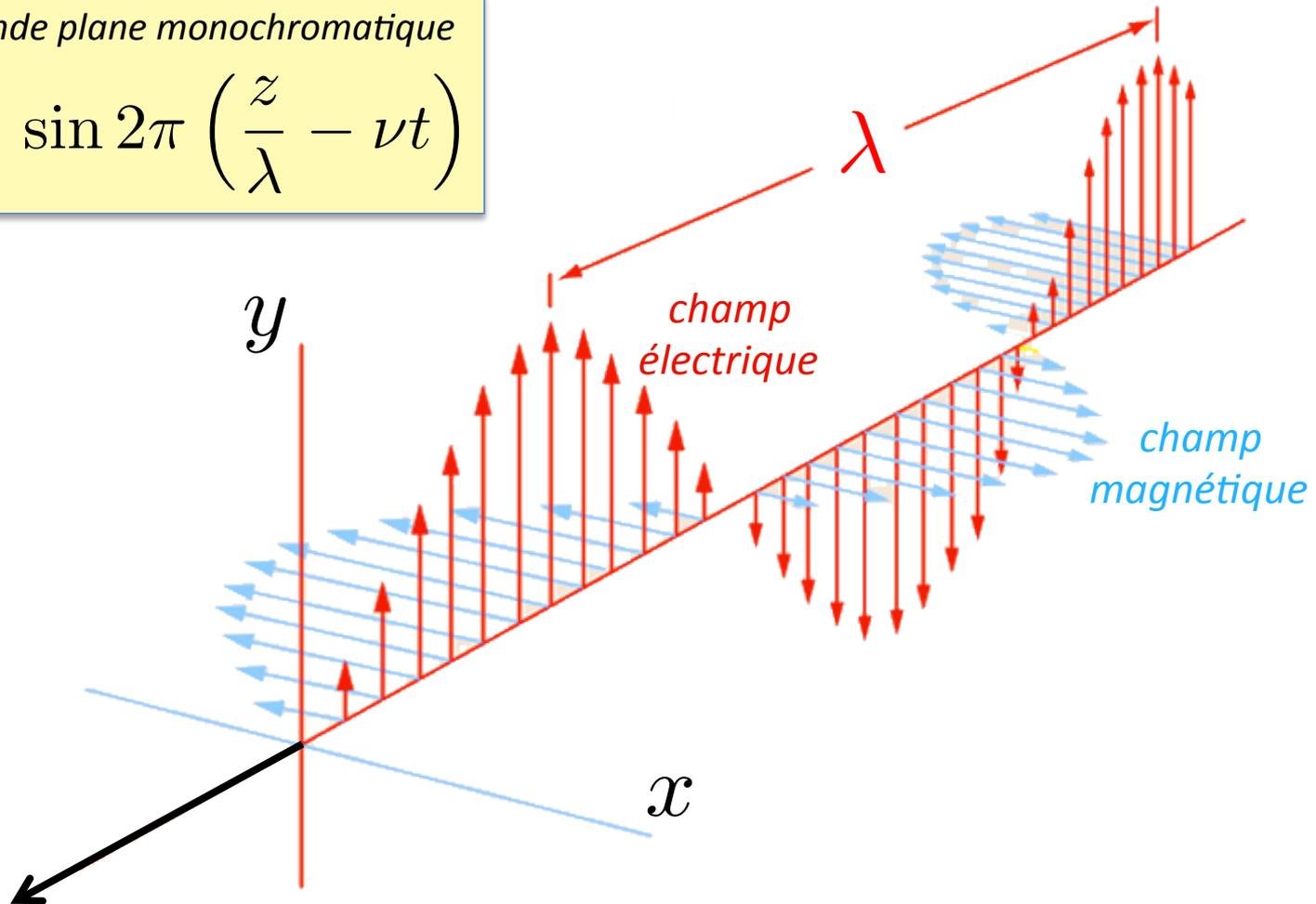
CORÉ+

46

L'onde se propage

EXEMPLE : Onde plane monochromatique

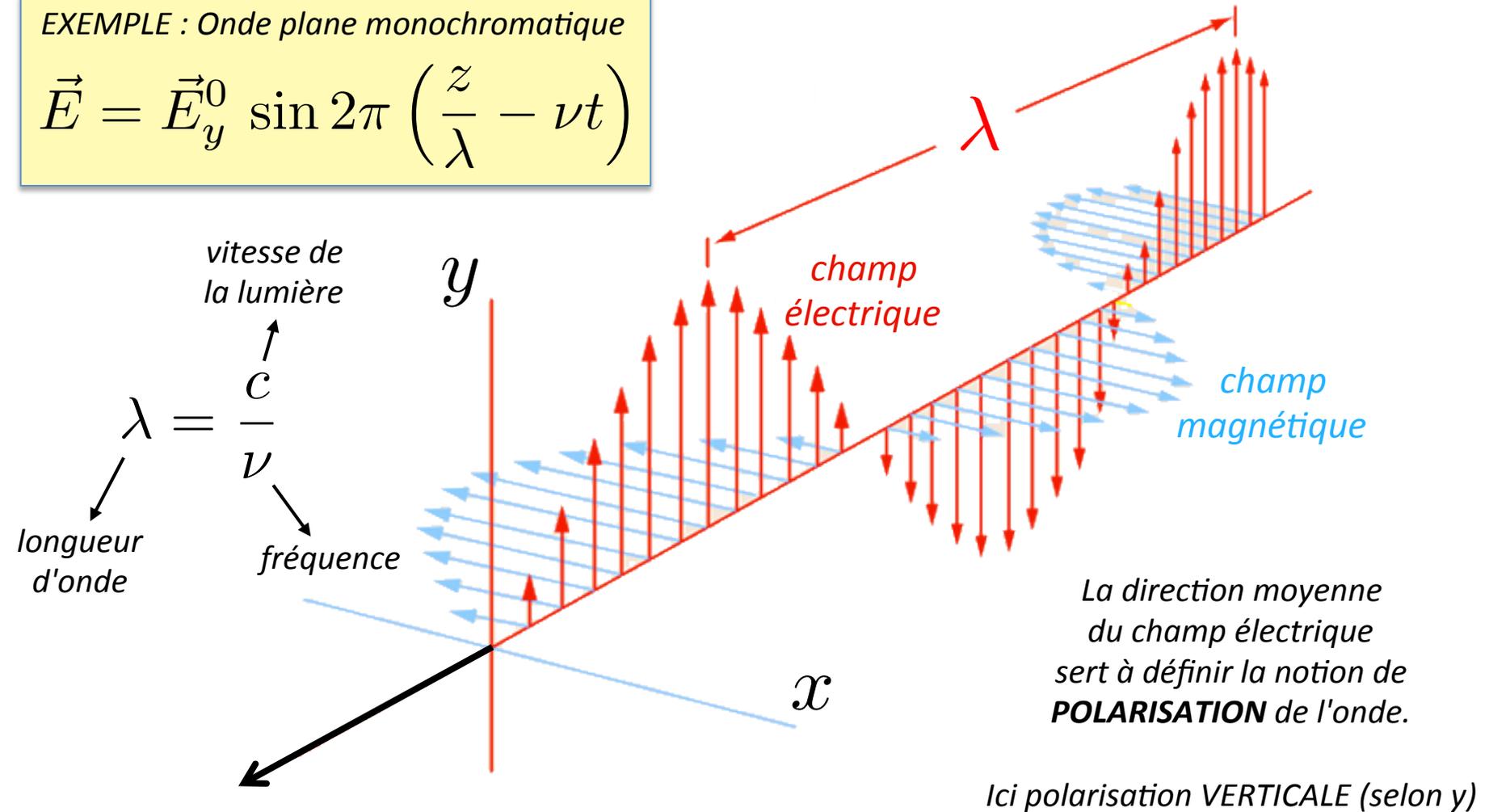
$$\vec{E} = \vec{E}_y^0 \sin 2\pi \left(\frac{z}{\lambda} - \nu t \right)$$



L'onde se propage

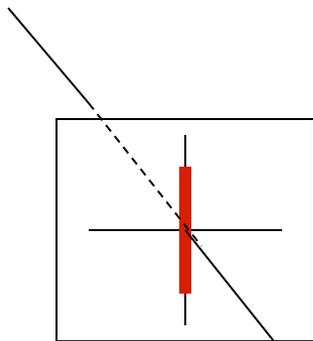
EXEMPLE : Onde plane monochromatique

$$\vec{E} = \vec{E}_y^0 \sin 2\pi \left(\frac{z}{\lambda} - \nu t \right)$$

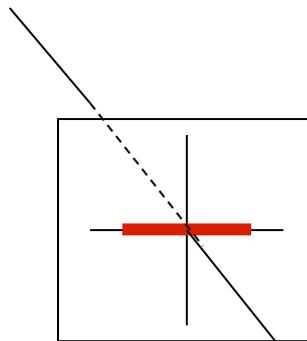


La polarisation

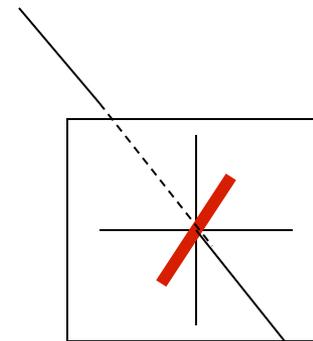
Une propriété du rayonnement électromagnétique



vertical



horizontal



angle
quelconque

Petite parenthèse mathématique

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 e^{i\phi_x} \\ E_2 e^{i\phi_y} \end{pmatrix}$$

Matrice de cohérence de l'onde

$$\begin{pmatrix} \langle E_x \bar{E}_x \rangle & \langle E_x \bar{E}_y \rangle \\ \langle E_y \bar{E}_x \rangle & \langle E_y \bar{E}_y \rangle \end{pmatrix}$$

moyenne sur un temps
long devant la période

(à un endroit donné)

Petite parenthèse mathématique

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 e^{i\phi_x} \\ E_2 e^{i\phi_y} \end{pmatrix}$$

Matrice de cohérence de l'onde

$$\begin{pmatrix} \langle E_x \bar{E}_x \rangle & \langle E_x \bar{E}_y \rangle \\ \langle E_y \bar{E}_x \rangle & \langle E_y \bar{E}_y \rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1^2 & E_1 E_2 \langle e^{i(\phi_x - \phi_y)} \rangle \\ E_1 E_2 \langle e^{i(\phi_y - \phi_x)} \rangle & E_2^2 \end{pmatrix}$$

Petite parenthèse mathématique

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 e^{i\phi_x} \\ E_2 e^{i\phi_y} \end{pmatrix}$$

Matrice de cohérence de l'onde

$$\begin{pmatrix} \langle E_x \bar{E}_x \rangle & \langle E_x \bar{E}_y \rangle \\ \langle E_y \bar{E}_x \rangle & \langle E_y \bar{E}_y \rangle \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} I + Q & U + iV \\ U - iV & I - Q \end{pmatrix}$$

Paramètres de Stokes I Q U V

Paramètres de Stokes

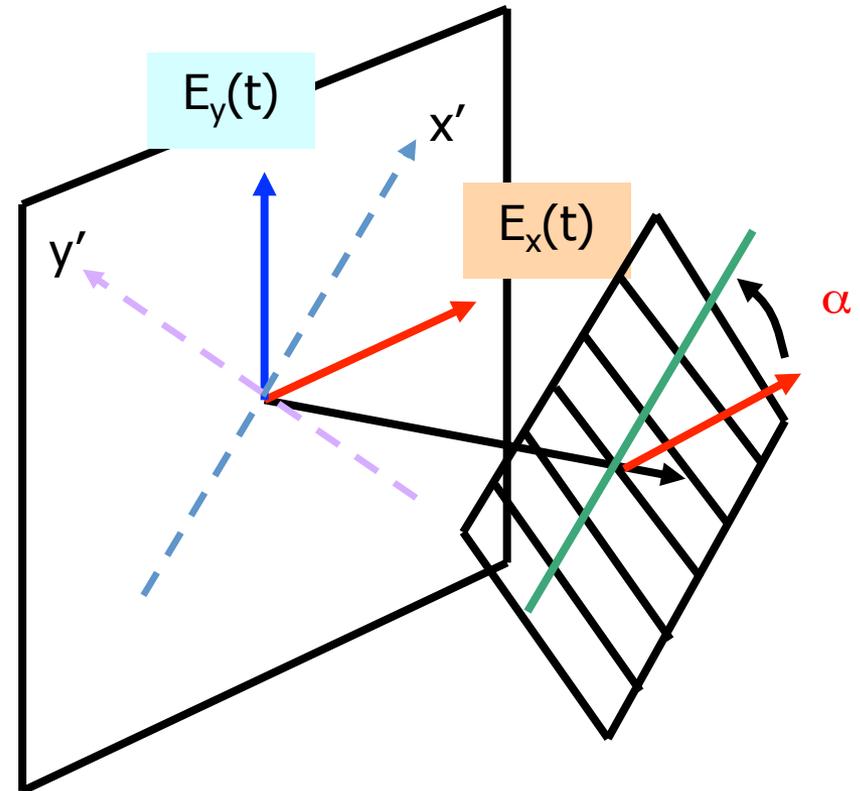
- Intensité totale:

$$I = [\langle E_x^2 \rangle + \langle E_y^2 \rangle]$$

- Polarisation linéaire:

$$Q = [\langle E_x^2 \rangle - \langle E_y^2 \rangle]$$

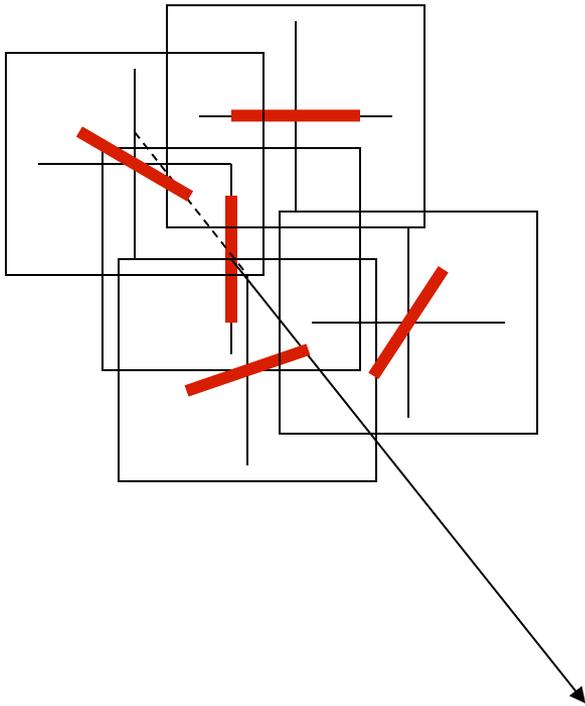
$$U = [\langle E_{x'}^2 \rangle - \langle E_{y'}^2 \rangle]$$



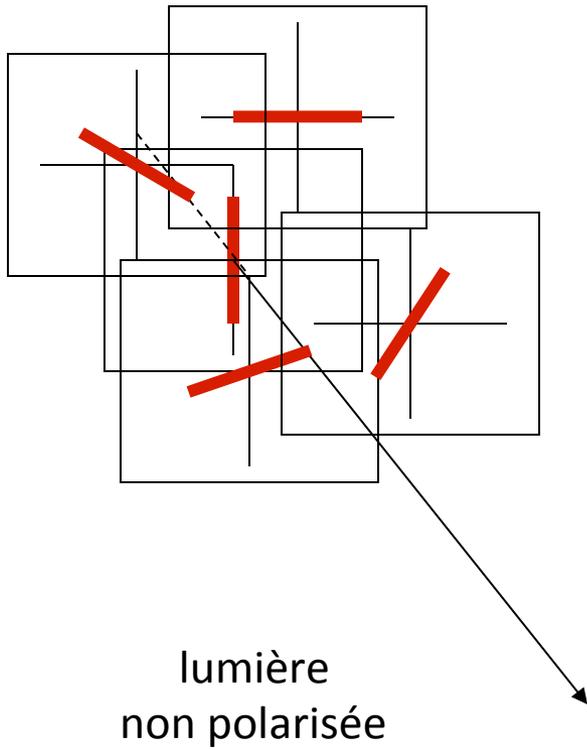
- Signal mesuré après un polariseur:

$$m = \frac{1}{2} [I + Q \cos 2\alpha + U \sin 2\alpha]$$

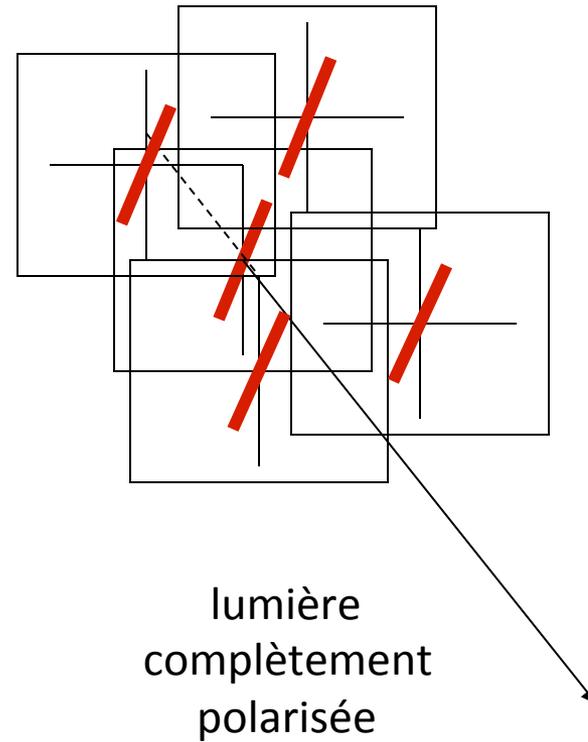
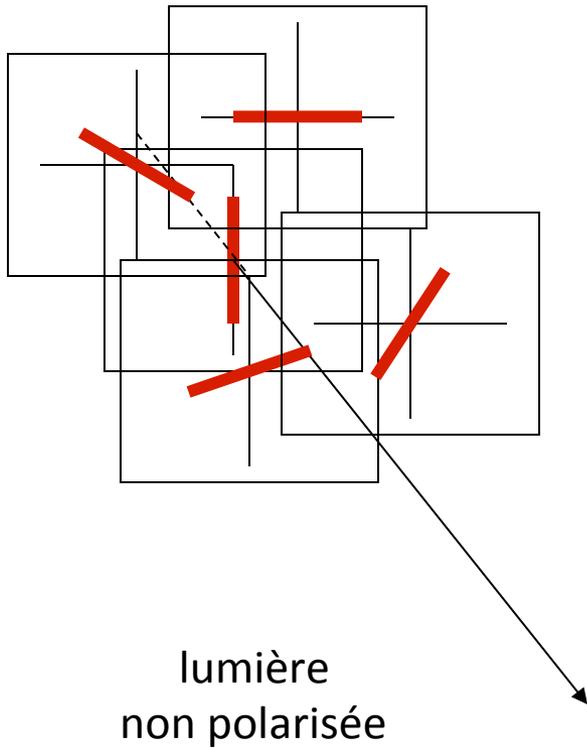
La polarisation



