

ANNÉE 2023-2024
DE LA PHYSIQUE



Cosmologie observationnelle

French Teacher Programme 2023

Céline Combet
Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie

Cosmologie observationnelle

On s'intéresse au contenu et
l'évolution de l'Univers, dans
son ensemble

On regarde le ciel
dans plusieurs
longueurs d'ondes

Physique, astrophysique et cosmologie

- **Physique expérimentale** : l'expérience est au coeur du processus ; on contrôle l'expérience. e.g., LHC !
- **Astrophysique** : "observation passive". Développement de modèles permettant de décrire différents type d'objets. e.g., formation planétaire, modèle évolution stellaire, modèle évolution galaxies, etc. Mais, on a accès à l'observation de plusieurs objets d'une même catégorie....
- **Cosmologie** : "observation passive" et on n'a accès qu'à un seul univers !
 - * La vitesse de la lumière est finie : "regarder loin" c'est "regarder dans le passé"
 - * Principe cosmologique : l'univers est homogène et isotrope (aux grandes échelles)

notre univers: Amas de galaxies : *dizaines de millions d'années-lumière*

milliards d'années-lumière

galaxies voisines : *millions d'années-lumière*

notre Galaxie : *dizaines de milliers d'années-lumière*

Terre



Systeme solaire : *heures-lumière* EM

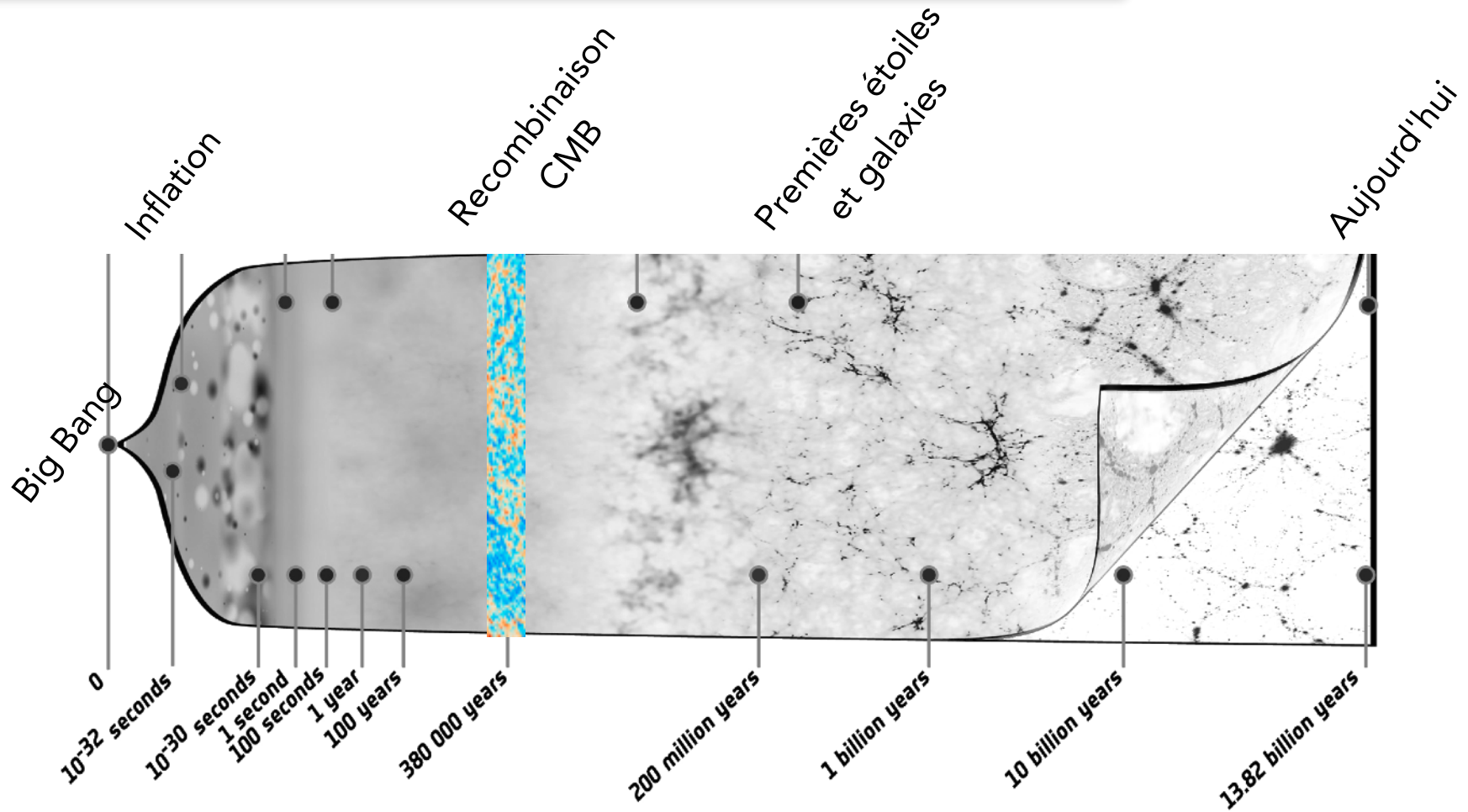
Introduction

- Histoire de l'univers
- Expansion
- Modèle de concordance

Les sondes cosmologiques

- Univers primordial : Le fond diffus cosmologique (CMB)
- Univers "récent"
 - La distribution des galaxies
 - Les supernovae (SNe)
 - Les autres sondes (en mode rapide)