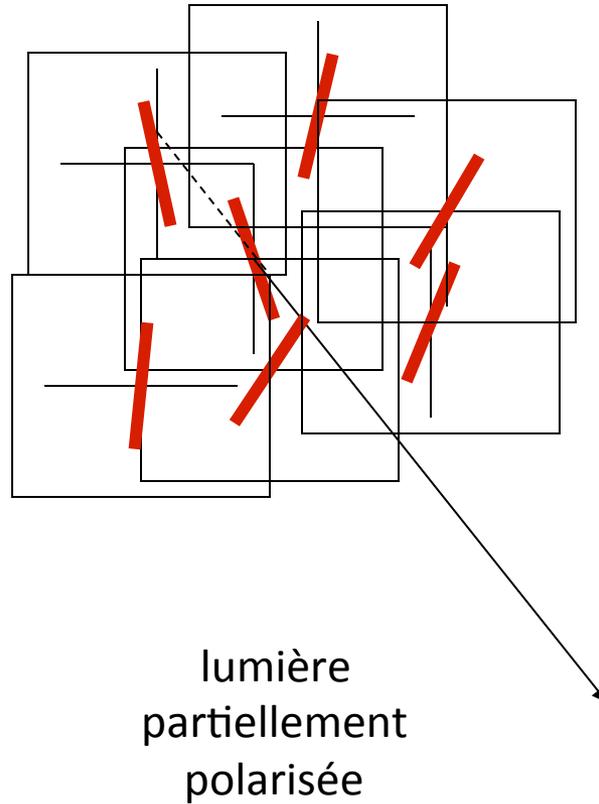
La polarisation



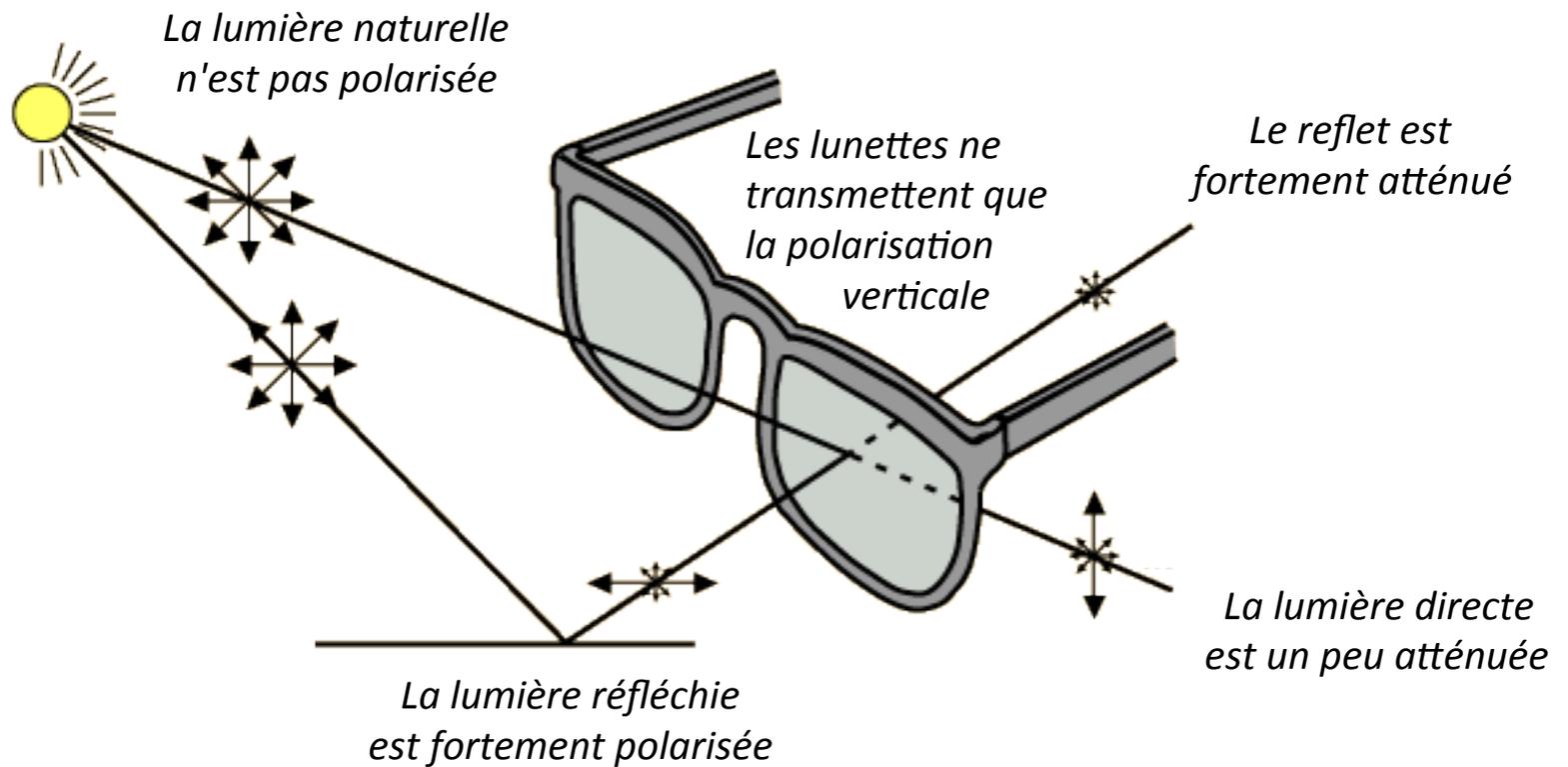
La polarisation



La polarisation





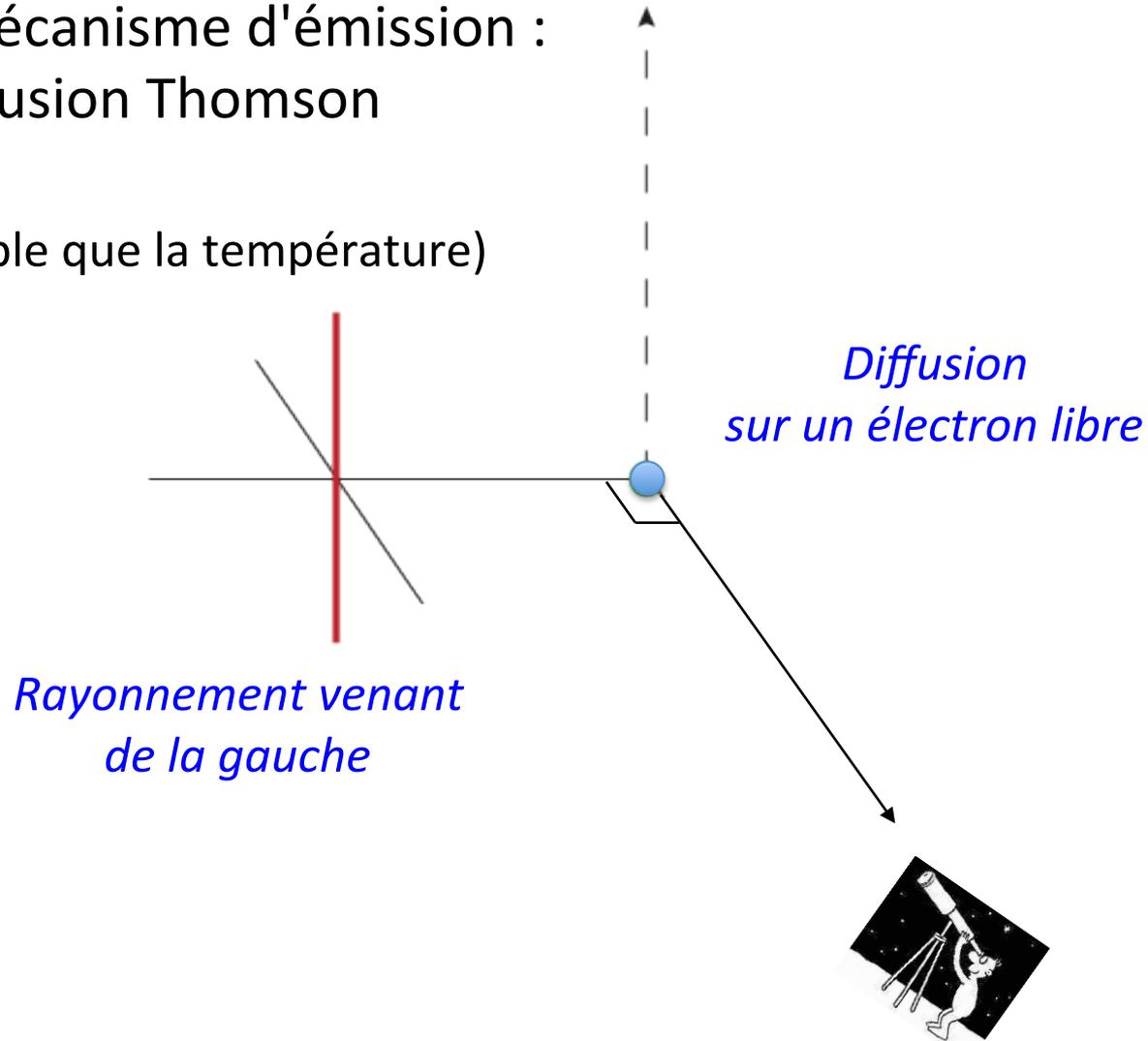




La polarisation du fond cosmologique

Un seul mécanisme d'émission :
Diffusion Thomson

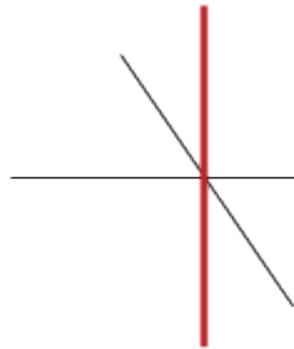
(plus simple que la température)



La polarisation du fond cosmologique

Un seul mécanisme d'émission :
Diffusion Thomson

(plus simple que la température)



*Rayonnement venant
de la gauche*

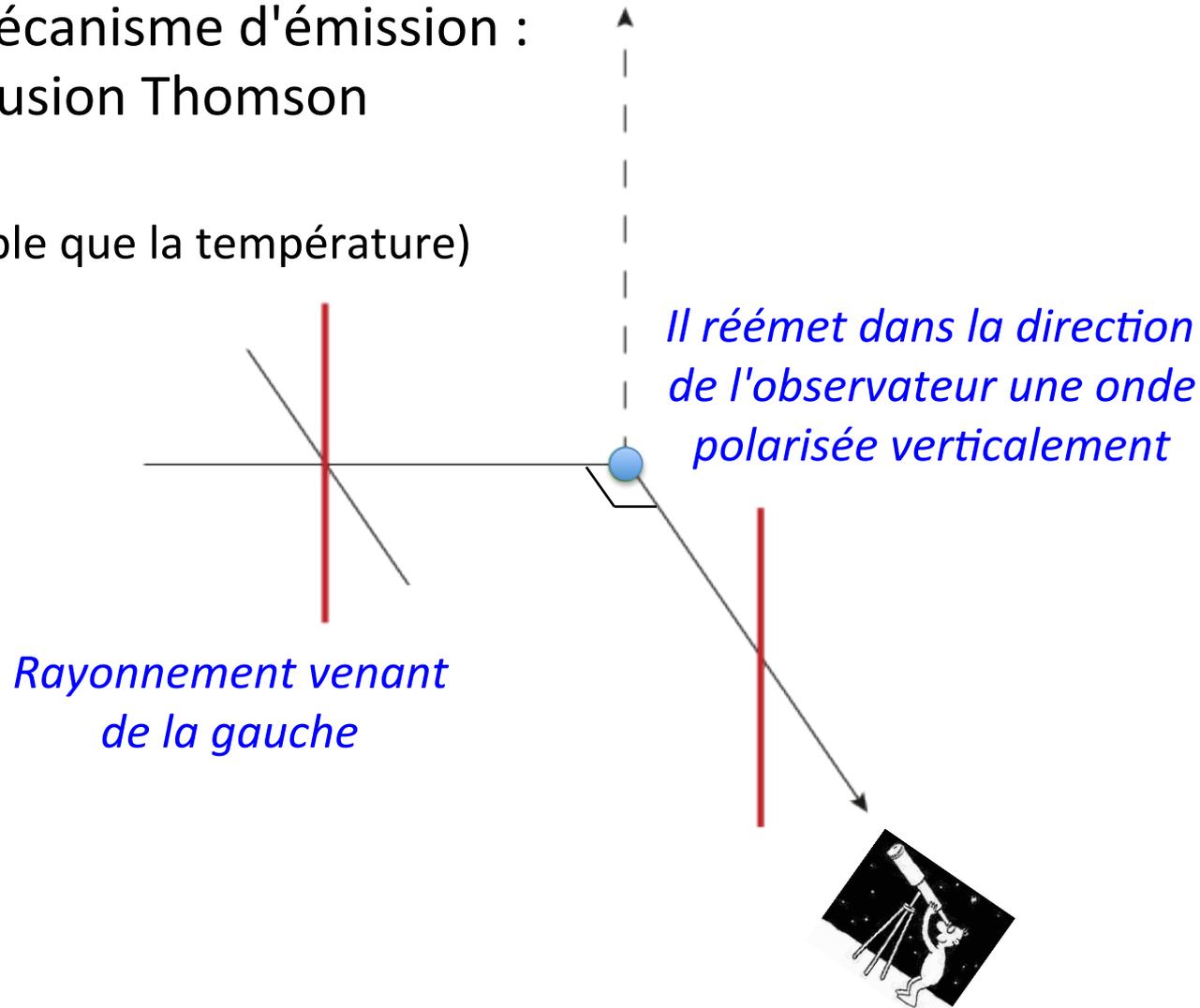
*L'électron oscille de
haut en bas sous l'effet
du champ électrique vertical*



La polarisation du fond cosmologique

Un seul mécanisme d'émission :
Diffusion Thomson

(plus simple que la température)

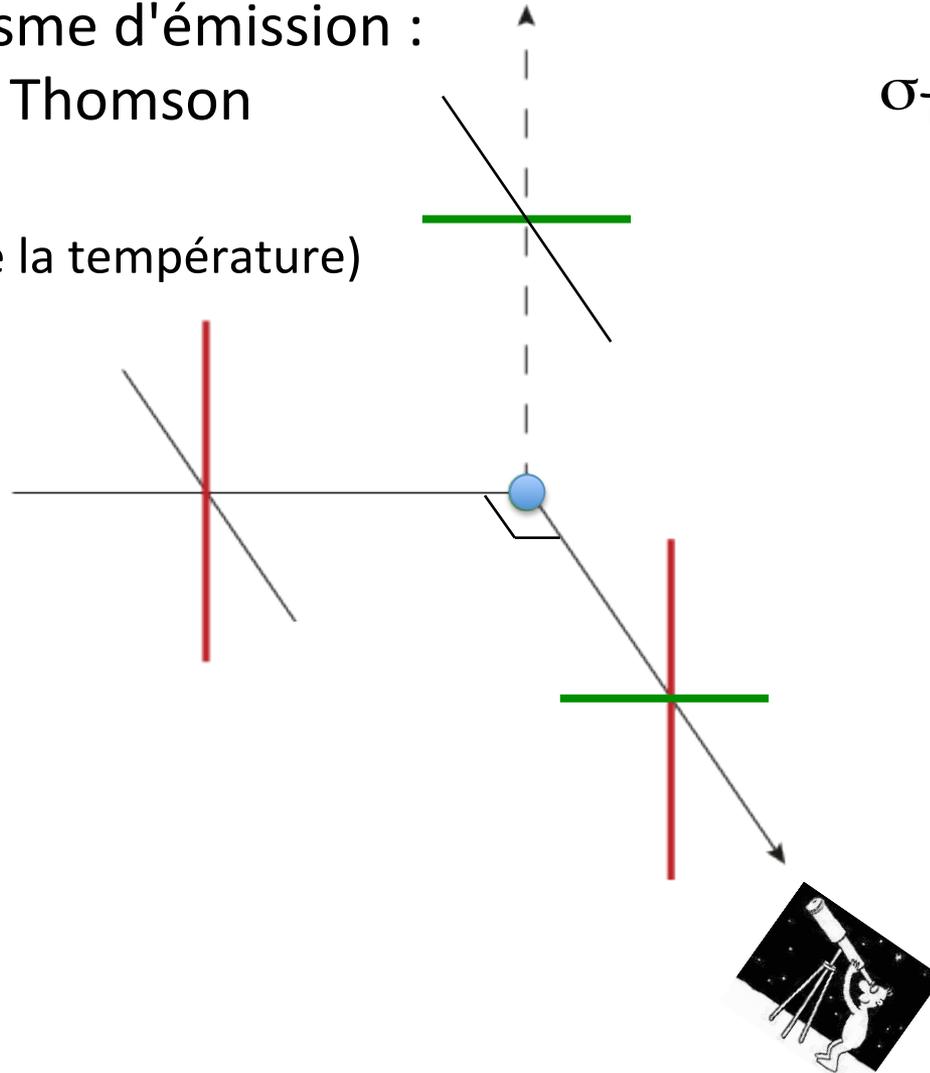


La polarisation du fond cosmologique

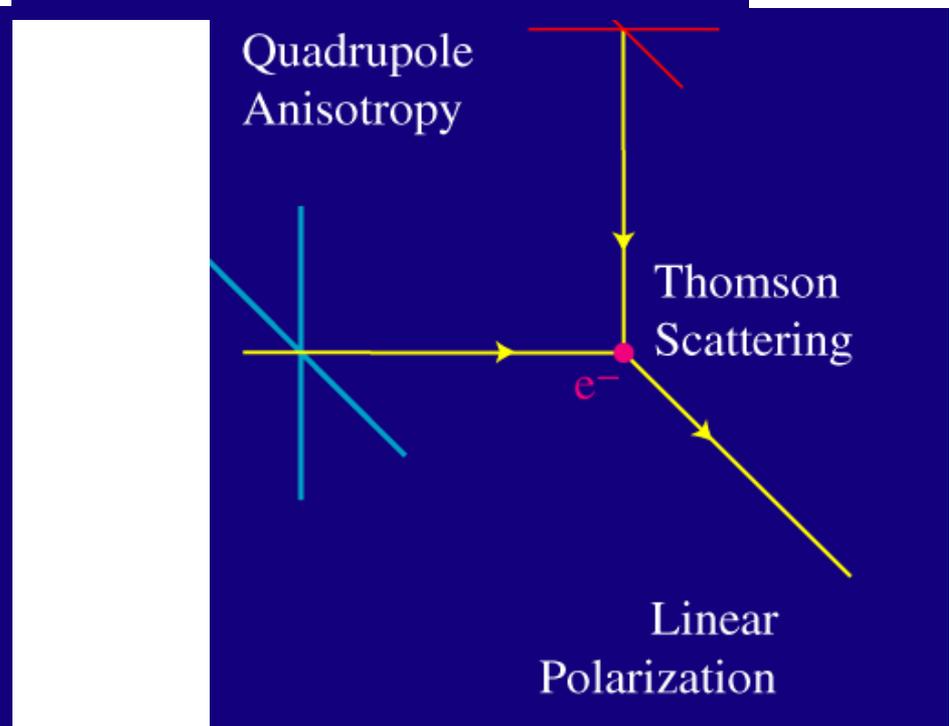
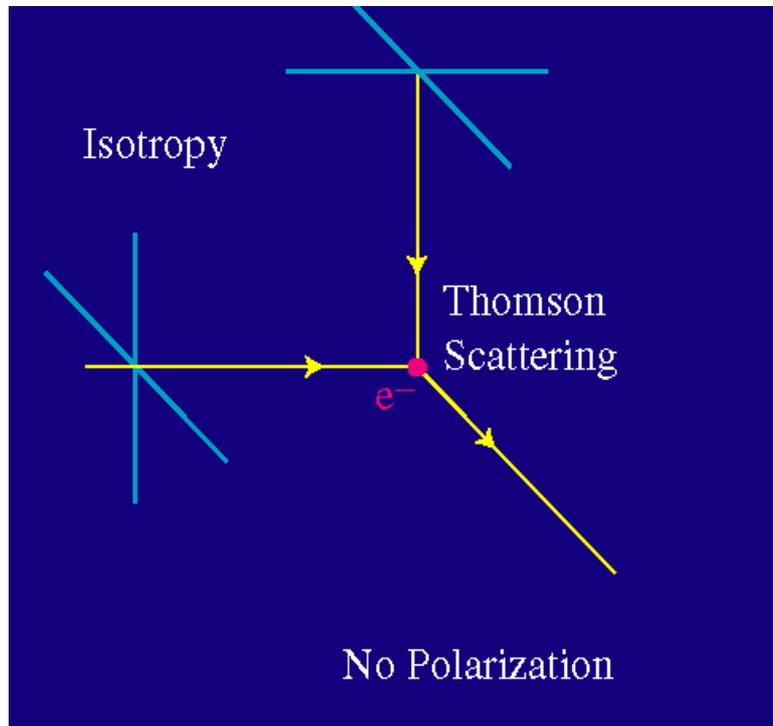
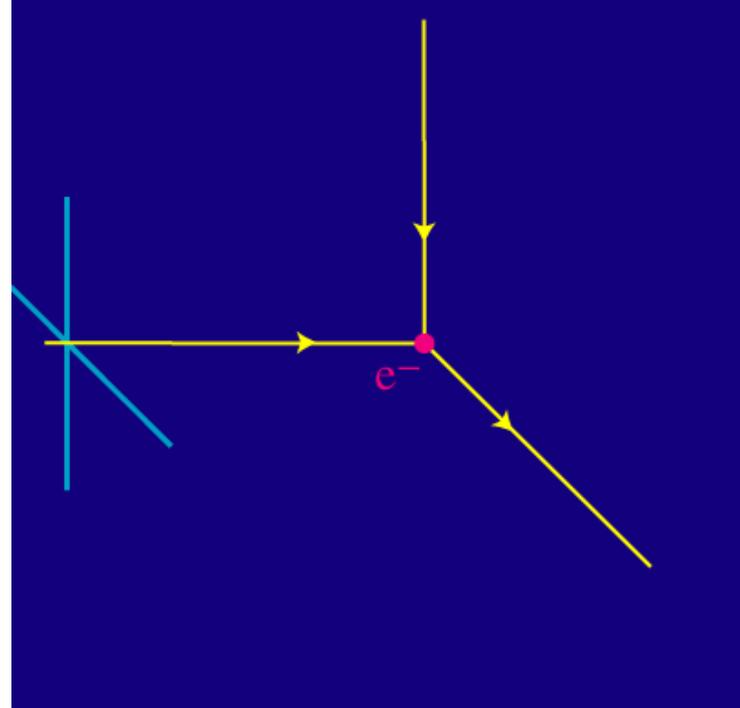
Un seul mécanisme d'émission :
Diffusion Thomson

(plus simple que la température)

$$\sigma_T \propto |\epsilon_i \cdot \epsilon_o|^2$$



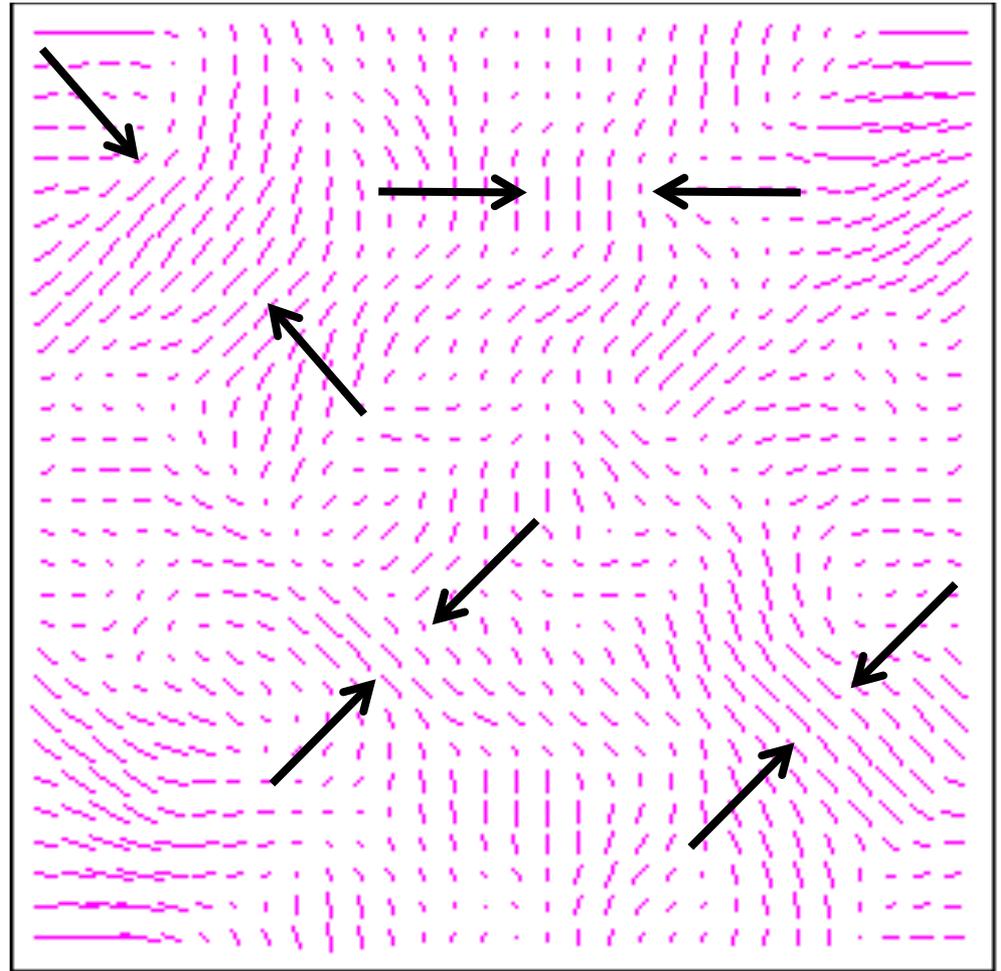
Polarisation par diffusion Thomson



La polarisation sonde

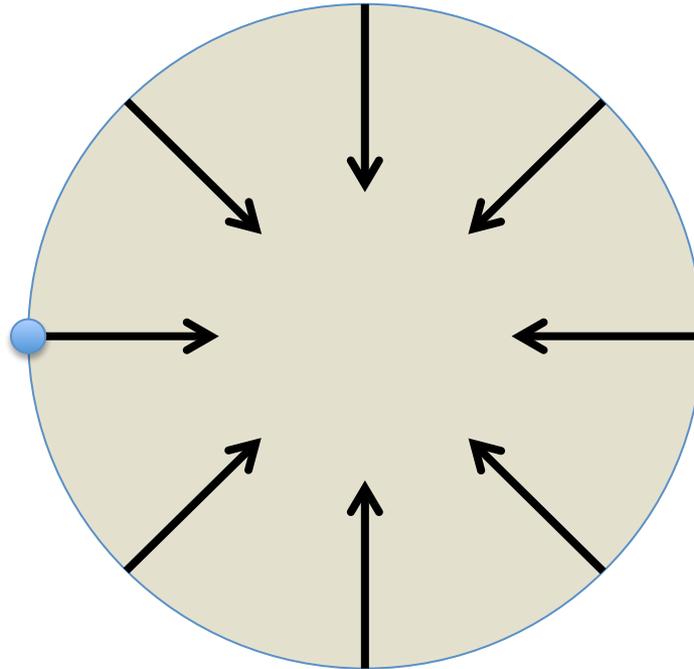
***l'excès moyen
de rayonnement
transverse***

*à l'époque de
dernière diffusion*



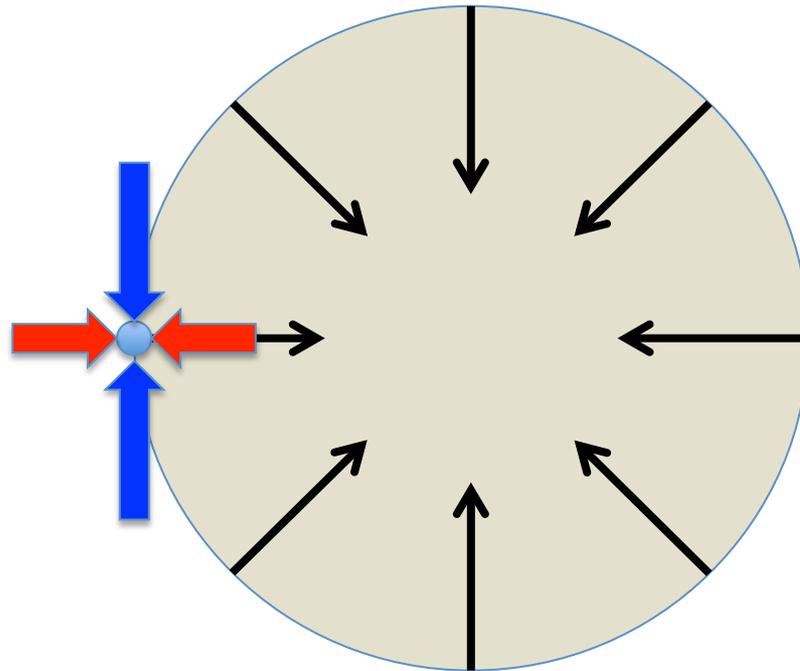
La polarisation du fond cosmologique

Phase de compression
dans une surdensité



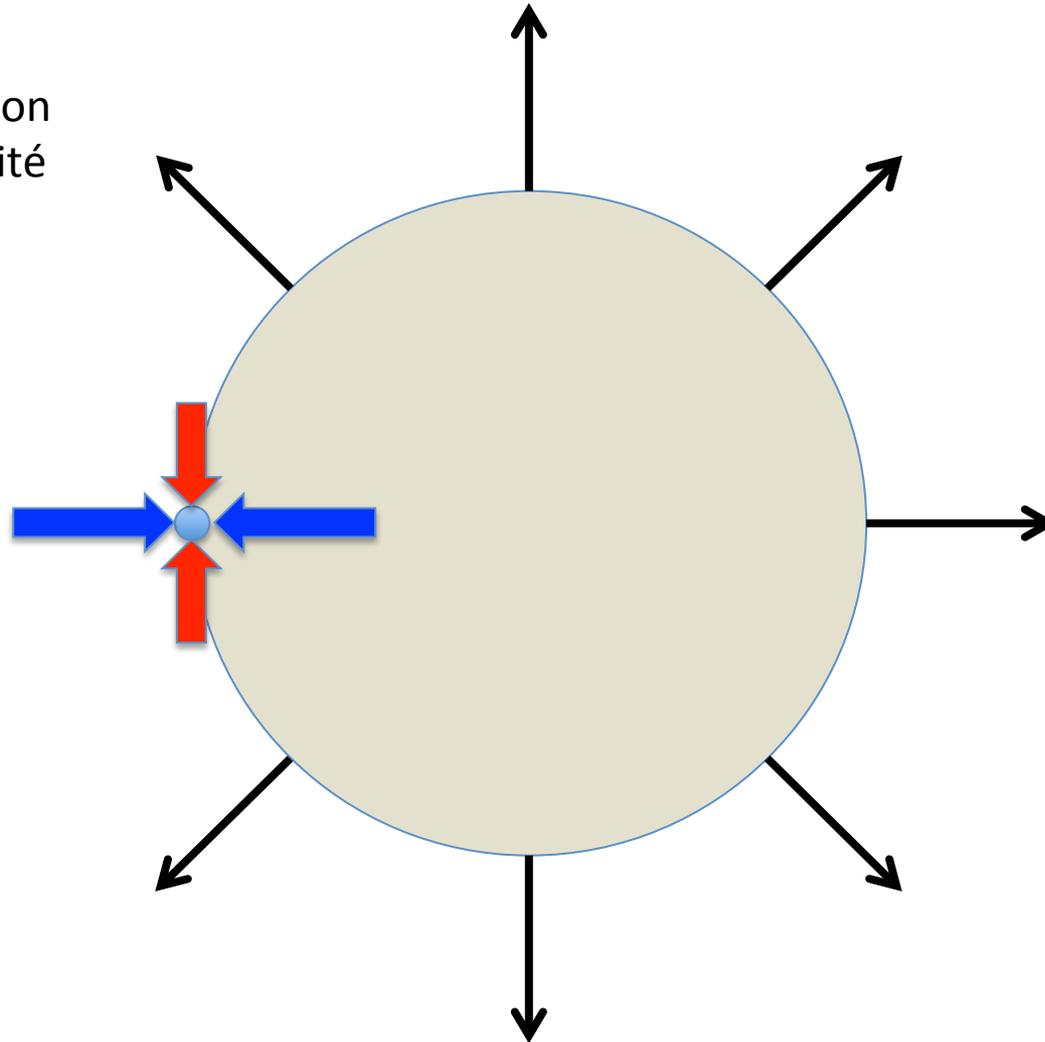
La polarisation du fond cosmologique

Phase de compression
dans une surdensité

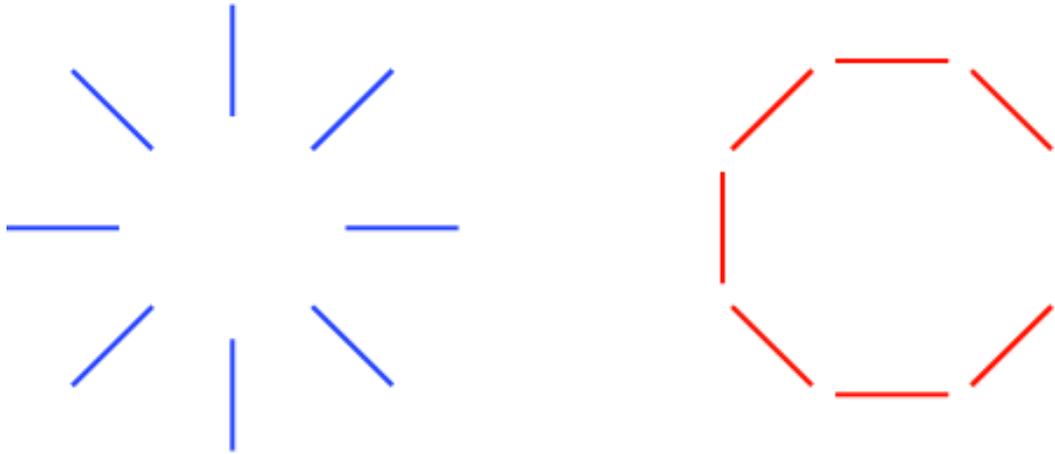


La polarisation du fond cosmologique

Phase de dépression
dans une surdensité

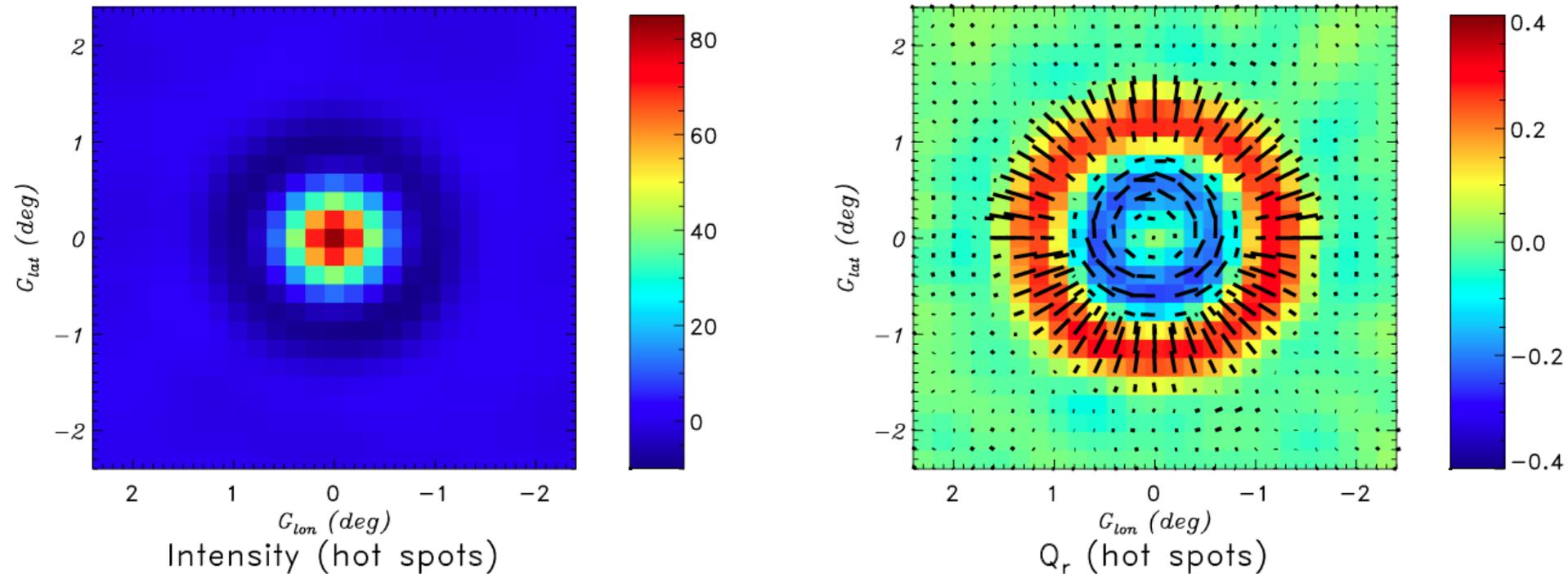


La polarisation du fond cosmologique



Autour des points chauds et froids du fond cosmologique devraient être observées préférentiellement des structures de polarisation radiales et/ou tangentielles.

La polarisation du fond cosmologique



C'est le cas en moyenne (ici moyenne de 10000 "points chauds" observés par Planck pendant la première année de prise de données)

Parenthèse (un peu) technique

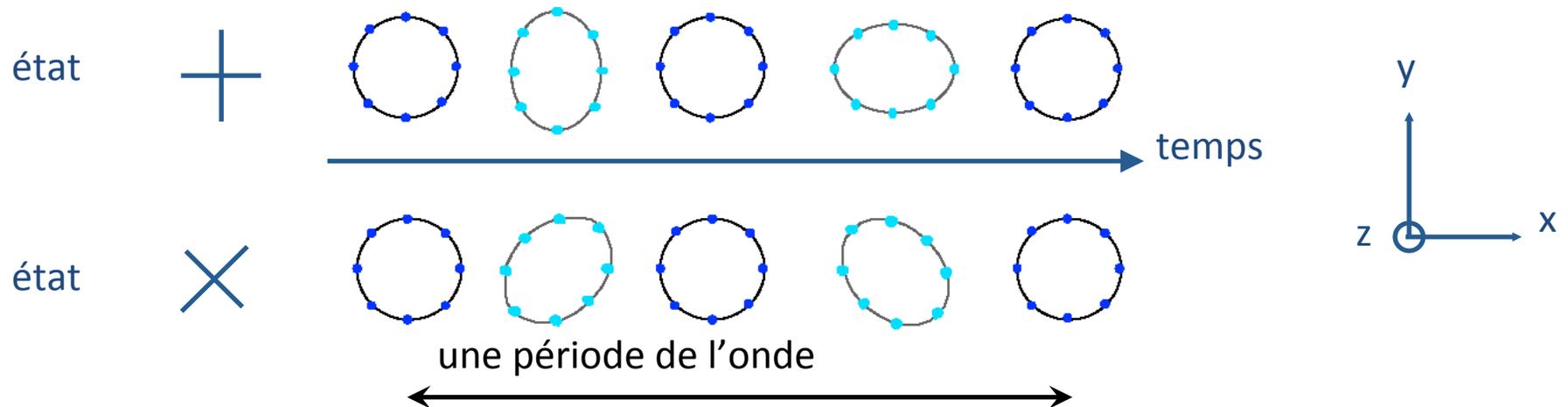
Relativité Générale : Les fluctuations de densité sont des perturbations de la métrique de l'espace temps.

Il en existe de plusieurs types

Par exemple les ondes gravitationnelles !

Ondes gravitationnelles

- Fluctuation de la courbure de l'espace-temps se propageant à la vitesse de la lumière
 - Modification de la métrique \Rightarrow modification de l'étalon de longueur
 - Les distances séparant des masses libres changent !
- Une onde quelconque est la superposition de deux états indépendants
 - Effet sur des masses libres disposées en cercle



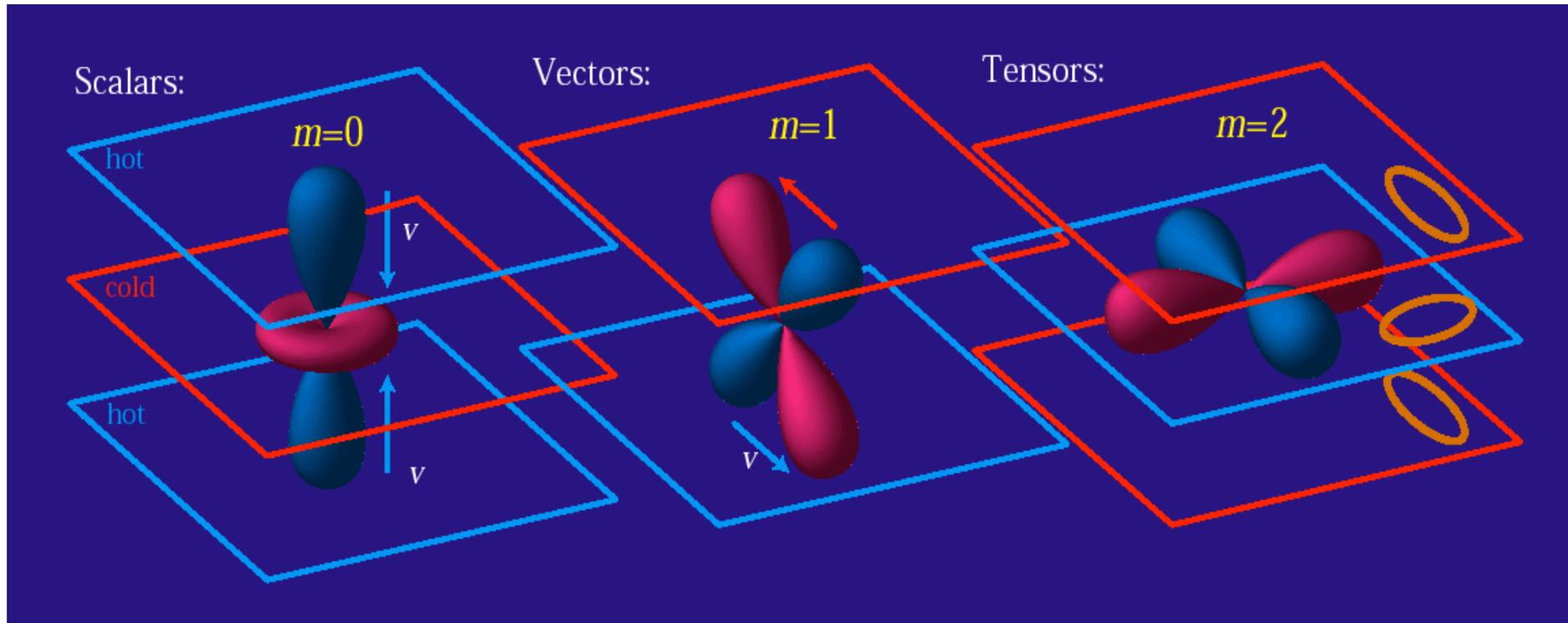
L'interféromètre Virgo



Pour en savoir plus...

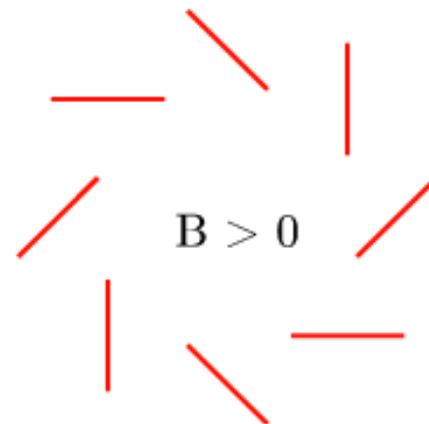
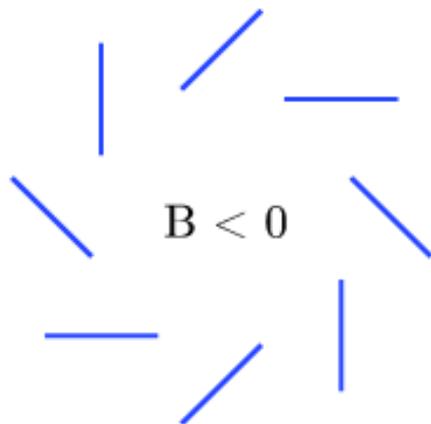
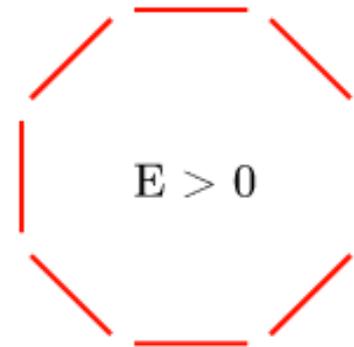
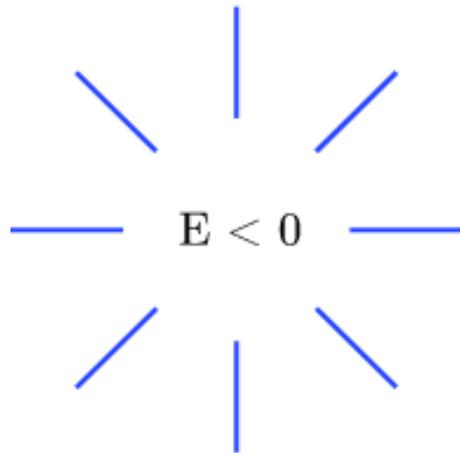


Parenthèse (un peu) technique

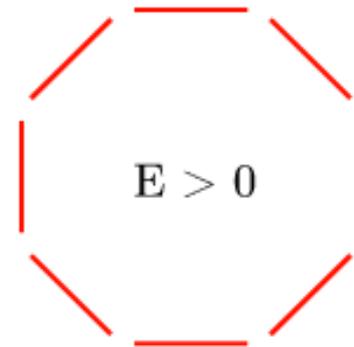
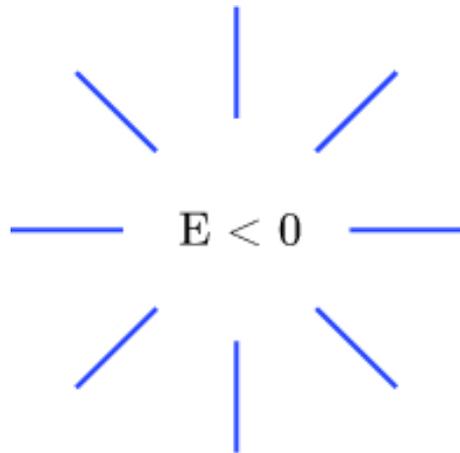


bleu = plus chaud
rouge = plus froid

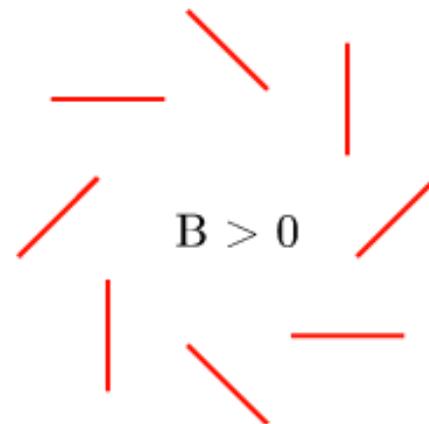
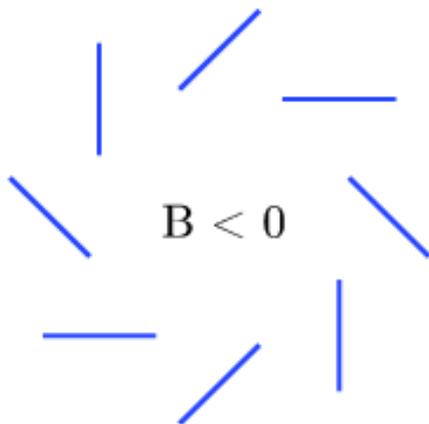
La polarisation du fond cosmologique



La polarisation du fond cosmologique



parité paire

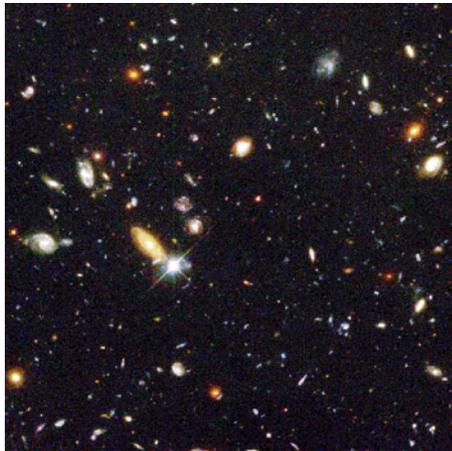
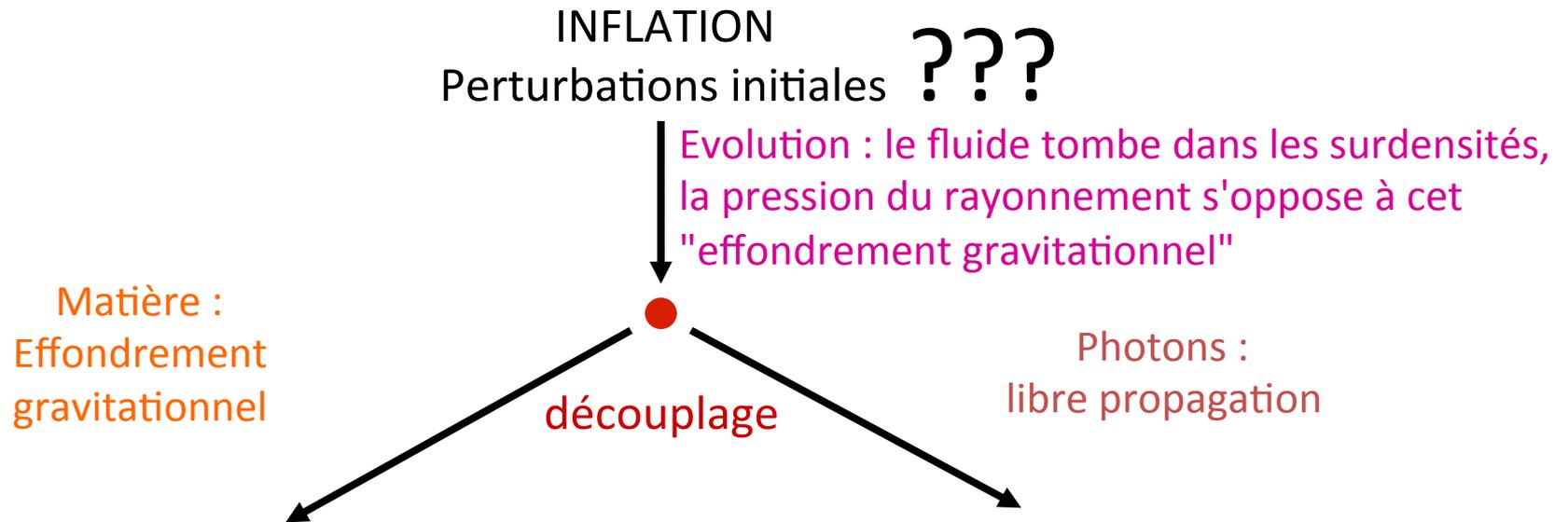


parité impaire

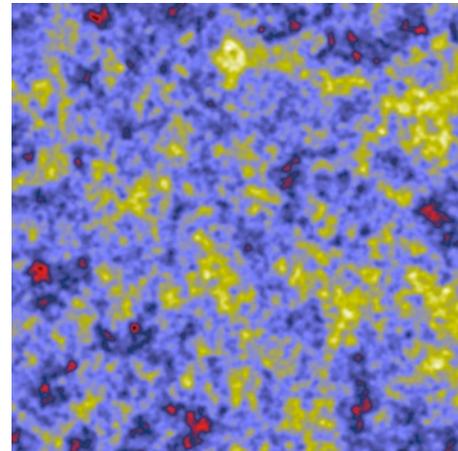
Plan de l'exposé

- Petite histoire de l'Univers
- Fond de rayonnement cosmologique
- Polarisation
- ➔ • Univers primordial et inflation
- Lentilles gravitationnelles
- Observations futures
- Conclusion