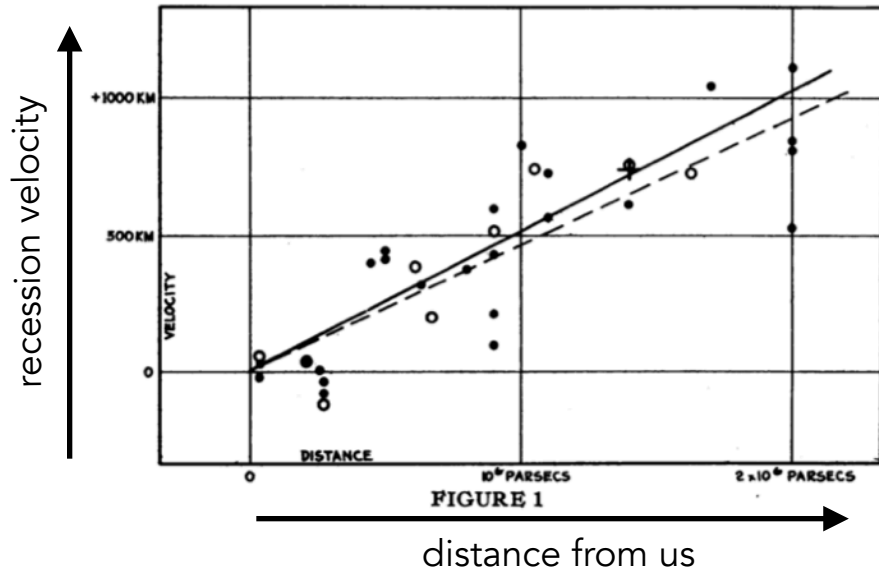
Histoire de l'univers, telle que comprise aujourd'hui



Le Big Bang n'est pas une explosion. Singularité mathématique traduisant l'émergence de l'espace-temps.
Il n'y a pas de centre à l'Univers !

La relativité générale est la théorie qui décrit l'univers en expansion

Un univers en expansion - 1927-1929



Lemaître 1927, Hubble 1929 :

- Relation linéaire entre la vitesse d'éloignement et la distance des galaxies proches

$$v = H_0 \times d$$

Constante de Hubble

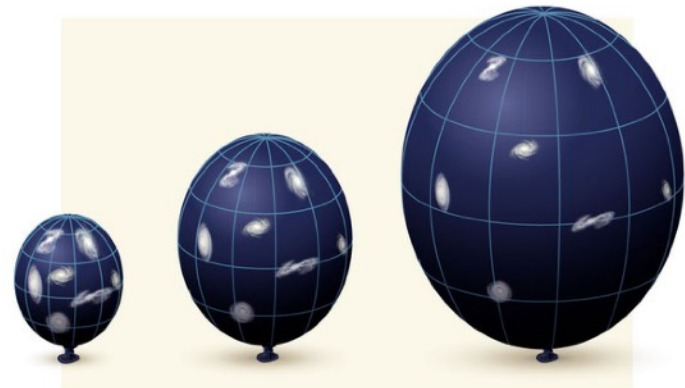


Analogies utiles, mais peuvent être trompeuses

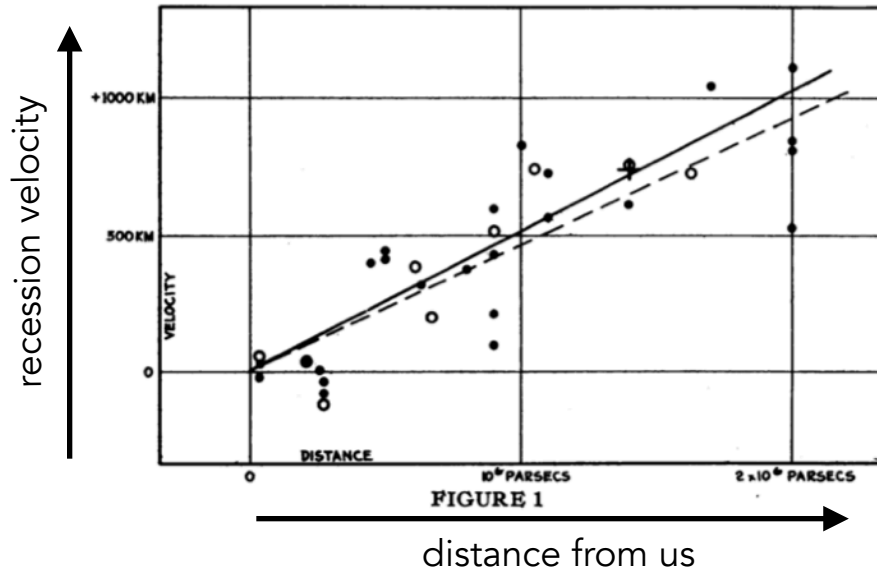
Dans toutes les directions les galaxies s'éloignent de nous



L'univers est en expansion



Un univers en expansion - 1927-1929



Lemaître 1927, Hubble 1929 :

- Relation linéaire entre la vitesse d'éloignement et la distance des galaxies proches

$$v = H_0 \times d$$

Constante de Hubble

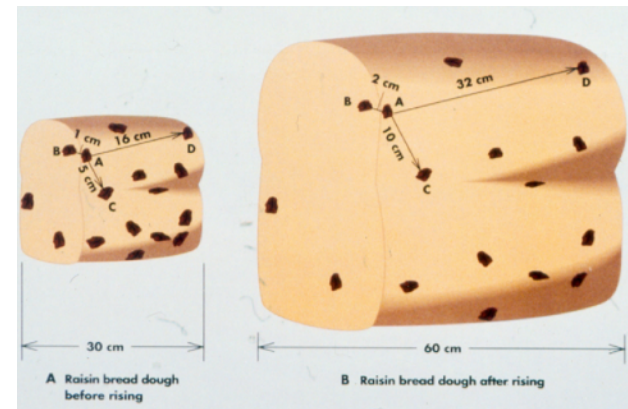


Analogies utiles, mais peuvent être trompeuses

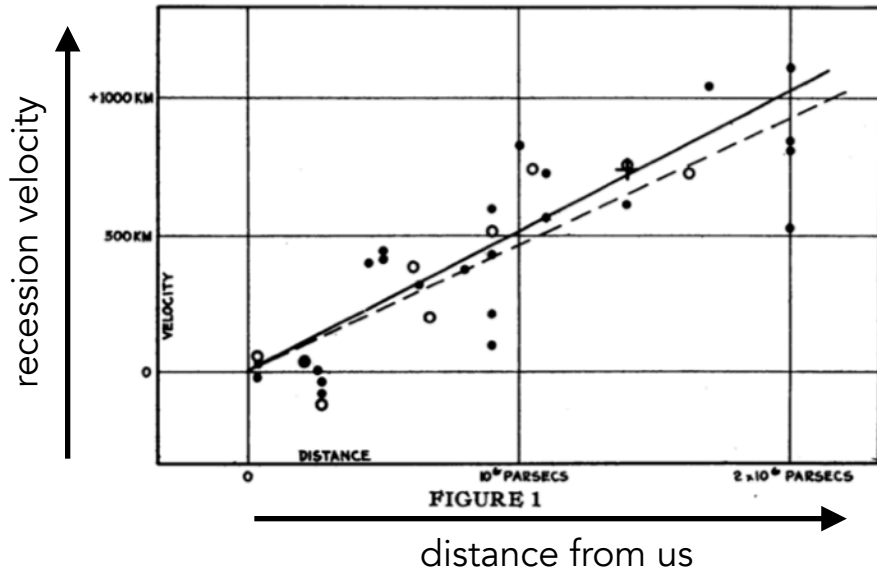
Dans toutes les directions les galaxies s'éloignent de nous



L'univers est en expansion



Un univers en expansion accélérée - 1998



Lemaître 1927, Hubble 1929 :

- Relation linéaire entre la vitesse d'éloignement et la distance des galaxies proches

$$v = H_0 \times d$$

Constante de Hubble

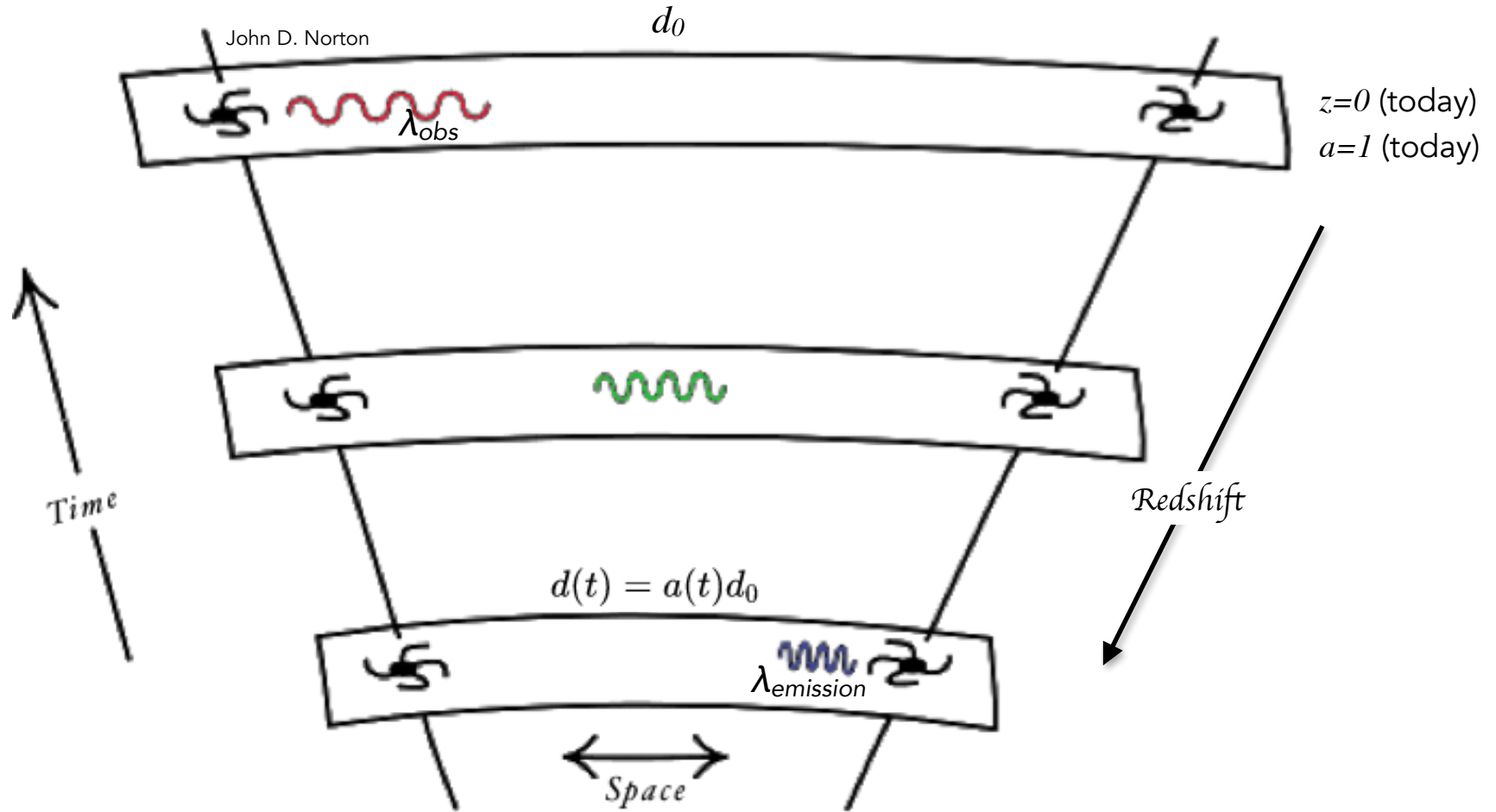
1998 : 2 équipes indépendentes utilisent les supernovae (SNIa) pour mesurer l'expansion