Un brève histoire des structures



structures



CMB

Univers primordial : physique à $\approx 10^{16}$ GeV

Perturbations initiales

- scalaires (densité)
- tensorielles (ondes gravitationnelles)

$$P_s(k) = A_s k^{(n_s-1)}$$

$$P_t(k) = A_t k^{n_t}$$

dépendent de la physique de l'inflation

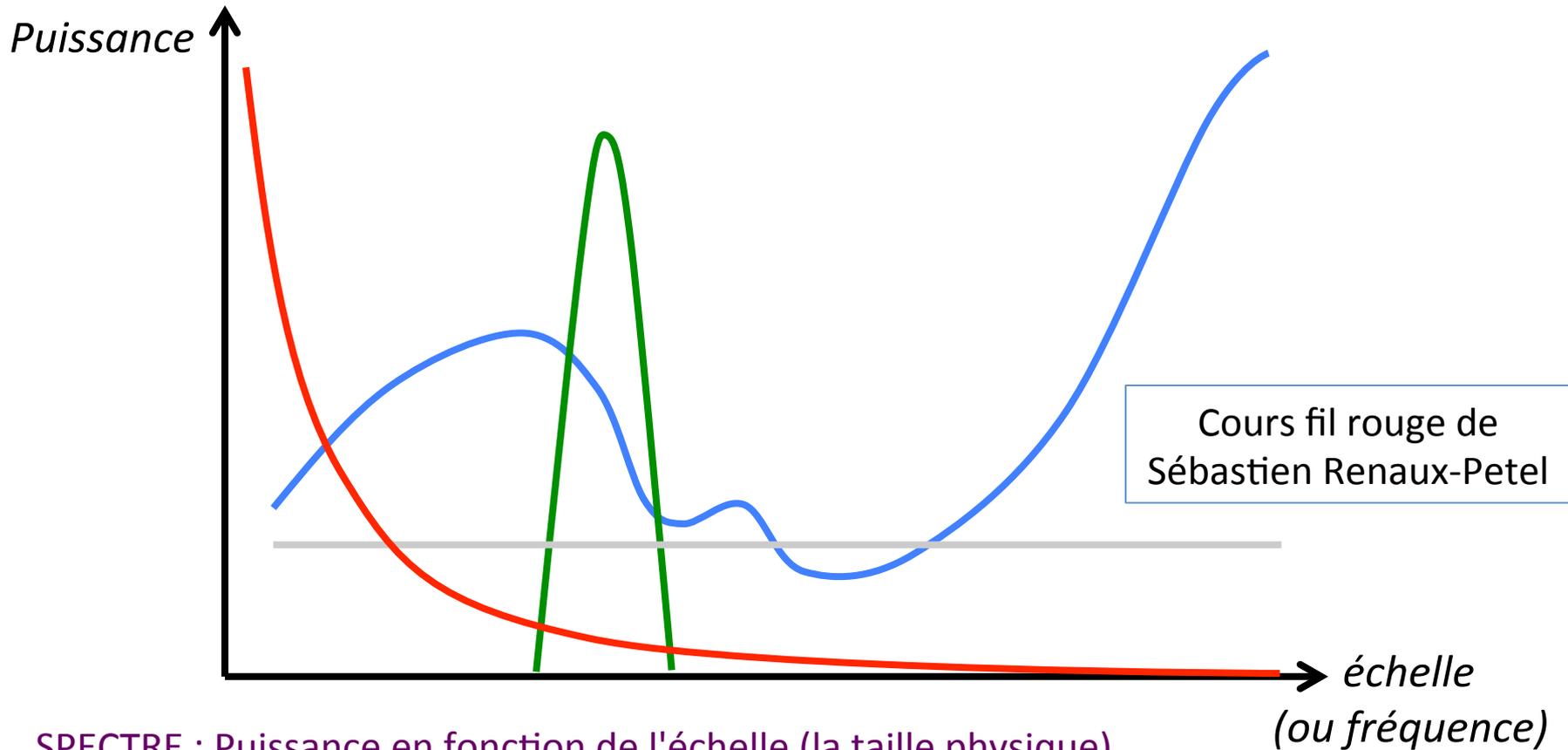
- indice spectral scalaire $n_S - 1$
 - variation en f^n de l'échelle $\frac{dn_S}{d \ln k}$
 - rapport tenseur/scalaire $r = T/S$
 - tensor spectral index n_T
- (+ Paramètres de fin T_{reh} et w_{reh})

y a t'il autant de fluctuations
à toutes les échelles?

A_T/A_S à une échelle donnée

$r = -8n_T$ pour les modèles
d'inflation "à roulement lent"

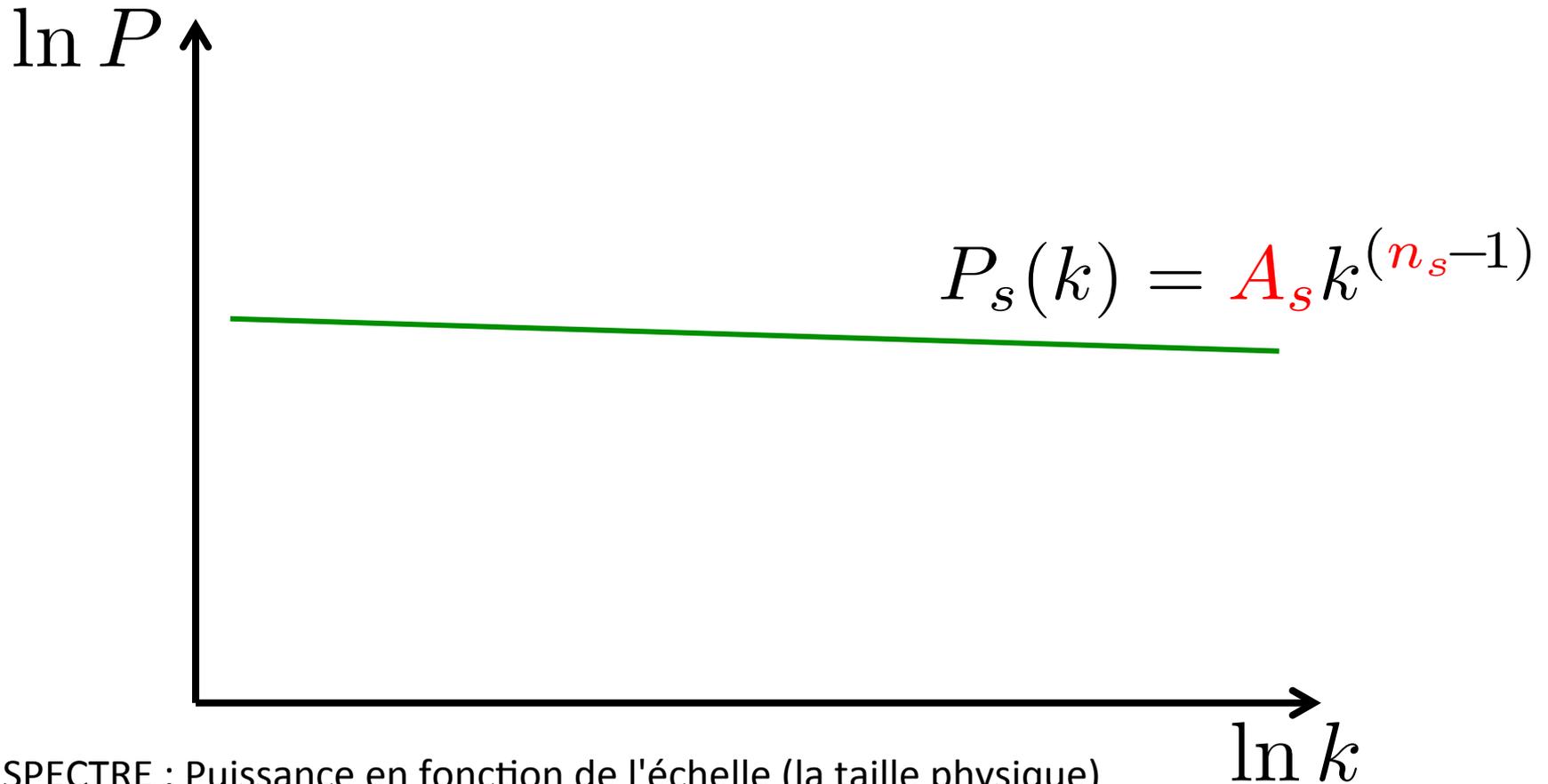
Parenthèse : spectres et analyse harmonique



SPECTRE : Puissance en fonction de l'échelle (la taille physique)
Analyse de Fourier (analyse harmonique)

MUSIQUE, LUMIÈRE, ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES, ONDES, SIGNAUX, IMAGES, ...

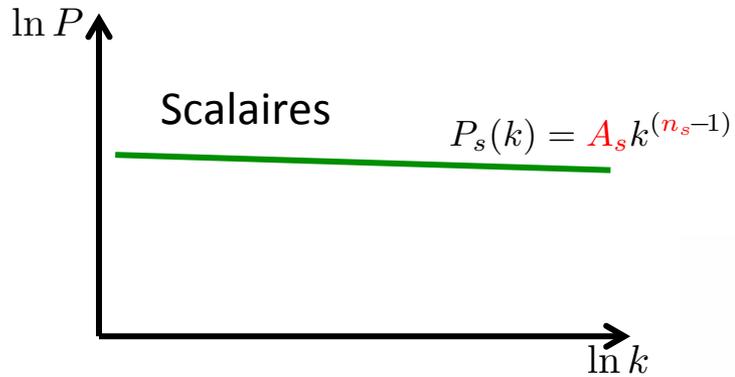
Univers primordial : physique à $\approx 10^{16}$ GeV



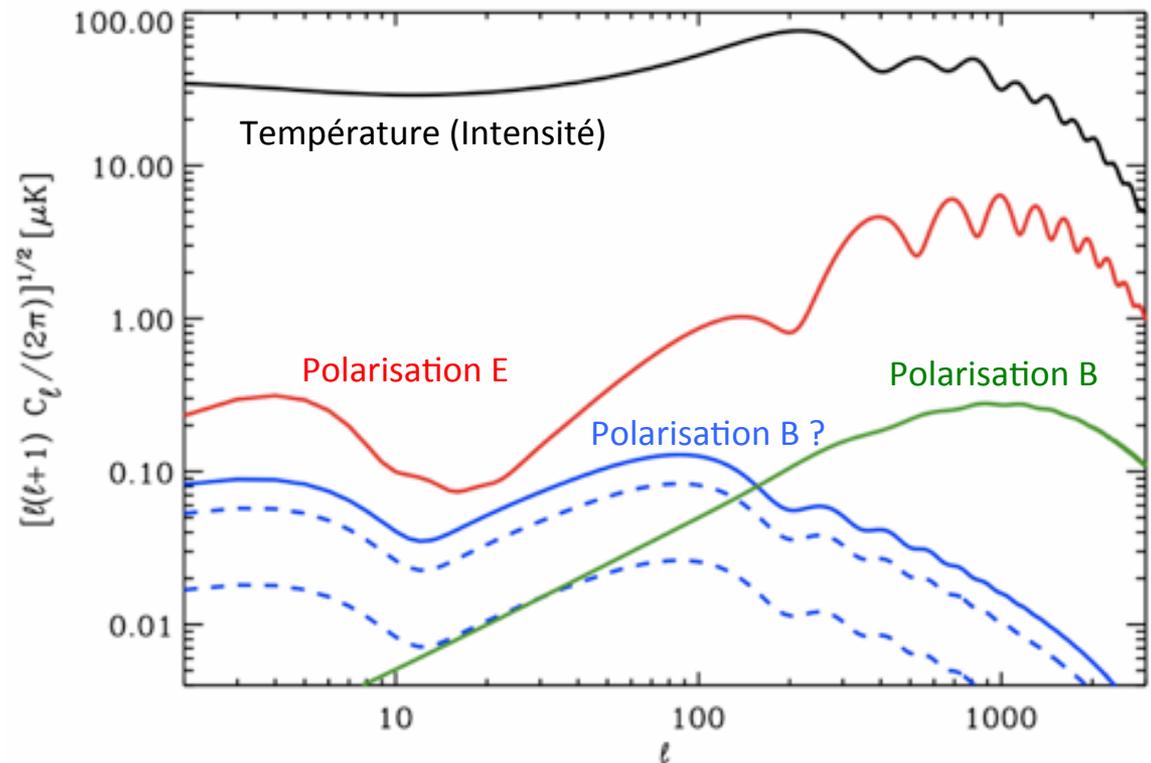
SPECTRE : Puissance en fonction de l'échelle (la taille physique)
Analyse de Fourier (analyse harmonique)

MUSIQUE, LUMIÈRE, ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES, ONDES, SIGNAUX, IMAGES, ...

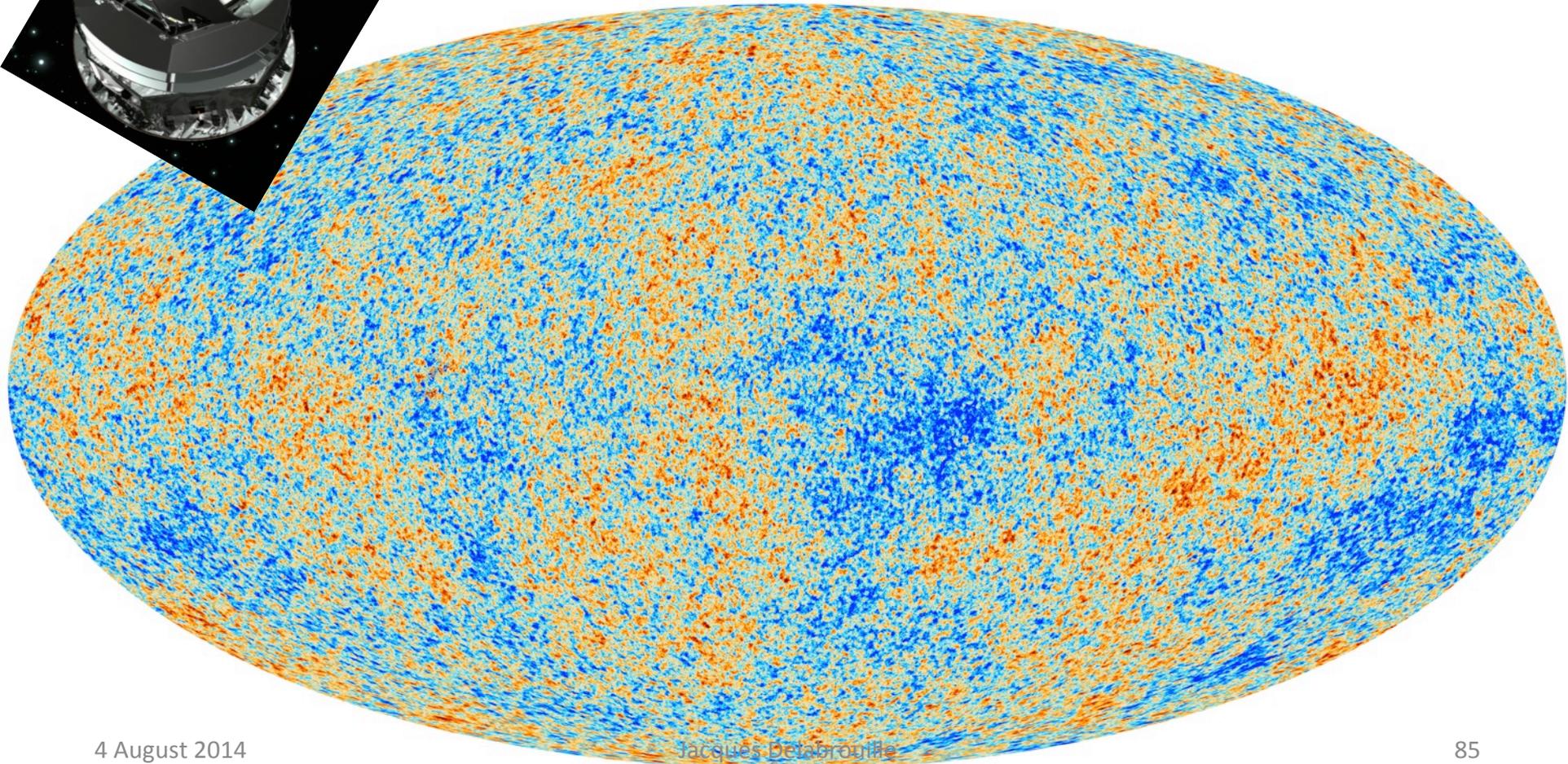
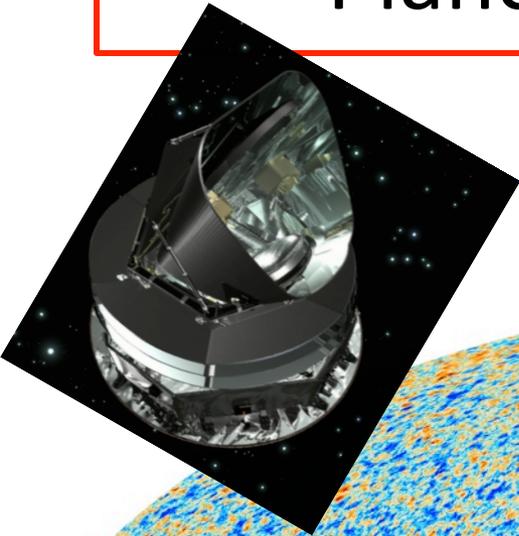
Univers primordial : physique à $\approx 10^{16}$ GeV

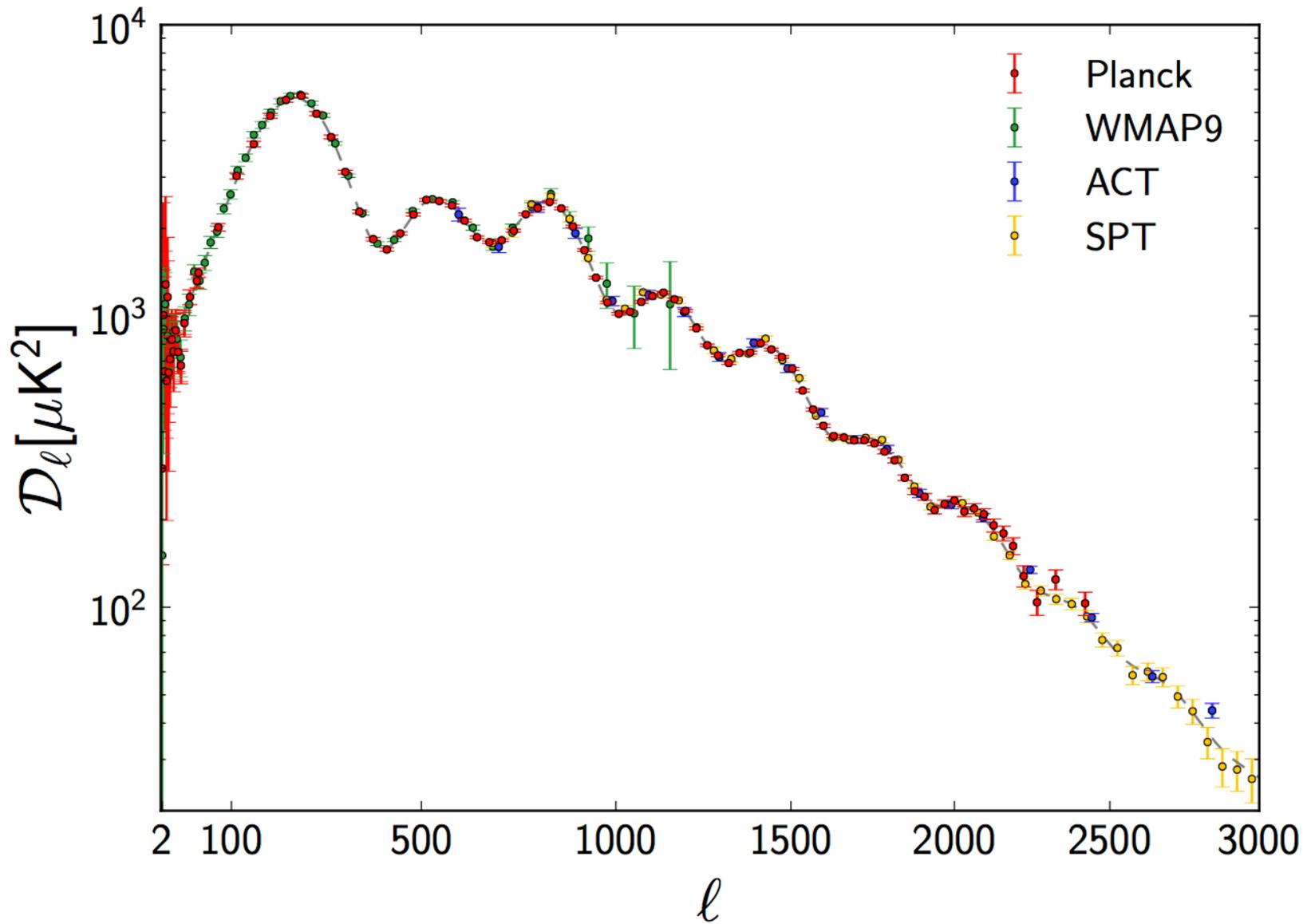


Analyse harmonique sur la sphère

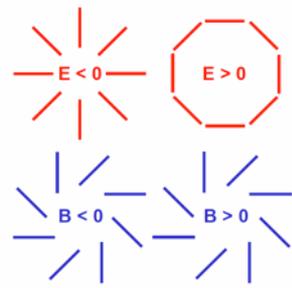


Planck a détecté les anisotropies

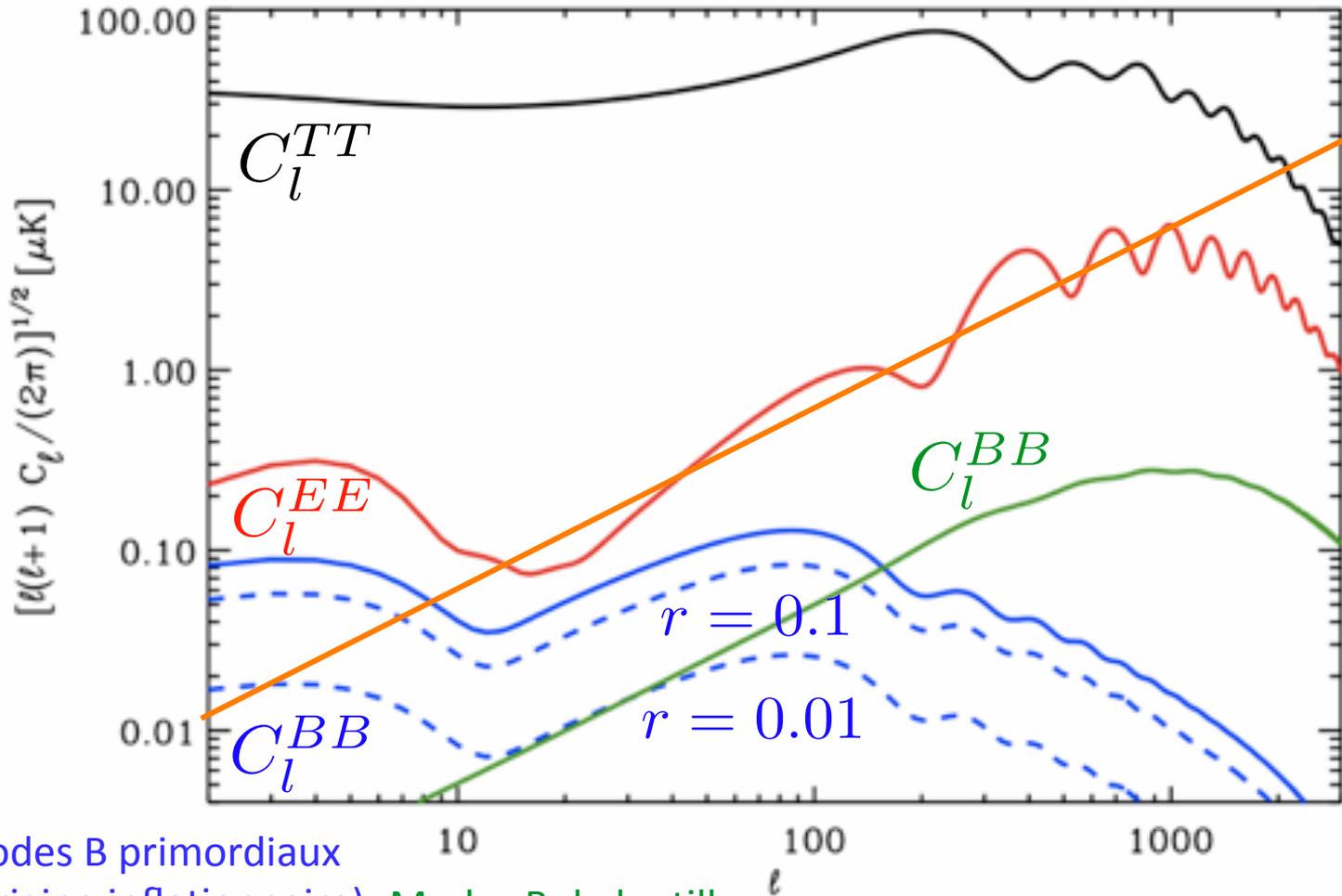




Polarisation du CMB



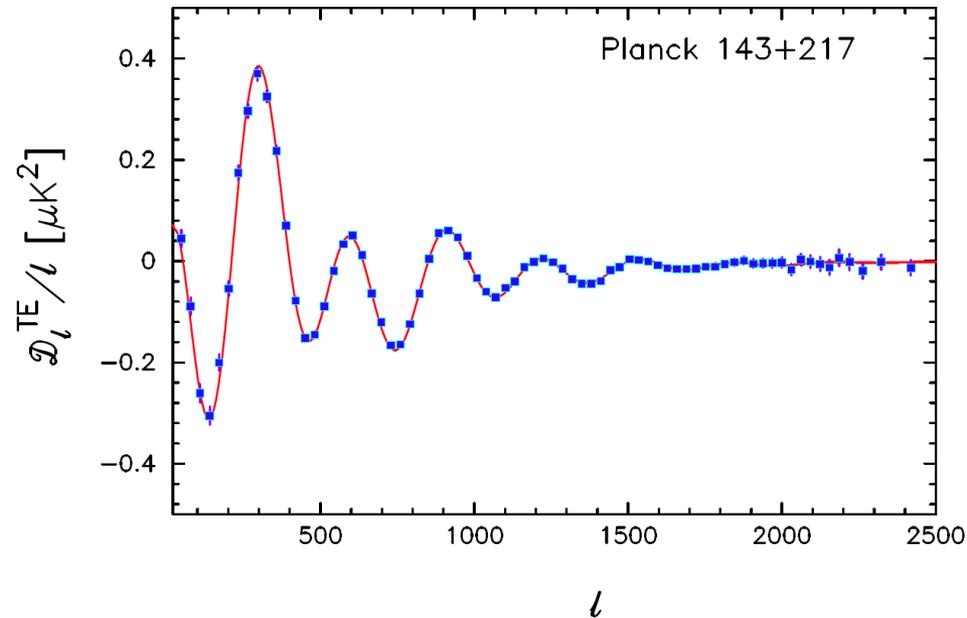
Objectif: Modes B du CMB (primordiaux et lentille gravitationnelle)



Bruit Planck

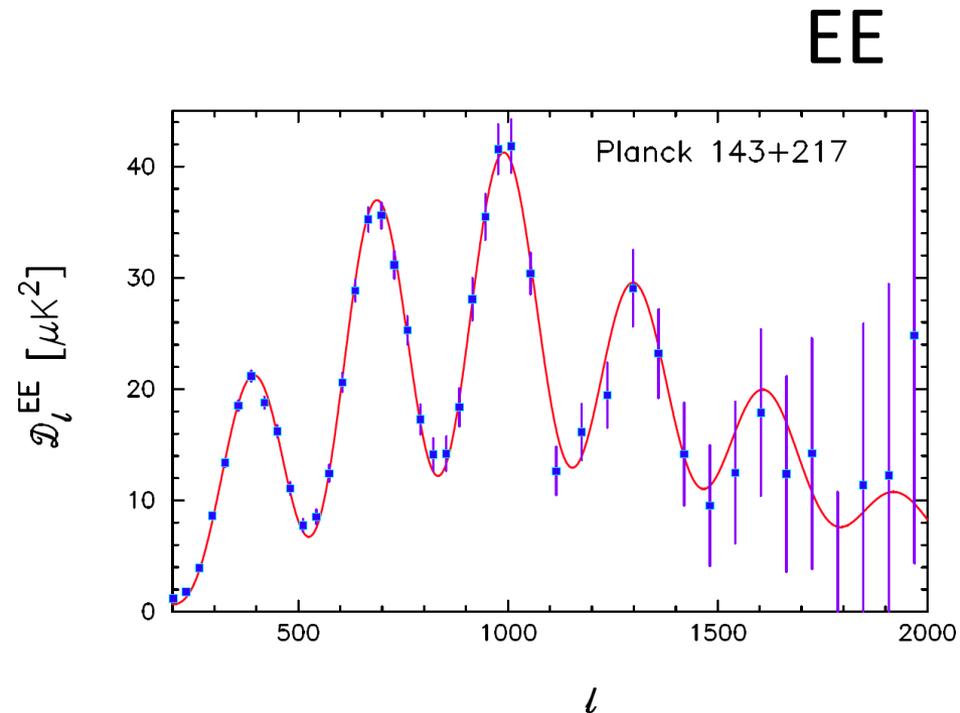
Modes B primordiaux (d'origine inflationnaire) Modes B de lentille

Planck a détecté les modes E

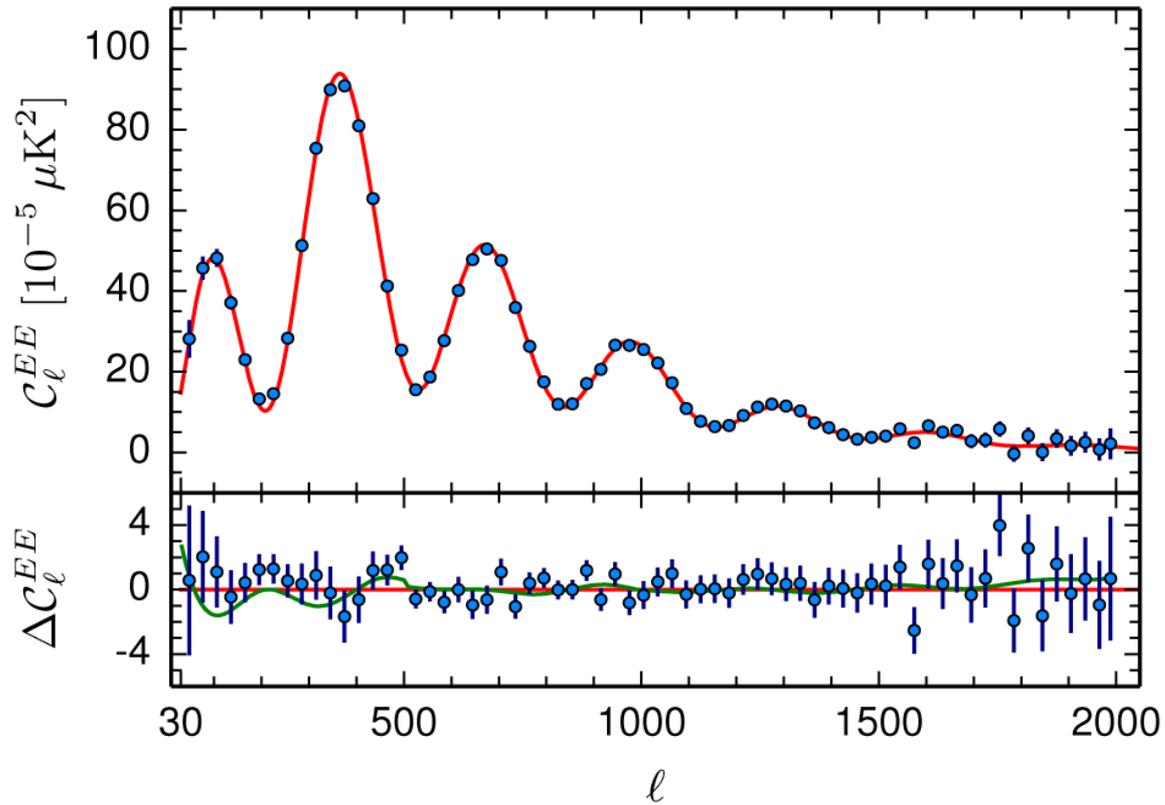


TE

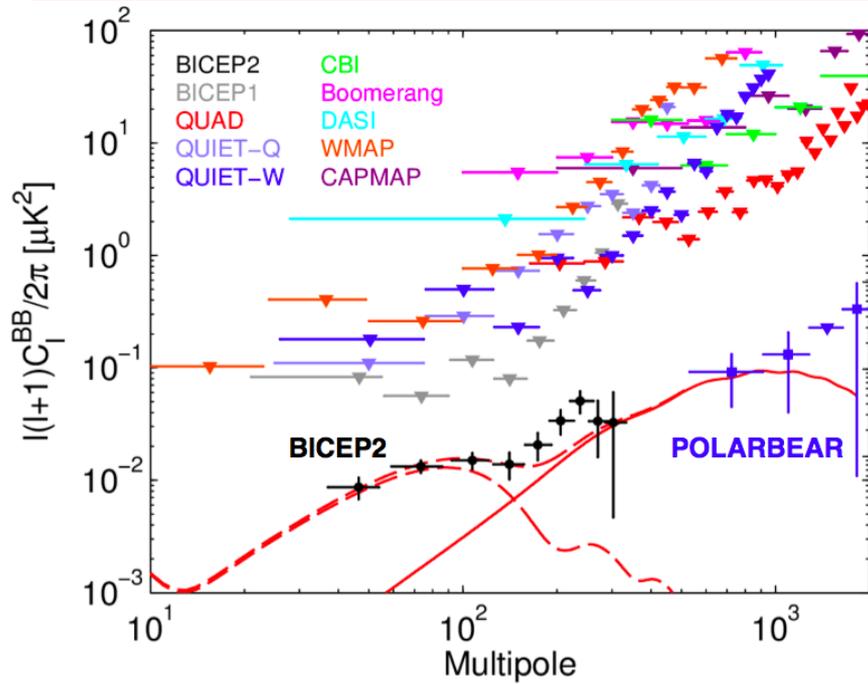
Courbes rouges: prediction basée seulement sur l'analyse de l'intensité (i.e. température).



Planck a détecté les modes E



Détection de modes B !?



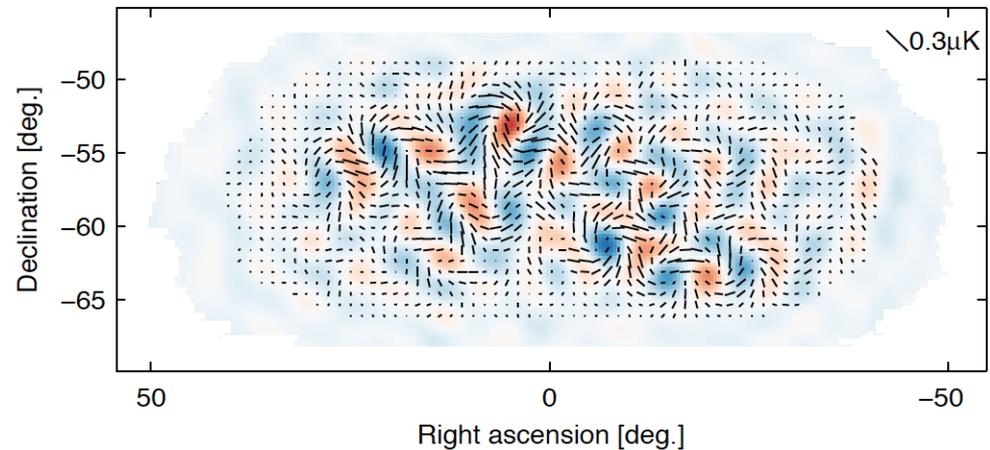
BICEP2

POLARBEAR

Deux expériences pour mesurer la polarisation depuis le sol

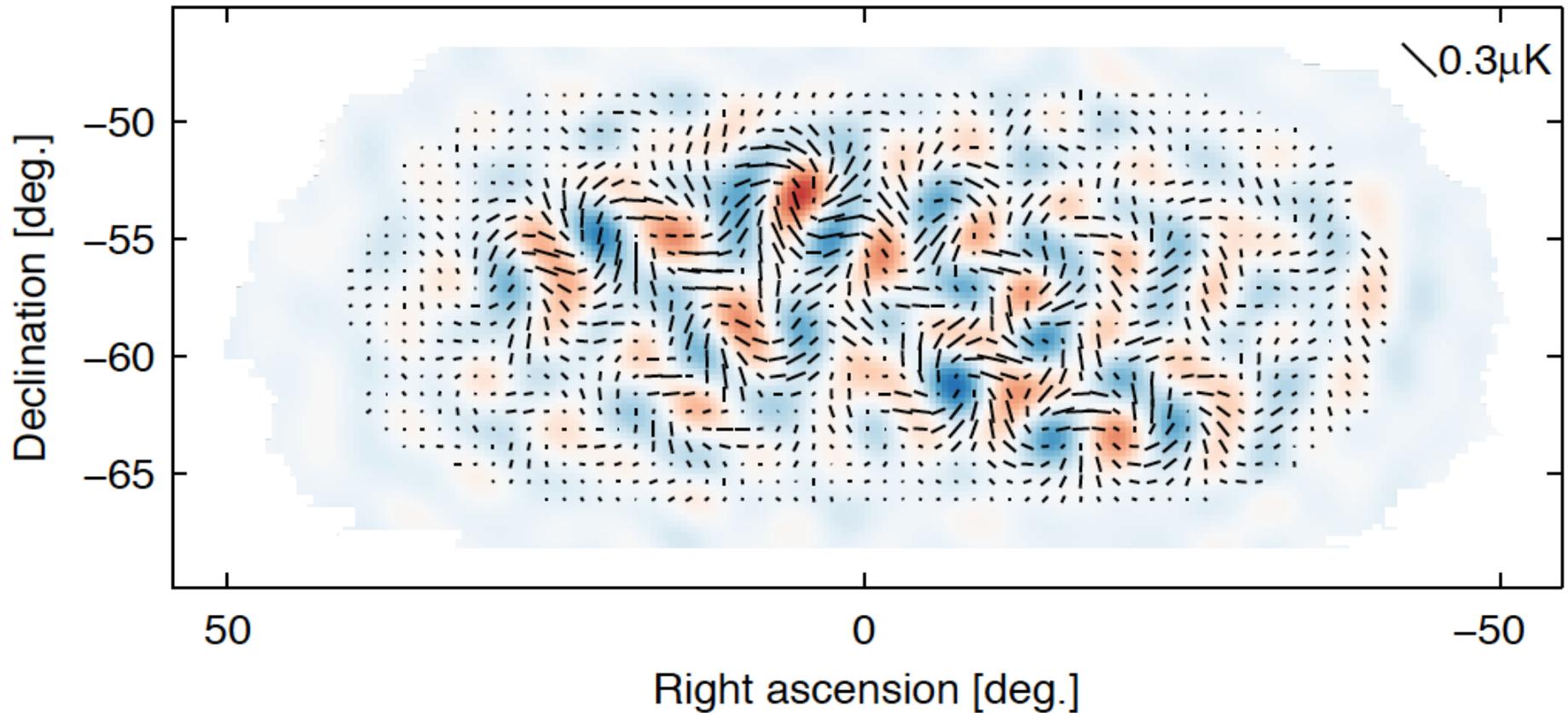
BICEP2: B signal

1% du ciel



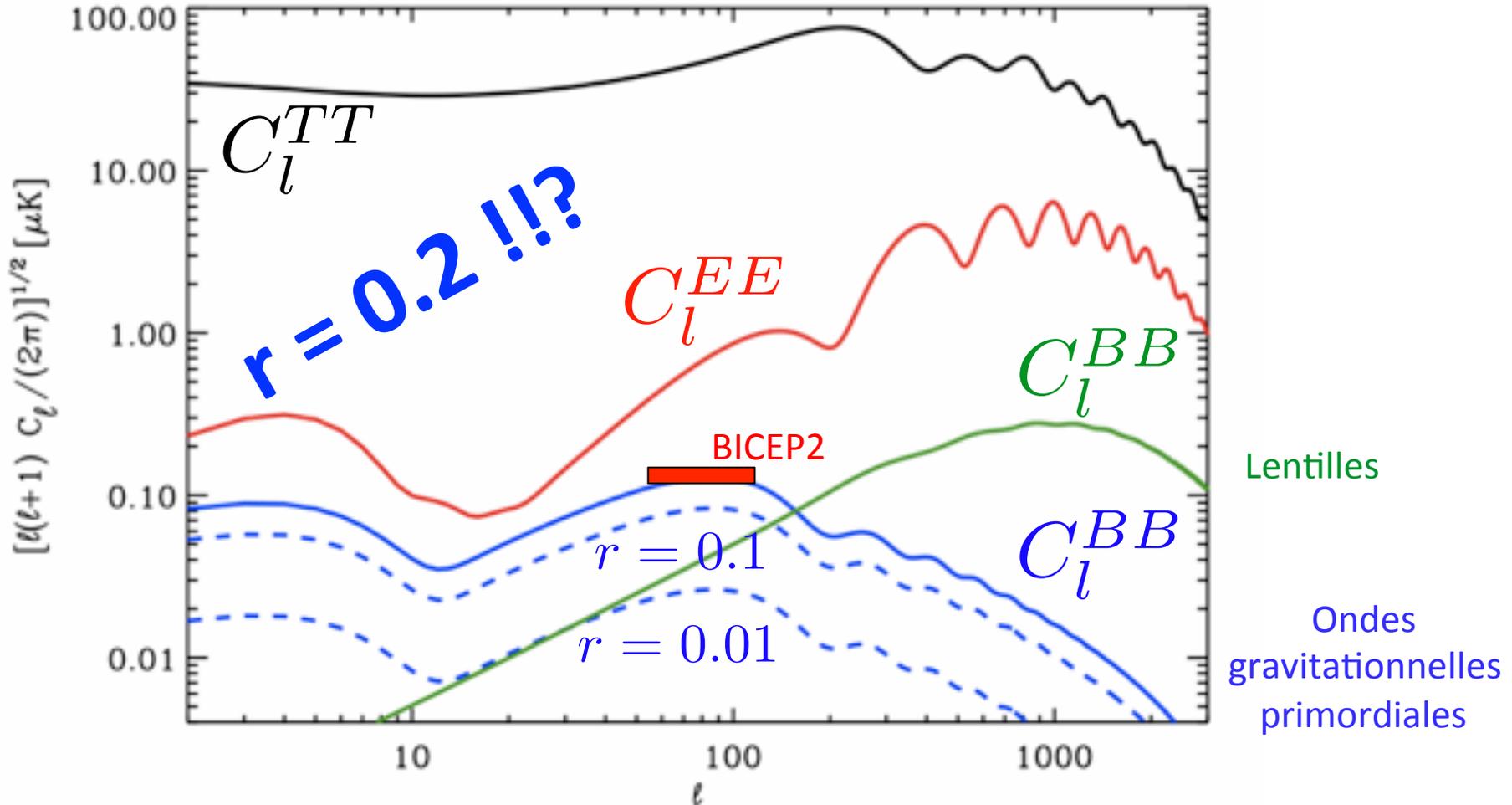
Détection de modes B !?