- l'expansion accélère
- incompatible avec un univers dominé par la matière
- Besoin d'invoquer un nouveau "fluide de pression négative" : **l'énergie noire**

Saul Perlmutter, Adam Riess, Brian Schmidt



L'expansion de l'univers



$$1+z = \lambda_{obs} / \lambda_{emission}$$

Décalage vers le rouge :
redshift \longleftrightarrow vitesse

$$a(t) = \frac{1}{1+z}$$

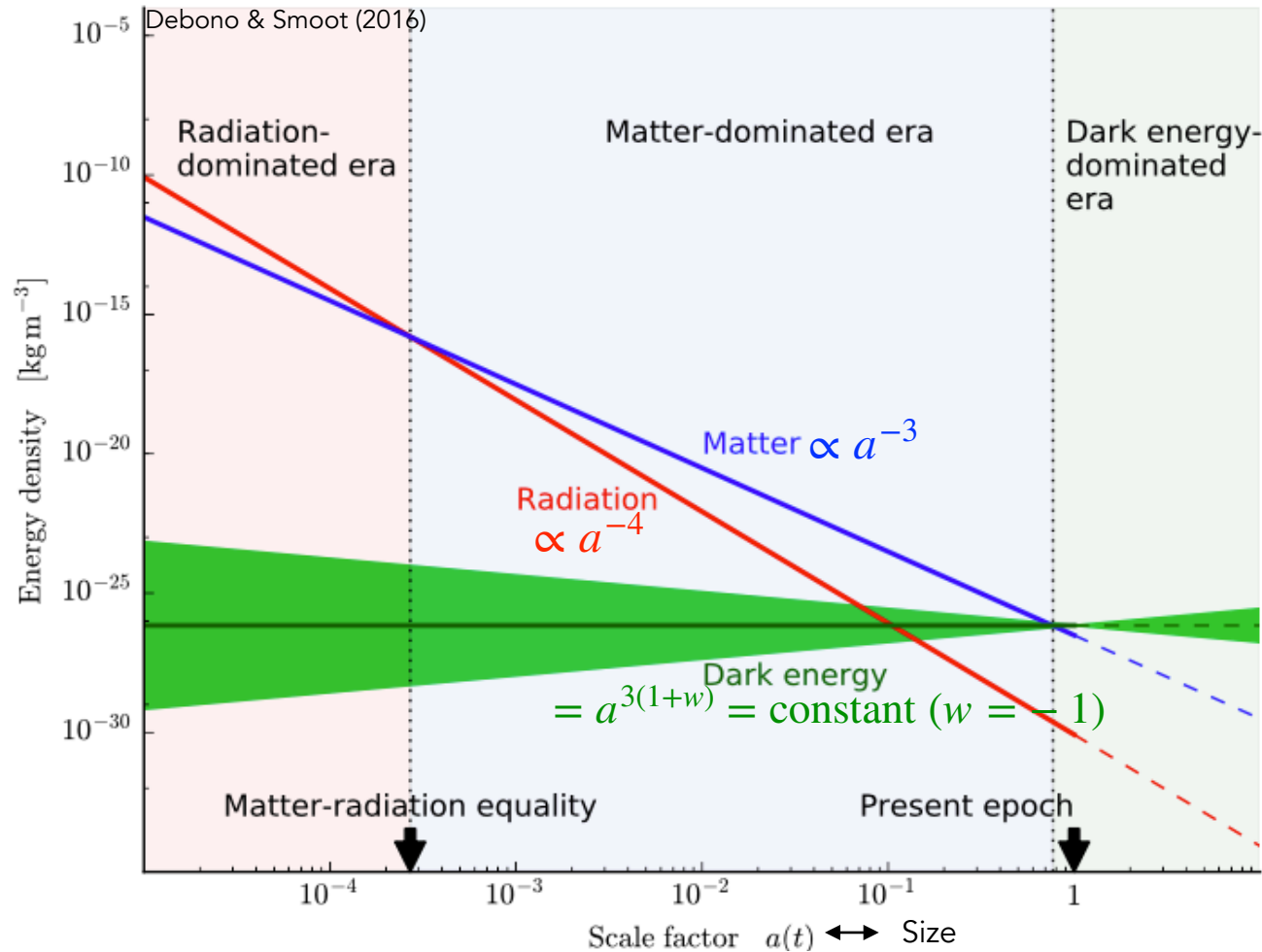
Facteur
d'échelle

Évolution des différents constituants de l'univers

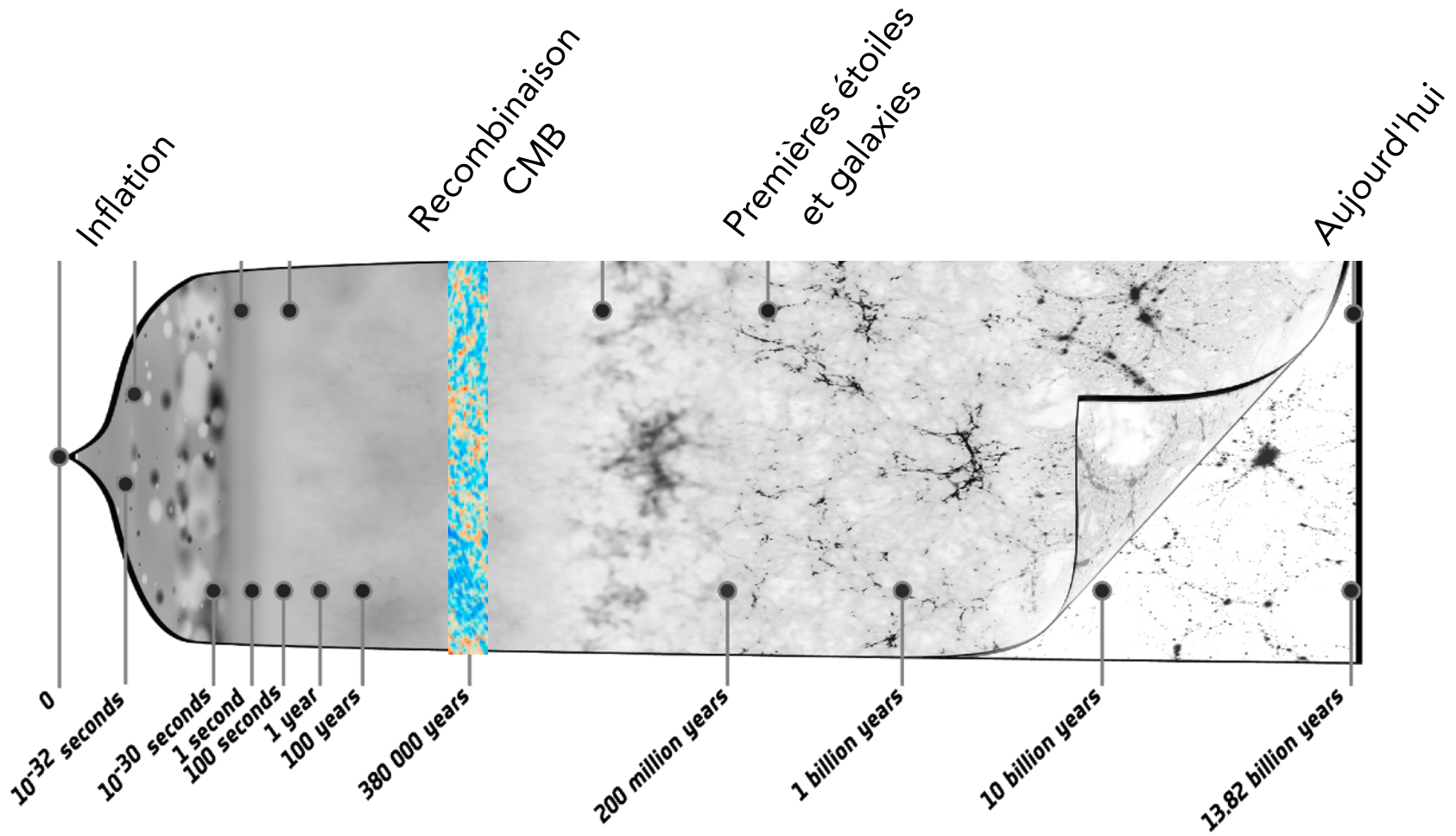
Matière = matière noire, matière ordinaire (baryons)

Rayonnement = particules relativistes (photons, neutrinos)

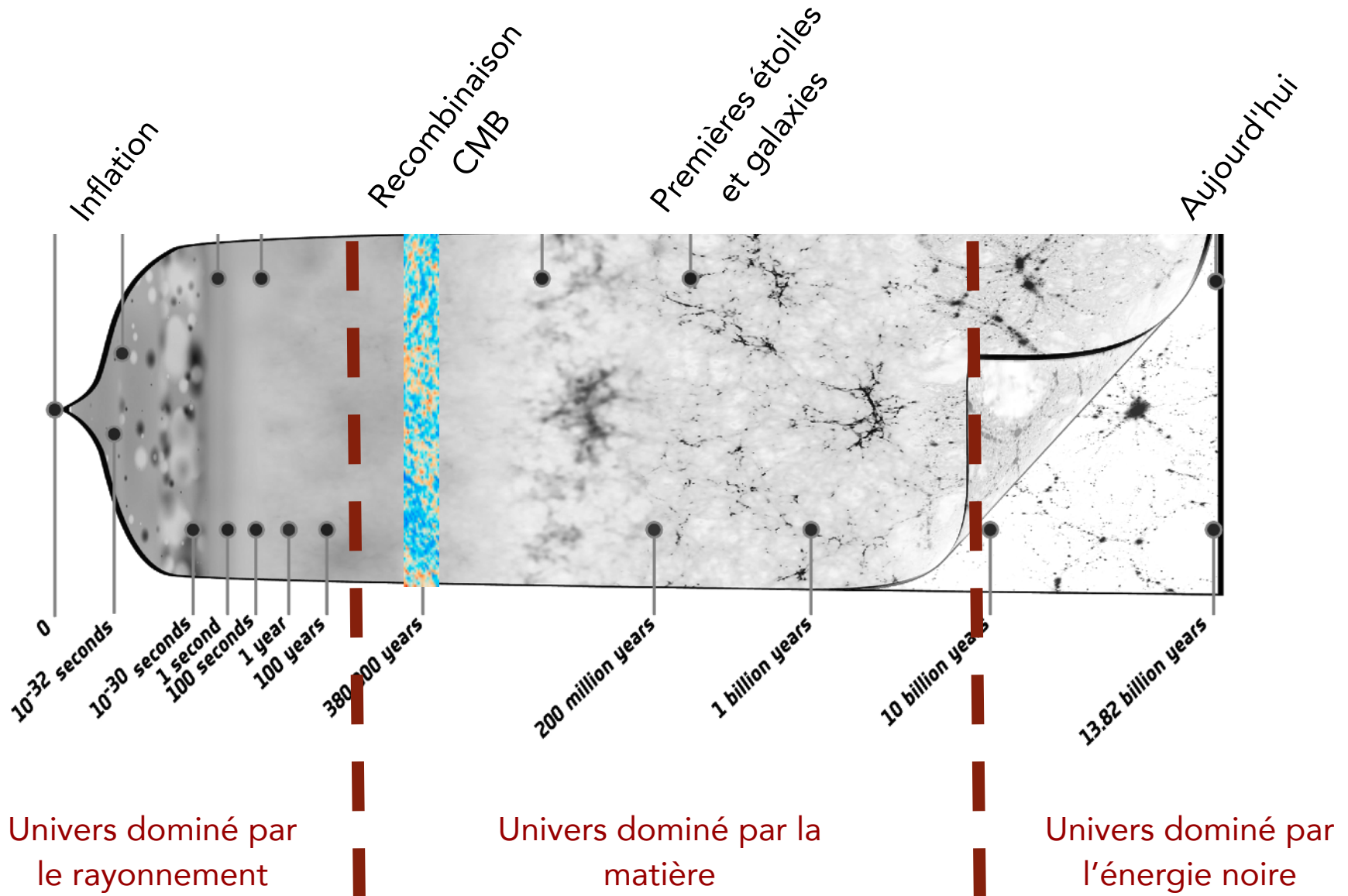
Énergie noire = ?