BICEP2: B signal

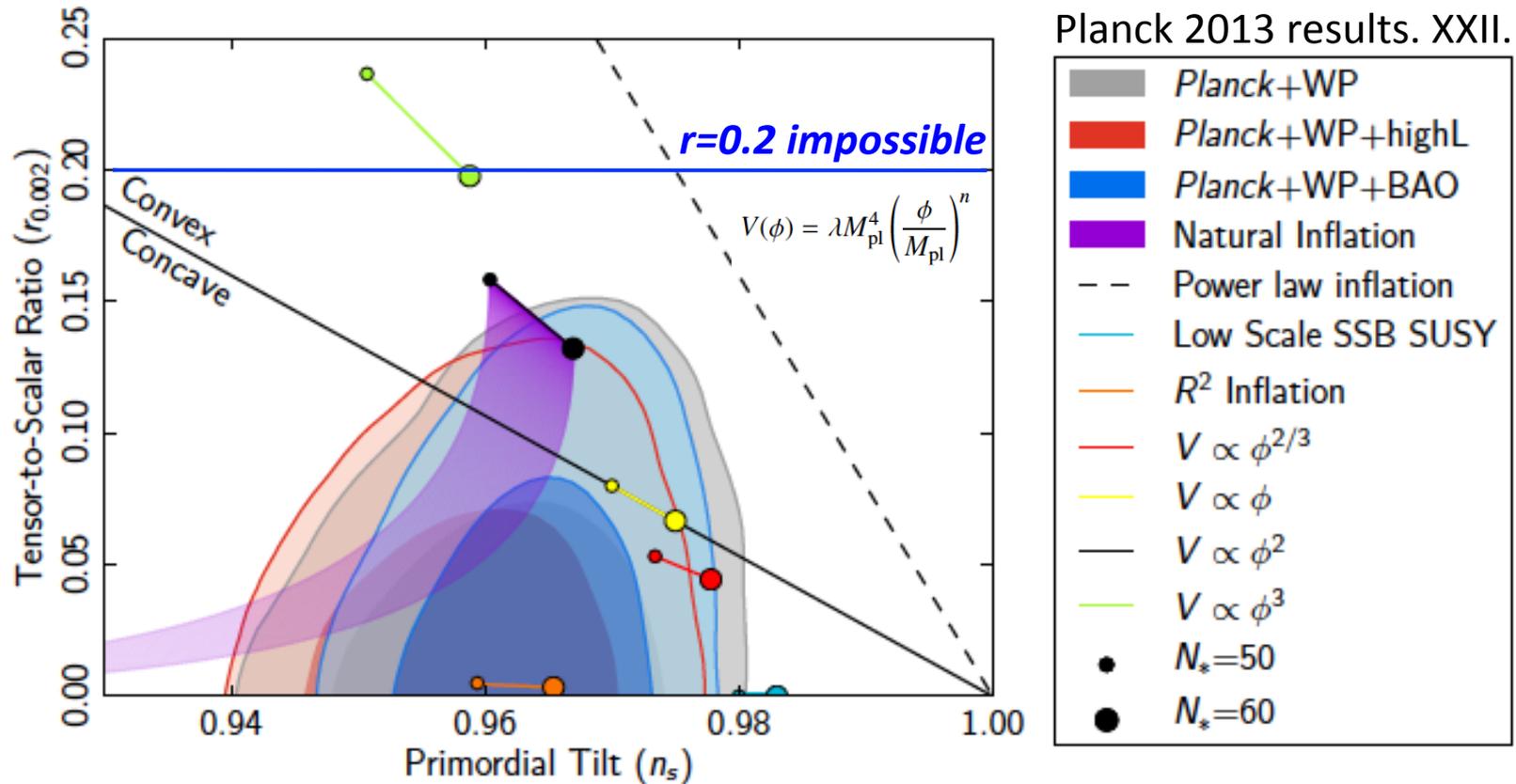


Amplitude = environ $0.1 \mu\text{K}$

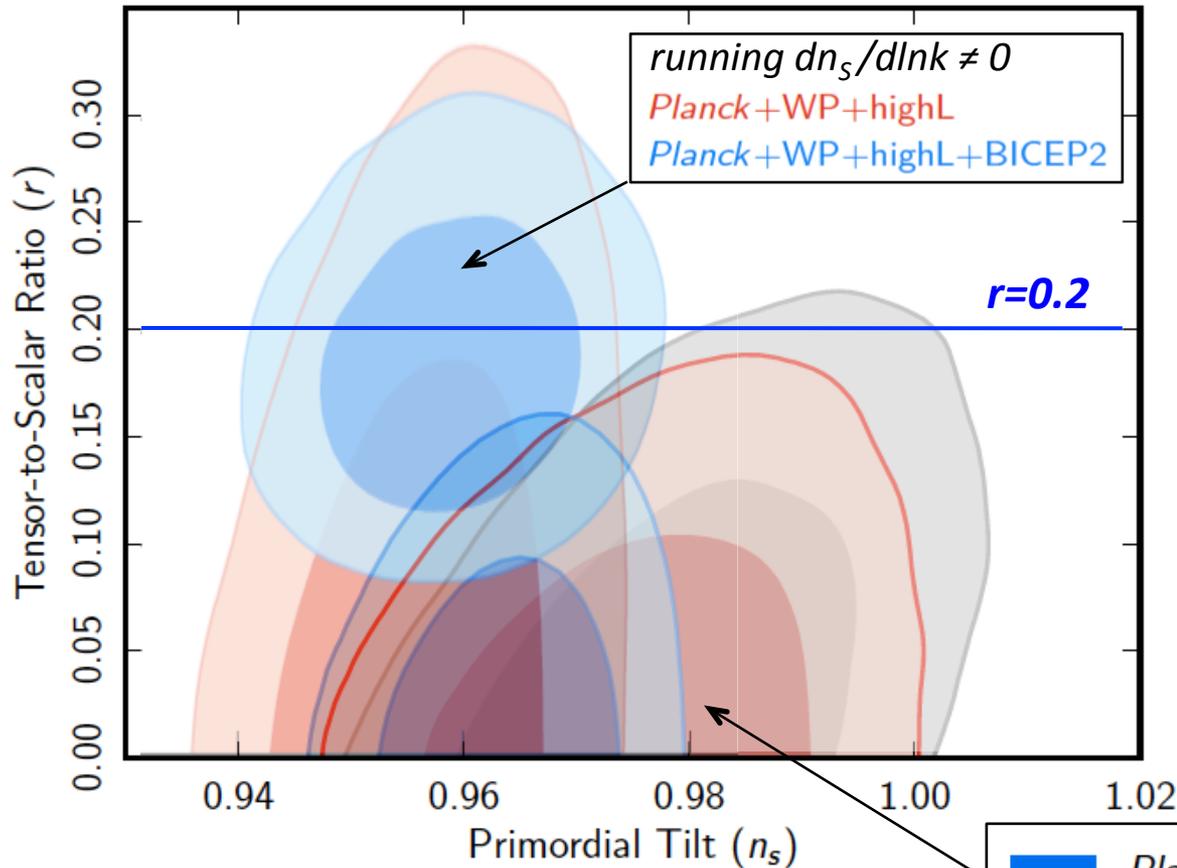
Compatible avec $r = 0.2$!?



Pre-BICEP2: Planck constraint l'inflation



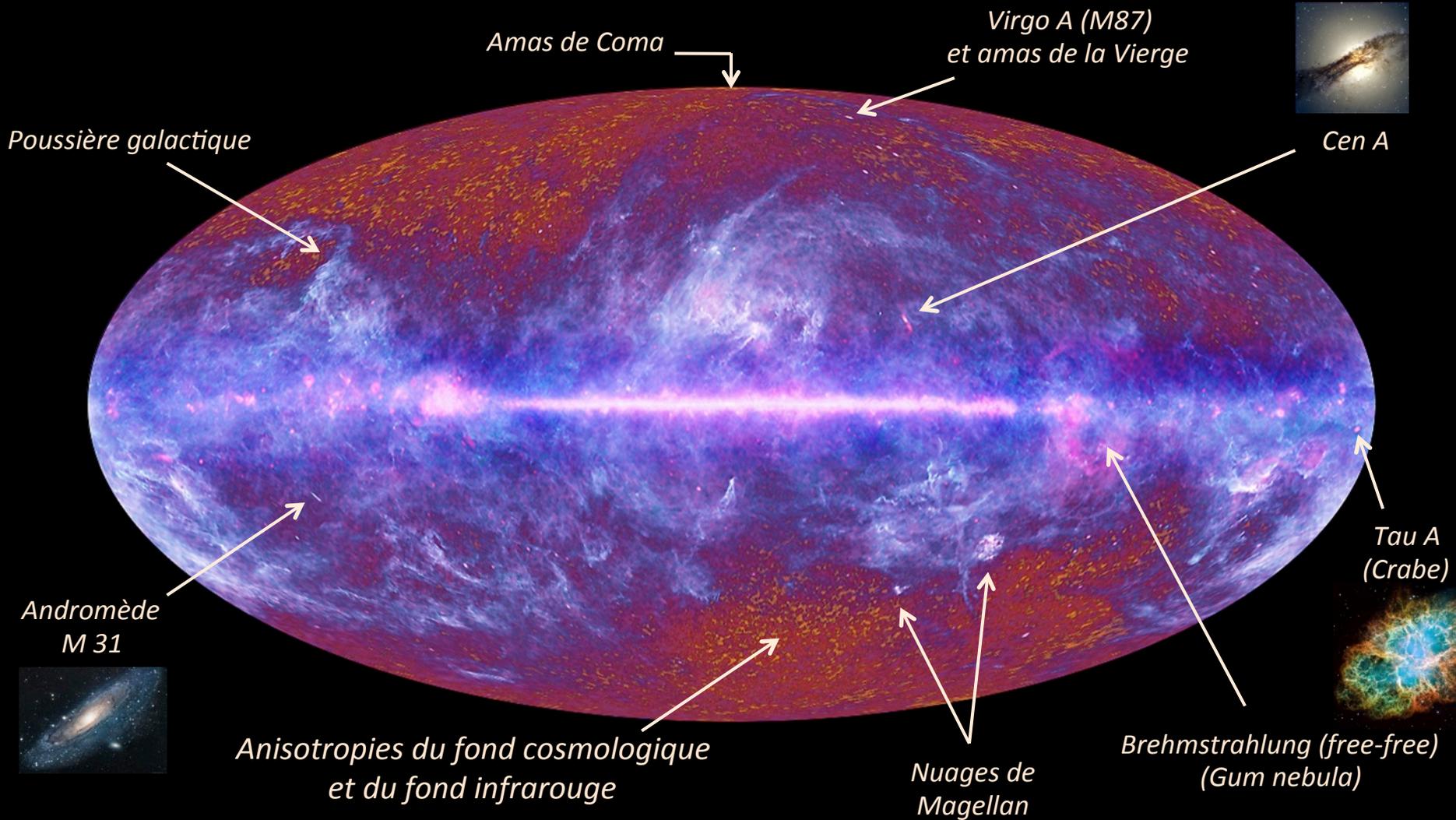
Extensions du modèle



Planck 2013 results. XXII.
and
BICEP2, arXiv:1403.3985

- $Planck+WP+BAO: \Lambda\text{CDM} + r$
- $Planck+WP+BAO: \Lambda\text{CDM} + r + N_{eff}$
- $Planck+WP+BAO: \Lambda\text{CDM} + r + Y_{He}$

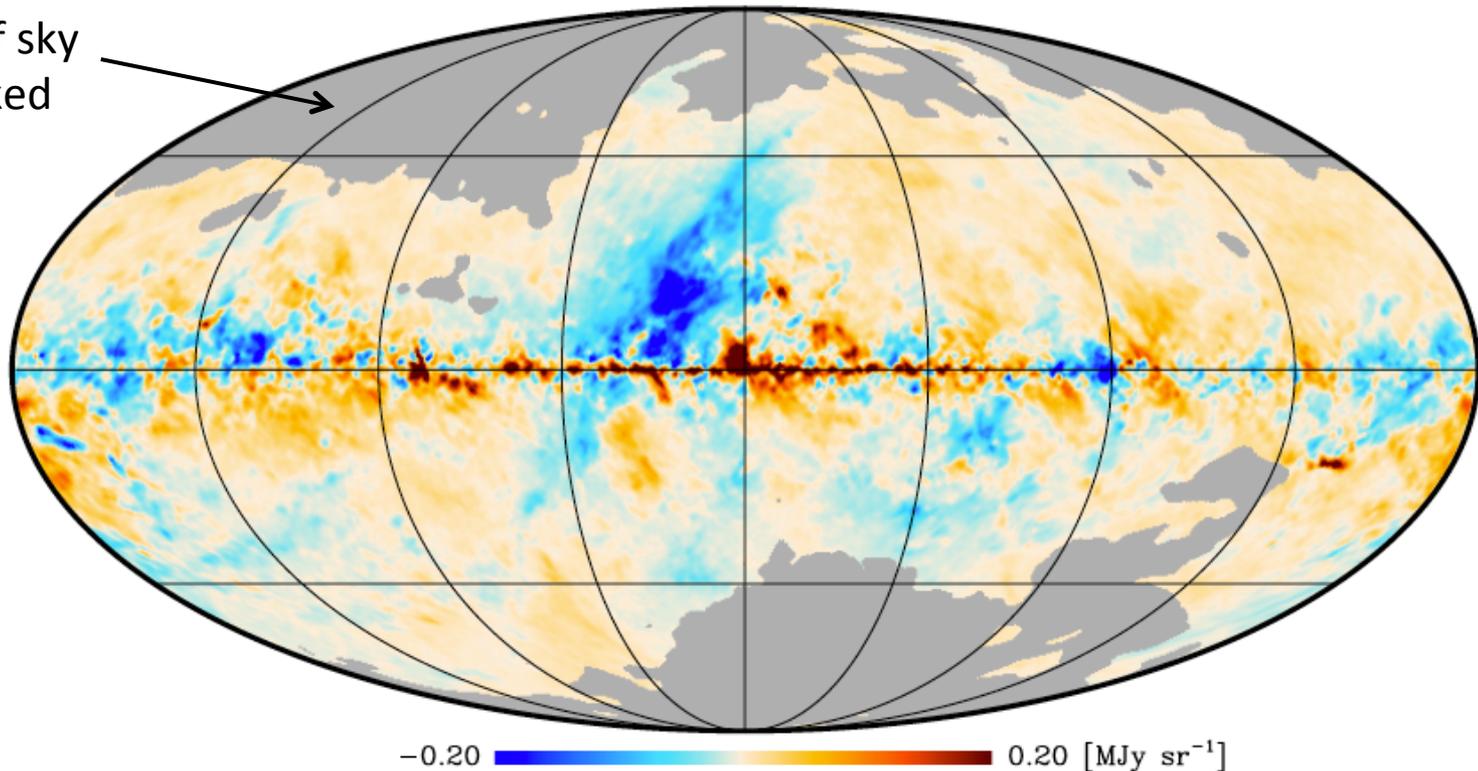
Emission d'avant-plan



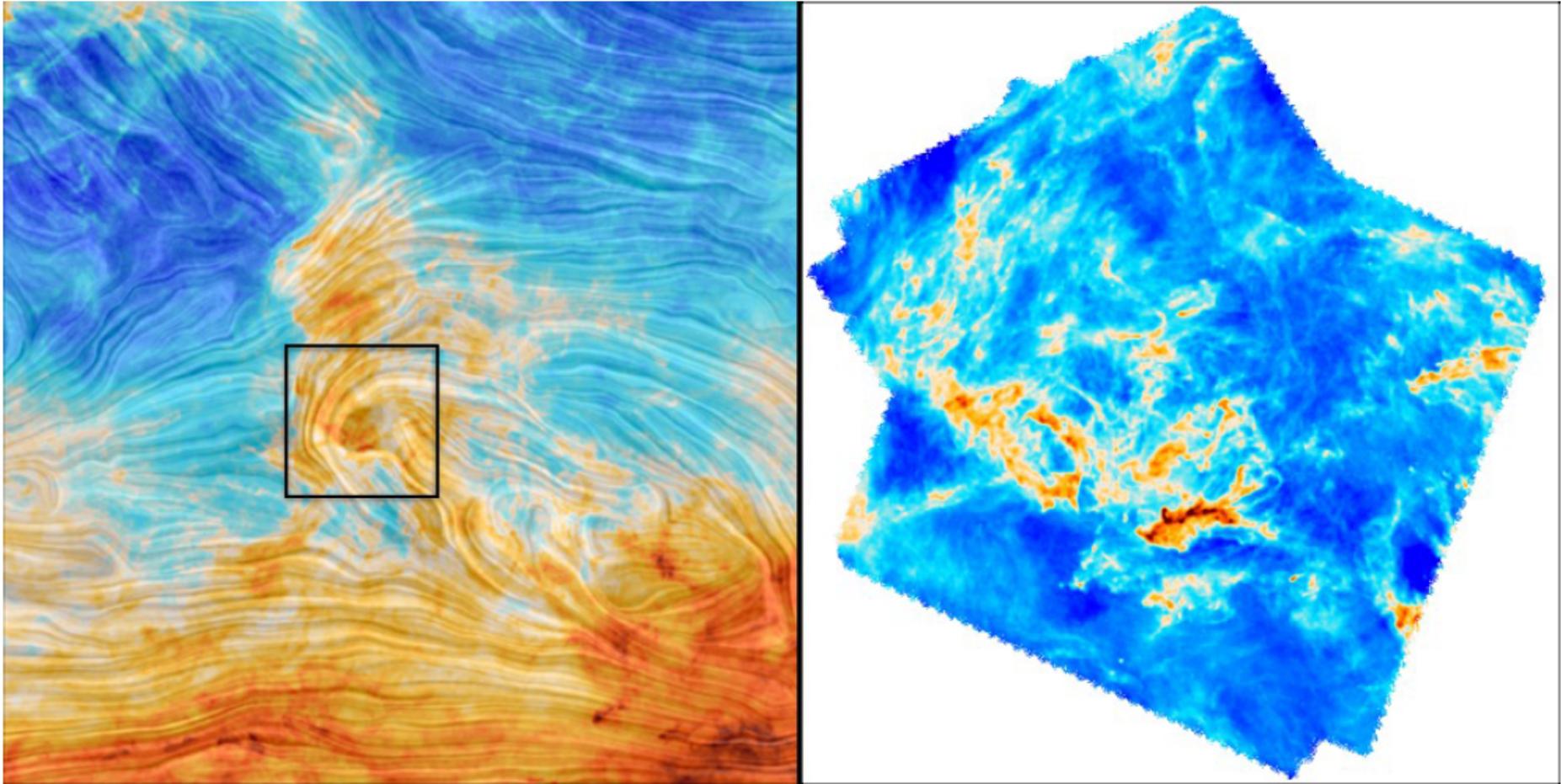
Contamination par la poussière

Paramètre de Stokes Q à 353 GHz (Planck collaboration, PIP XIX).

21% of sky
masked

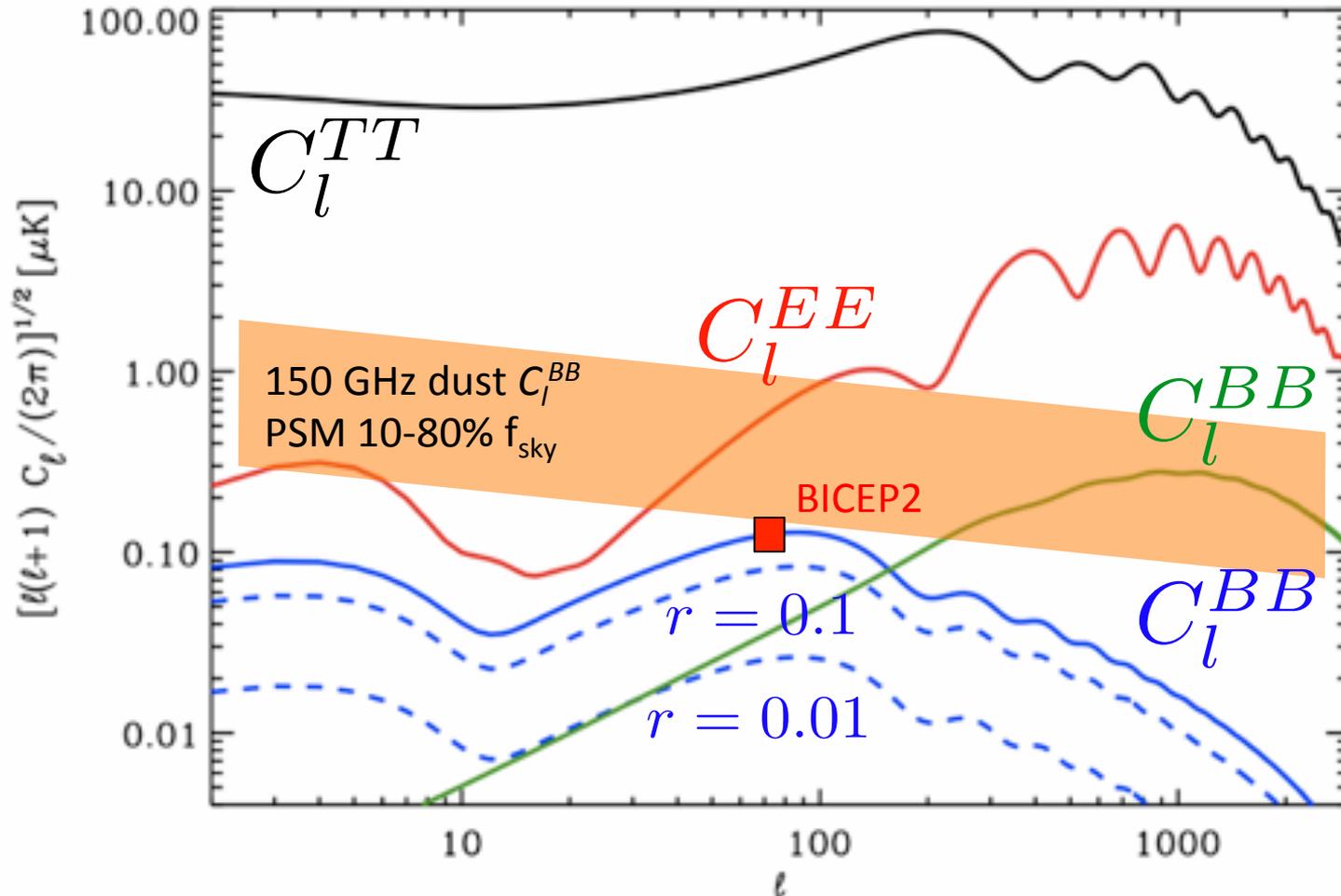


From 350 to 150 GHz: $\times 0.062$; From MJy/sr to uK @ 150 GHz: $\times 2500$
Estimated amplitude at 150 GHz: $0.1 \times 0.062 \times 2500 = \text{about } 15 \text{ uK}$