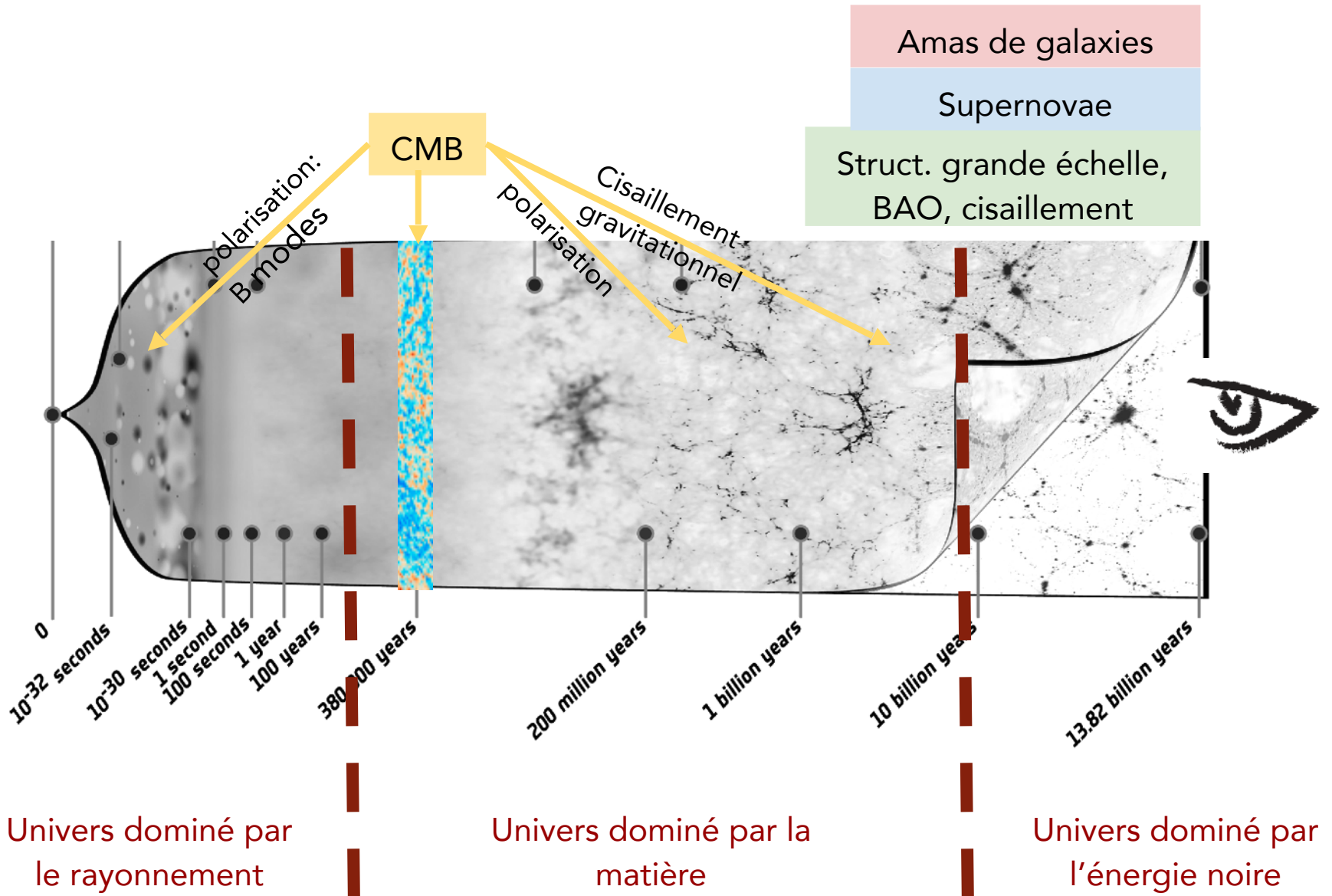
Histoire de l'univers



Histoire de l'univers

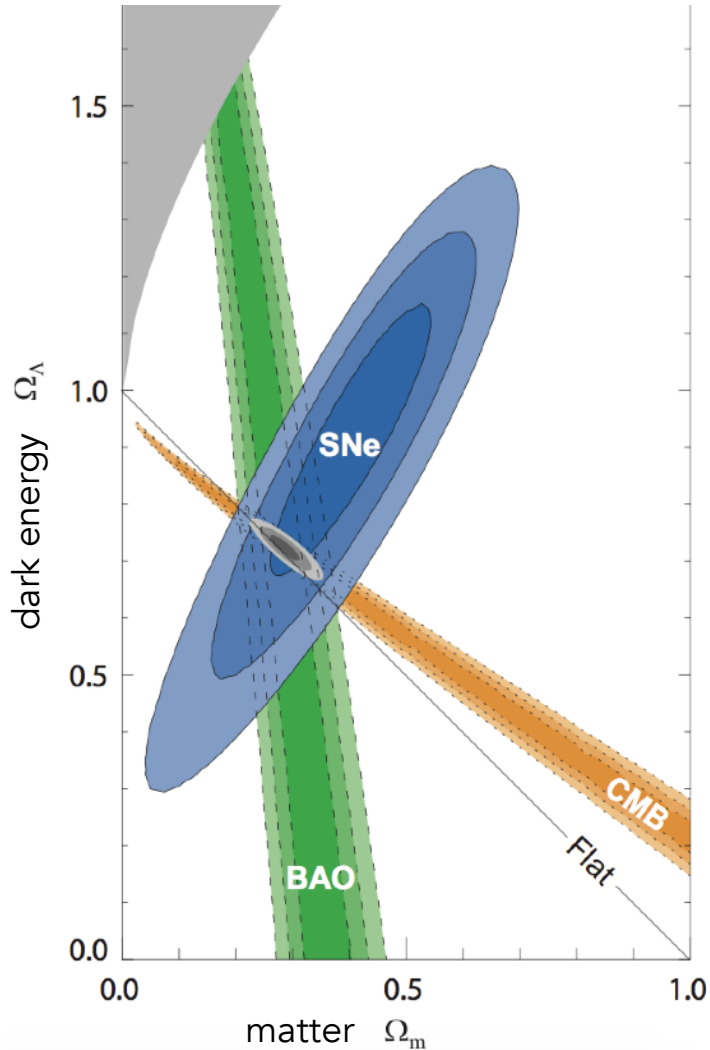


Qu'est ce qui sonde quoi et quand?



Le modèle de concordance

Kowalski et al (2008)

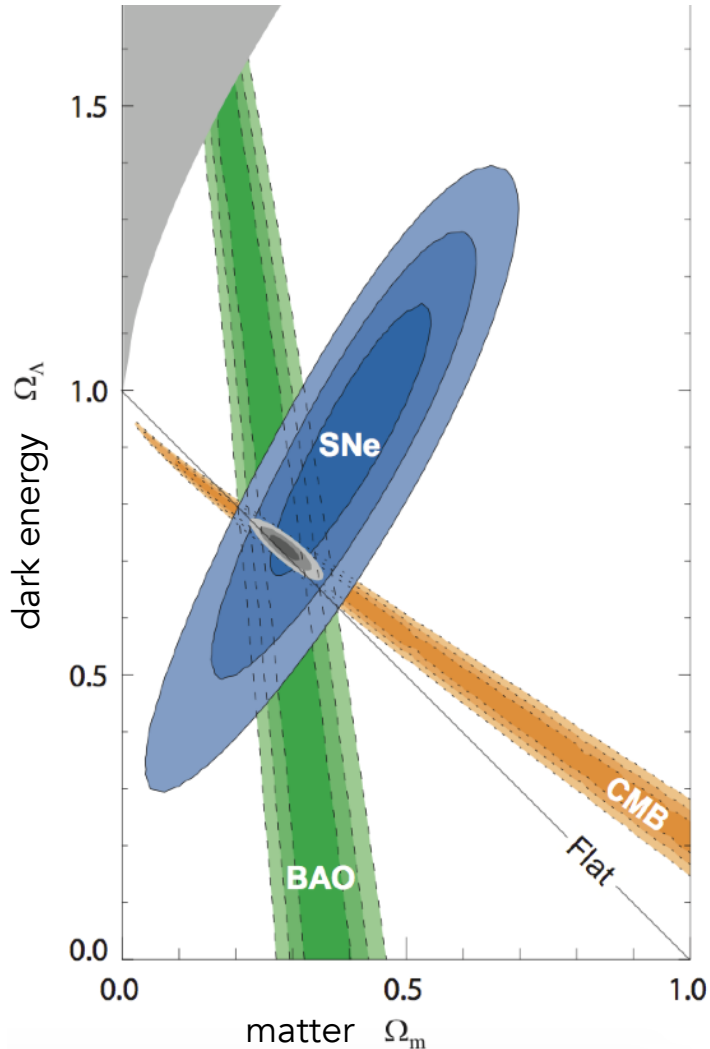


Concordance pour un modèle Λ CDM, avec **aujourd'hui** :

- ~69% énergie noire ($\Lambda = \text{const. cosmologique}$)
- ~26% matière noire froide (CDM)
- ~5% matière ordinaire

Le modèle de concordance

Kowalski et al (2008)



Concordance pour un modèle Λ CDM, avec **aujourd'hui** :