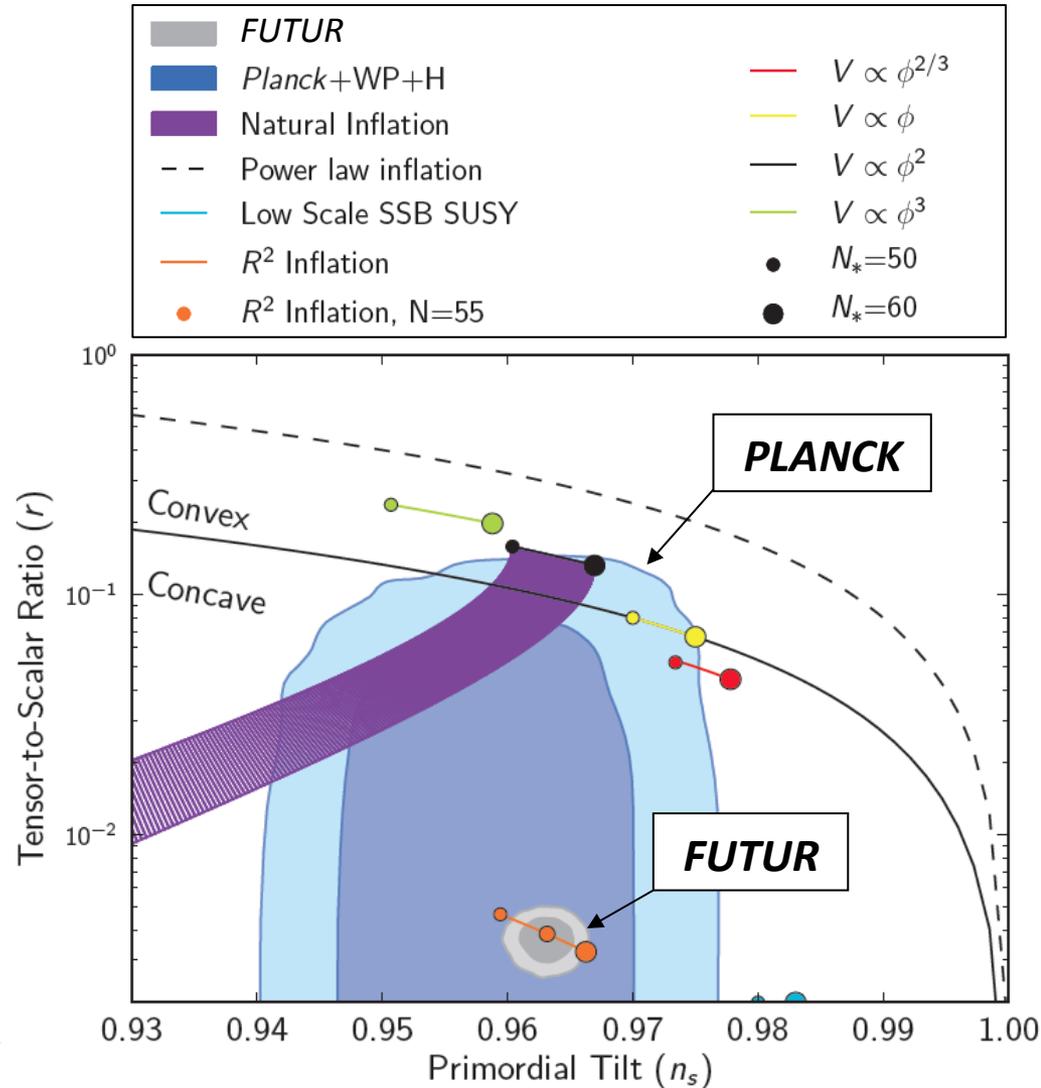
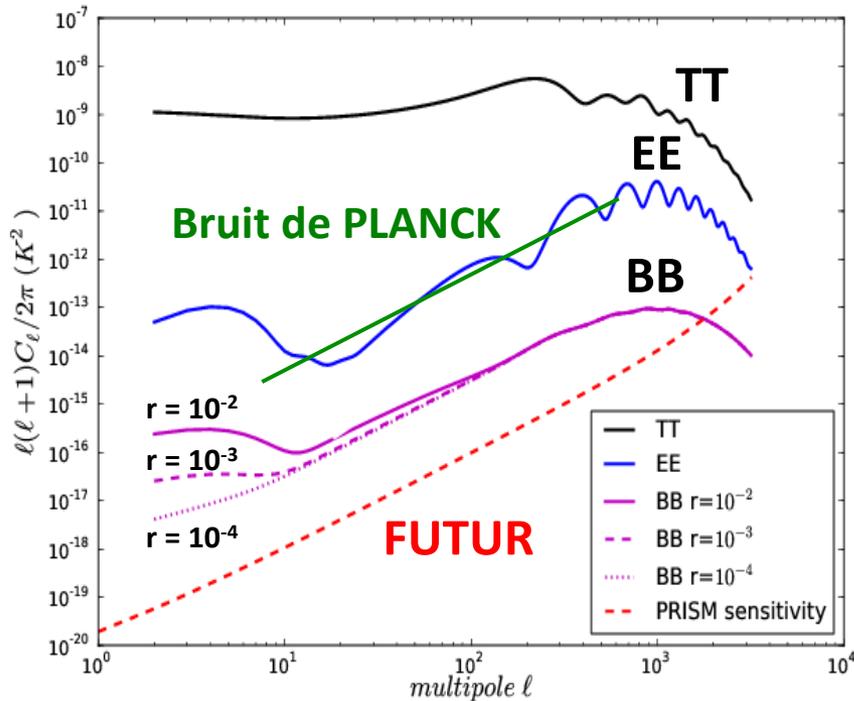
- Deux images de l'émission de poussières centrées sur le nuage de Polaris.
- L'image de gauche montre les lignes de champ magnétique galactique, déduite de l'émission de poussière polarisée observée par le satellite Planck à une résolution de 15', superposées à une carte d'intensité observée par Planck pour un champ de 30 X 30 degrés.
- A droite, un zoom de l'émission de poussières telles que vues par la mission Herschel, lissées à une résolution de 1'.

Contamination par la poussière



Quel objectif ?

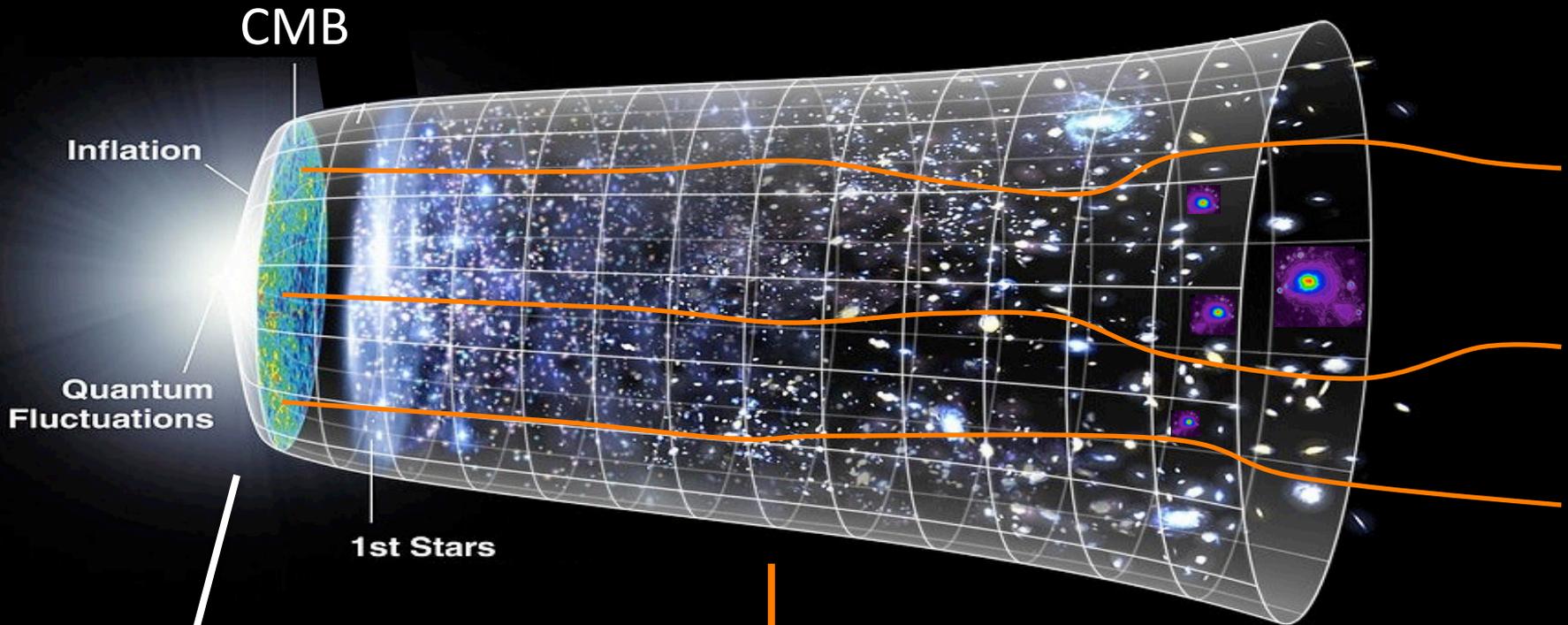
What drives inflation?



Plan de l'exposé

- Petite histoire de l'Univers
- Fond de rayonnement cosmologique
- Polarisation
- Univers primordial et inflation
- • Lentilles gravitationnelles
- Observations futures
- Conclusion

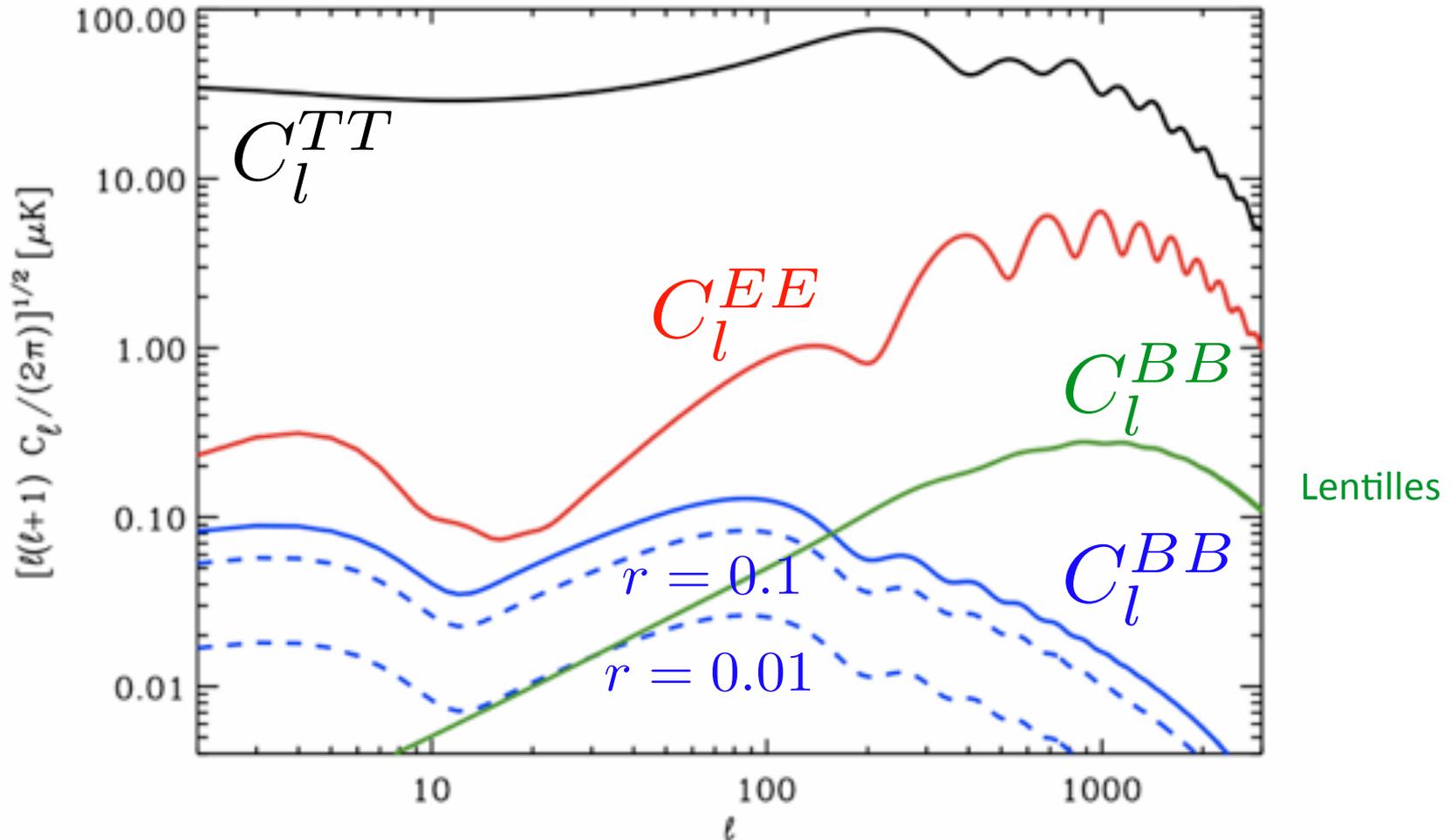
CMB : effet de lentille gravitationnelle



Univers primordial
Physique à $\approx 10^{16}$ GeV
 $E_{\text{CoRE}^+} > 10^{12} \times E_{\text{LHC}}$

$z \approx 1-3$
Lentilles gravitationnelles
Distribution de masse

Lentilles gravitationnelles



$T(\hat{n}) (\pm 350\mu K)$

$E(\hat{n}) (\pm 25\mu K)$

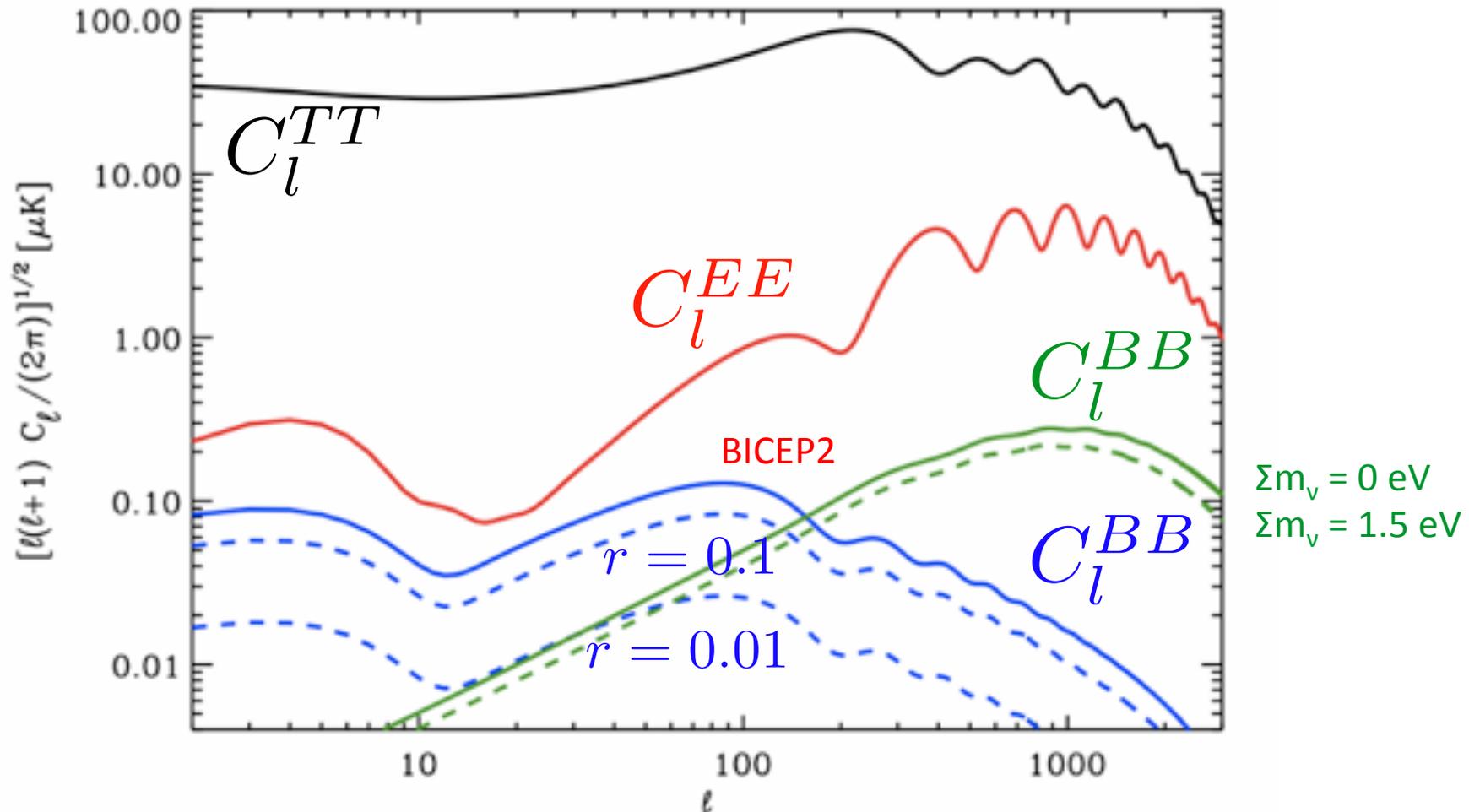
$B(\hat{n}) (\pm 2.5\mu K)$

$T(\hat{n}) (\pm 350\mu K)$

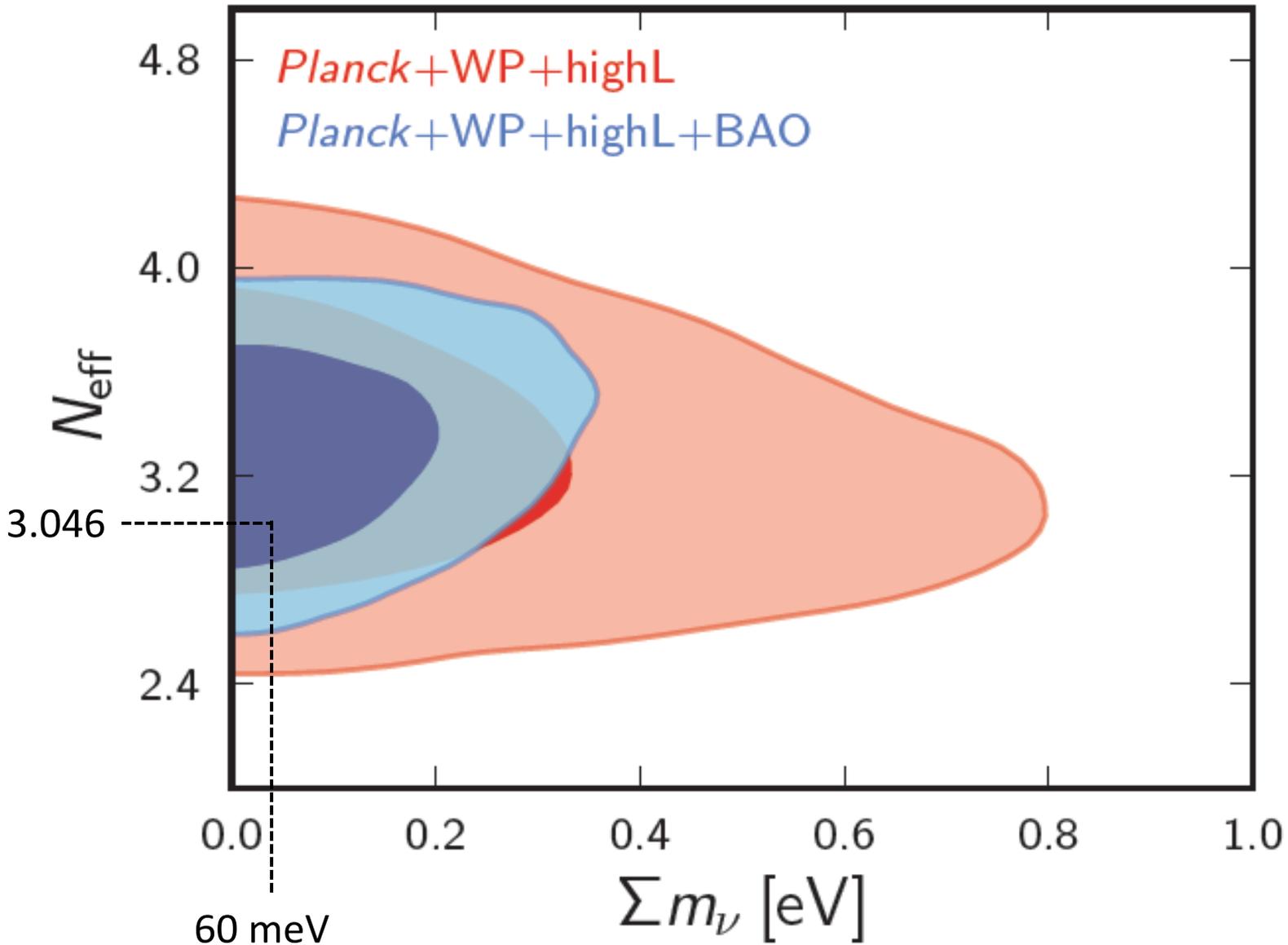
$E(\hat{n}) (\pm 25\mu K)$

$B(\hat{n}) (\pm 2.5\mu K)$

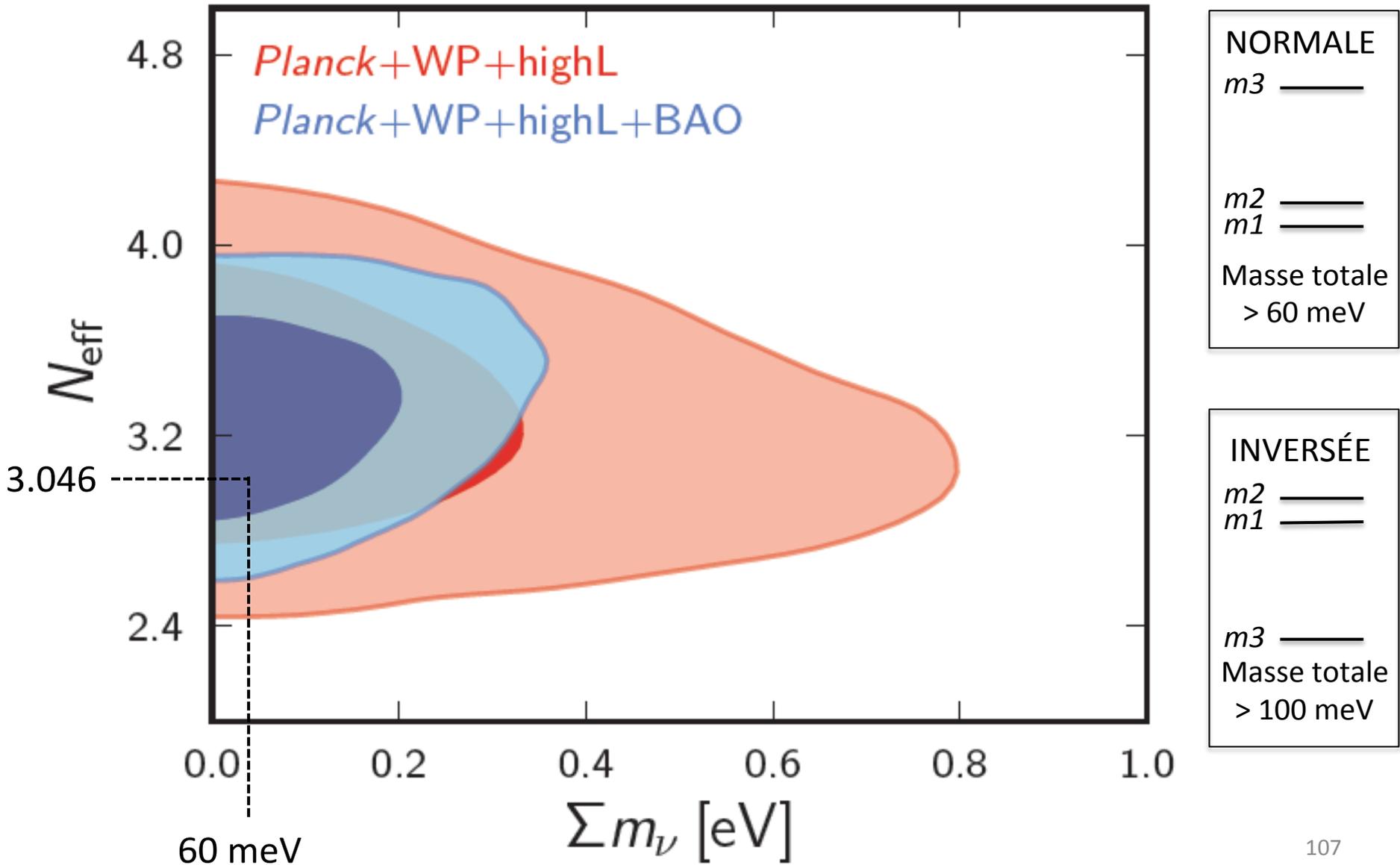
Contraindre la masse des neutrinos



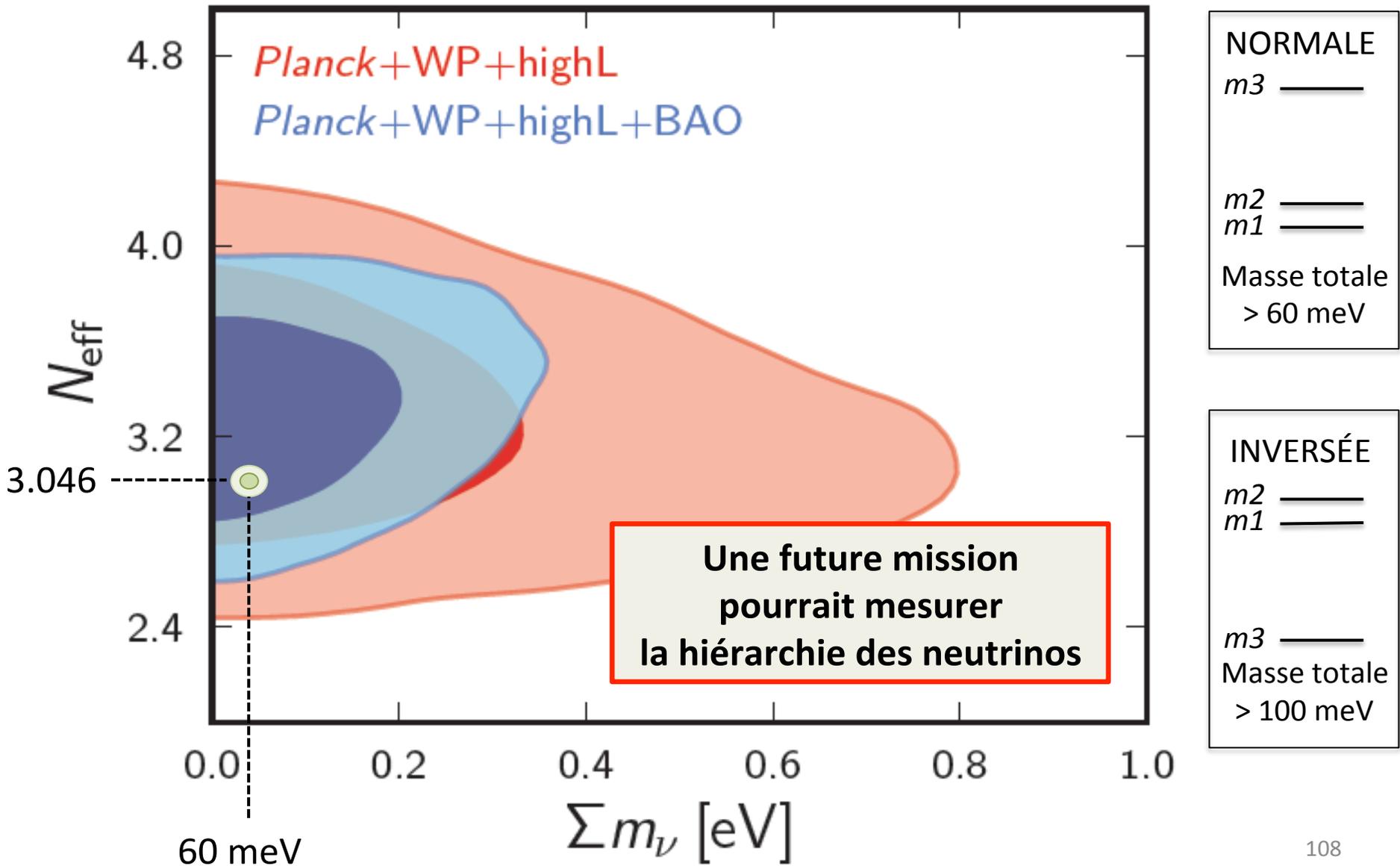
Secteur des neutrinos



Secteur des neutrinos

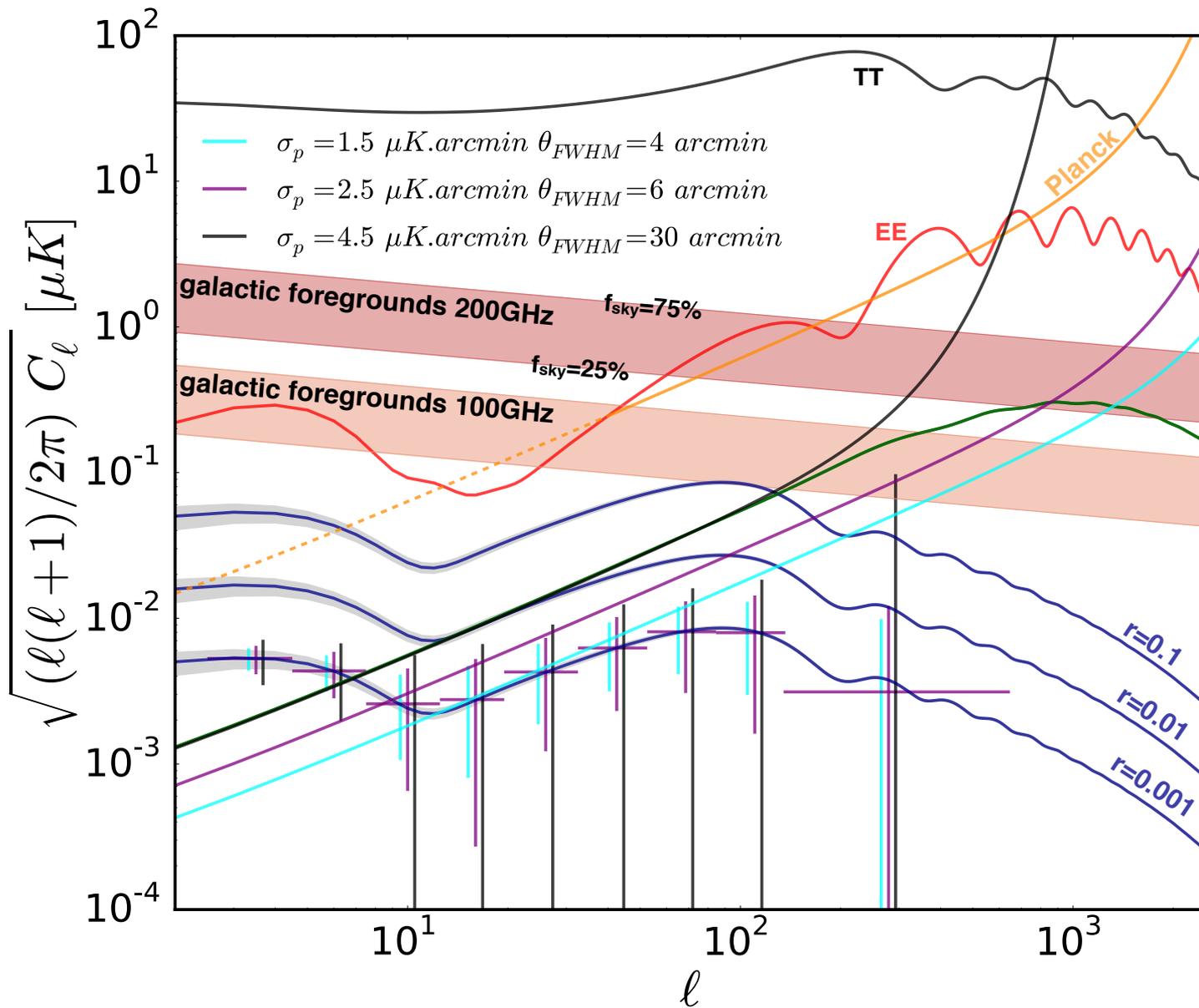


Secteur des neutrinos



Plan de l'exposé

- Petite histoire de l'Univers
- Fond de rayonnement cosmologique
- Polarisation
- Univers primordial et inflation
- Lentilles gravitationnelles
- • Observations futures
- Conclusion



Quelle mission spatiale ?

Objectif premier : atteindre $r \approx 2-3 \times 10^{-3}$ à 5σ .

Ceci est possible mais nécessite de corriger aux grandes échelles de l'effet de lentille gravitationnelle.

Sensibilité entre 1.5 et 2.5 $\mu\text{K}\cdot\text{arcmin}$
 $\approx 2000-6000$ détecteurs dans l'espace.

Résolution angulaire au CMB entre 4' et 6'
(Télescope de classe ≈ 1.5 m, semblable à Planck).

Assez de bandes de fréquence (15-20) pour séparer de façon très précise CMB et émissions d'avant-plan.

Concept

Une mission dimensionnée pour la mesure de la polarisation du Fond Cosmologique (et spécifiquement les modes B, primordiaux et lentille)

Performance / caractéristique requise	Solution technique
Résoudre les modes B du CMB $\approx 4\text{-}6'$ de résolution	Télescope de classe 1.5m $\approx 6'$ à 135 GHz; $\approx 4'$ à 200 GHz
S/N = 2-3 par mode B de lentille $\sigma_p = 1.7\text{-}2.5 \mu\text{K.arcmin}$ sur $\approx 100\%$ du ciel	De ≈ 2500 (baseline) à 5000 (extension) détecteurs à $\approx 100 \text{ mK}$
Contrôle des effets systématiques pour la mesure de polarisation	Orbite L2; Redondance et modulation de polarisation par stratégie de balayage
Contrôle/séparation des avant plans en polarisation (et intensité)	15-20 bandes de fréquence couvrant $\approx 60\text{-}600 \text{ GHz}$ (ou plus)

Éléments dimensionnants

- Orbite et stratégie de balayage
 - Besoins en hydrazine pour maintenir la précession (masse)
 - compromis avec hydrazine disponible pour injection en orbite
 - Besoin d'une antenne déspinnée pour la transmission des données
- Taille du télescope
 - Lanceur Soyouz (mission moyenne)
- Détecteurs cryogéniques
 - Chaîne de refroidissement complexe et coûteuse

Orbite et Stratégie de Balayage

axe Y en UA

transfert et grande lissajous de SAMPAN (XY repère Lagrangien)

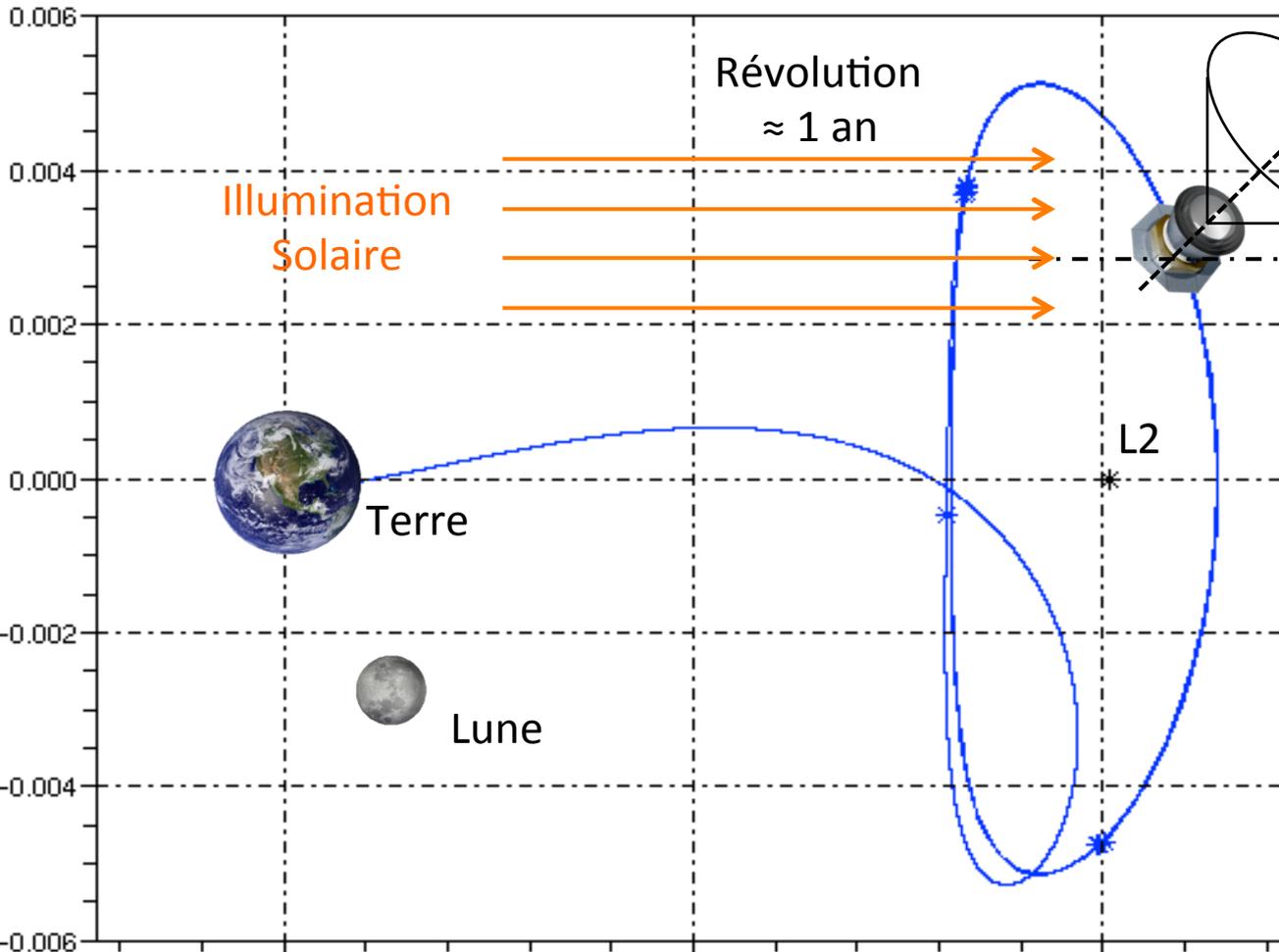
Rotation
≈ 1 minute

Précession
≈ 4 jours

Configuration de base :
50% du ciel couvert
tous les 4 jours avec une
sensibilité et résolution
angulaire meilleures que
Planck HFI, dans ≈20
bandes de fréquence.

Mission nominale: 3 ans

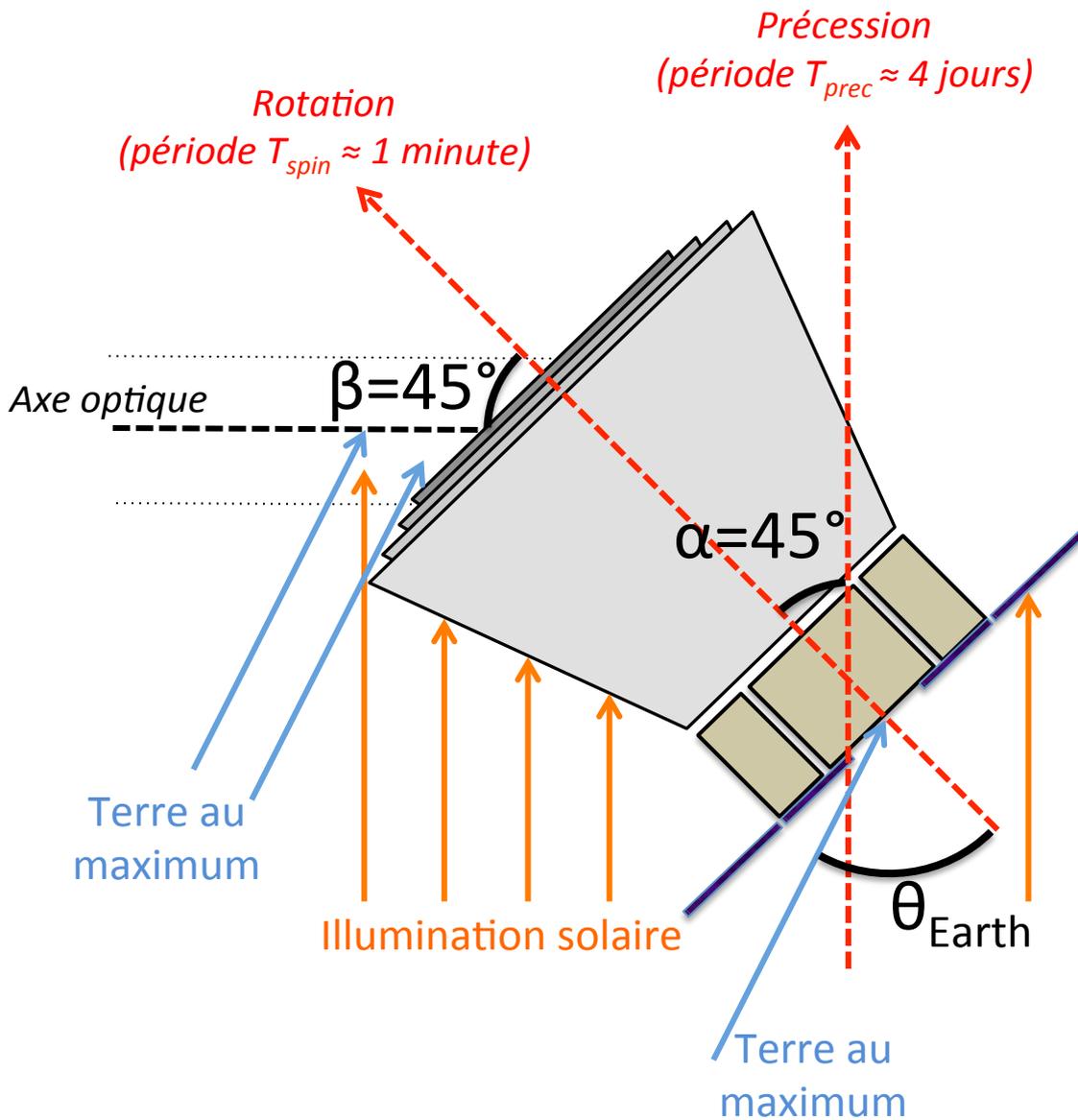
axe X en UA



Révolution
≈ 1 an

Illumination
Solaire

L2



Optimisation des paramètres

Précession anti-solaire pour stabilité thermique;

Contraintes sur α :

- température de la charge utile
- puissance panneaux solaires

Contraintes sur θ_{Earth} :

- transmission des données
- lumière parasite

Contraintes sur β :

- ciel complet ($\alpha + \beta \geq 90^\circ$)

Contraintes sur T_{spin} :

- cadence d'échantillonnage
- flot de données

Contraintes sur T_{prec} :

- échantillonnage cross-scan

Satellite

Ecran interne rigide
(Aluminium)
 $T \leq 60$ K

3 écrans externes
(MLI / kapton
sur structure légère fixe)
 $T \approx 200, 150, 100$ K

Télescope Grégorien hors-axe
Diamètre projeté 1.5 m
Refroidissement passif $T \leq 60$ K

Plan focal
 $\varnothing = 50$ cm

Panneaux solaires
déployables;
Puissance 2073 W
(compris 10% marge)

Module de service

Masse totale 1958 kg
(compris 20% marge système)

Lanceur : Soyouz

Le satellite est conçu / adapté pour un lancement **Soyouz** à L2 depuis Kourou.

Masse totale ≤ 2160 kg (marge comprise)

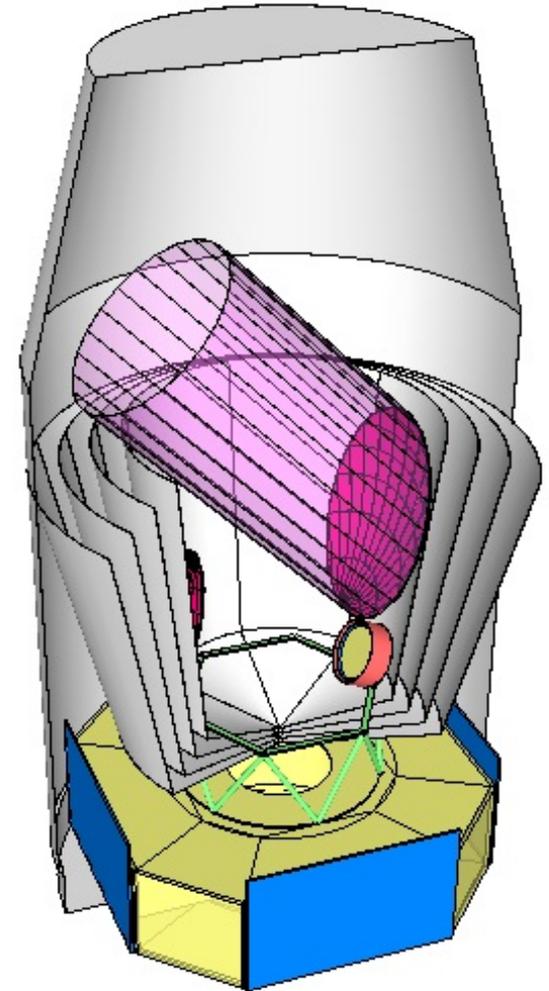
Diamètre hors-tout en configuration lancement ≤ 3.80 m.

Panneaux solaires déployables nécessaires.

Un lanceur **Ariane 6** conviendrait également, et permettrait de reconfigurer les panneaux solaires et les écrans.

- marge supplémentaire sur la puissance disponible
- optimisation du refroidissement passif
- marge supplémentaire pour la configuration optique

Un lanceur Vega n'est pas compatible avec les besoins de la mission.



Plan de l'exposé

- Petite histoire de l'Univers
- Fond de rayonnement cosmologique
- Polarisation
- Univers primordial et inflation
- Lentilles gravitationnelles
- Observations futures
- ➔ • Conclusion

Conclusion

- Les fluctuations de température du fond cosmologique sont désormais très bien mesurées (Planck)
- La polarisation est détectée (modes E), mais avec une précision qui peut être améliorée
- Il reste beaucoup à apprendre des modes B
 - *Physique de l'univers primordial (inflation)*
 - *Voir la matière noire*
 - *Mieux comprendre les neutrinos et leur rôle dans la formation des structures*

Conclusion

*Une mission spatiale est possible
pour répondre à ces questions,
il n'y a plus qu'à la faire ...*

mais cela va demander encore beaucoup d'efforts ...
... et beaucoup de temps !