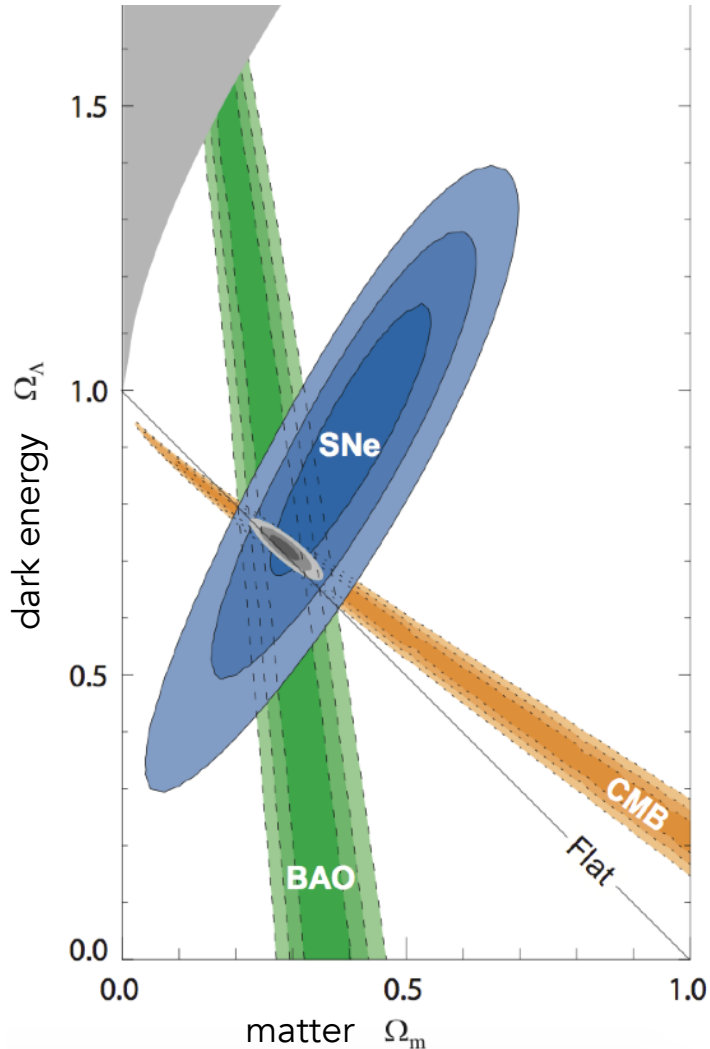
- ~69% énergie noire ($\Lambda = \text{const. cosmologique}$)
- ~26% matière noire froide (CDM)
- ~5% matière ordinaire

95% du contenu de l'univers est de nature inconnue !!

Le modèle a seulement 6 paramètres libres mais permet de décrire toutes les observations

Le modèle de concordance

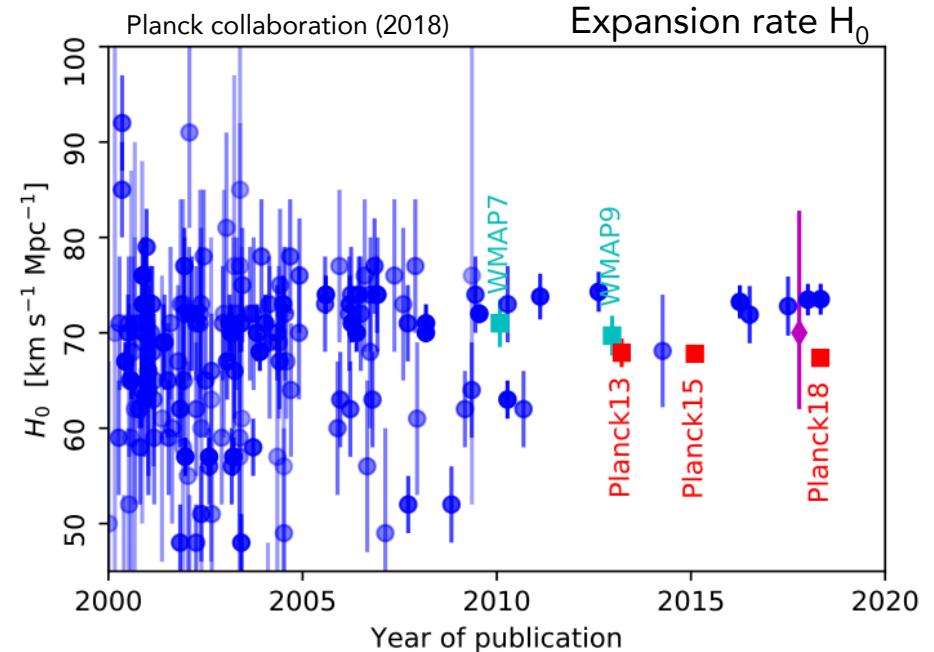
Kowalski et al (2008)



Concordance pour un modèle Λ CDM, avec **aujourd'hui** :

- ~69% énergie noire ($\Lambda = \text{const. cosmologique}$)
- ~26% matière noire froide (CDM)
- ~5% matière ordinaire

Concordance? Oui, mais il reste des "tensions"



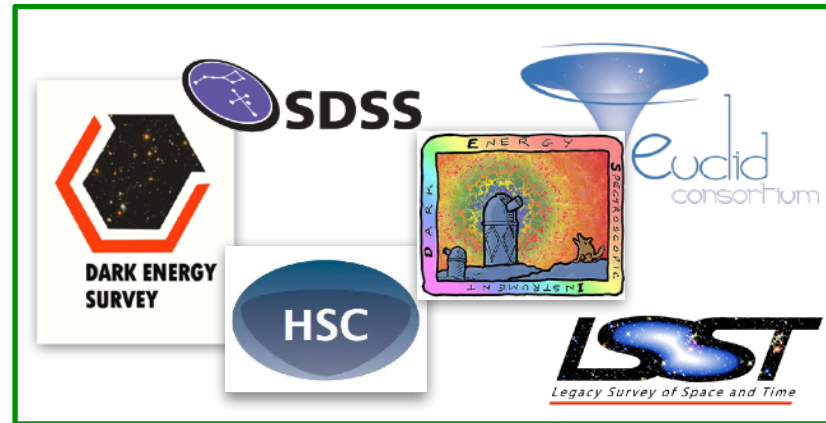
Tensions = nouvelle physique ou effets systématiques?

- Continuer à construire de meilleurs instruments : plus sensibles, meilleure statistique, meilleur contrôle des effets systématiques

mm-wavelength



visible - near IR



X-ray



- Améliorer les techniques d'analyse de données
- Poursuivre le développement des modèles/prédictions théorique

Dans la suite...

- Continuer à construire de meilleurs instruments : plus sensibles, meilleure statistique, meilleur contrôle des effets systématiques

mm-wavelength



visible - near IR



X-ray



- Améliorer les techniques d'analyse de données
- Poursuivre le développement des modèles/prédictions théorique

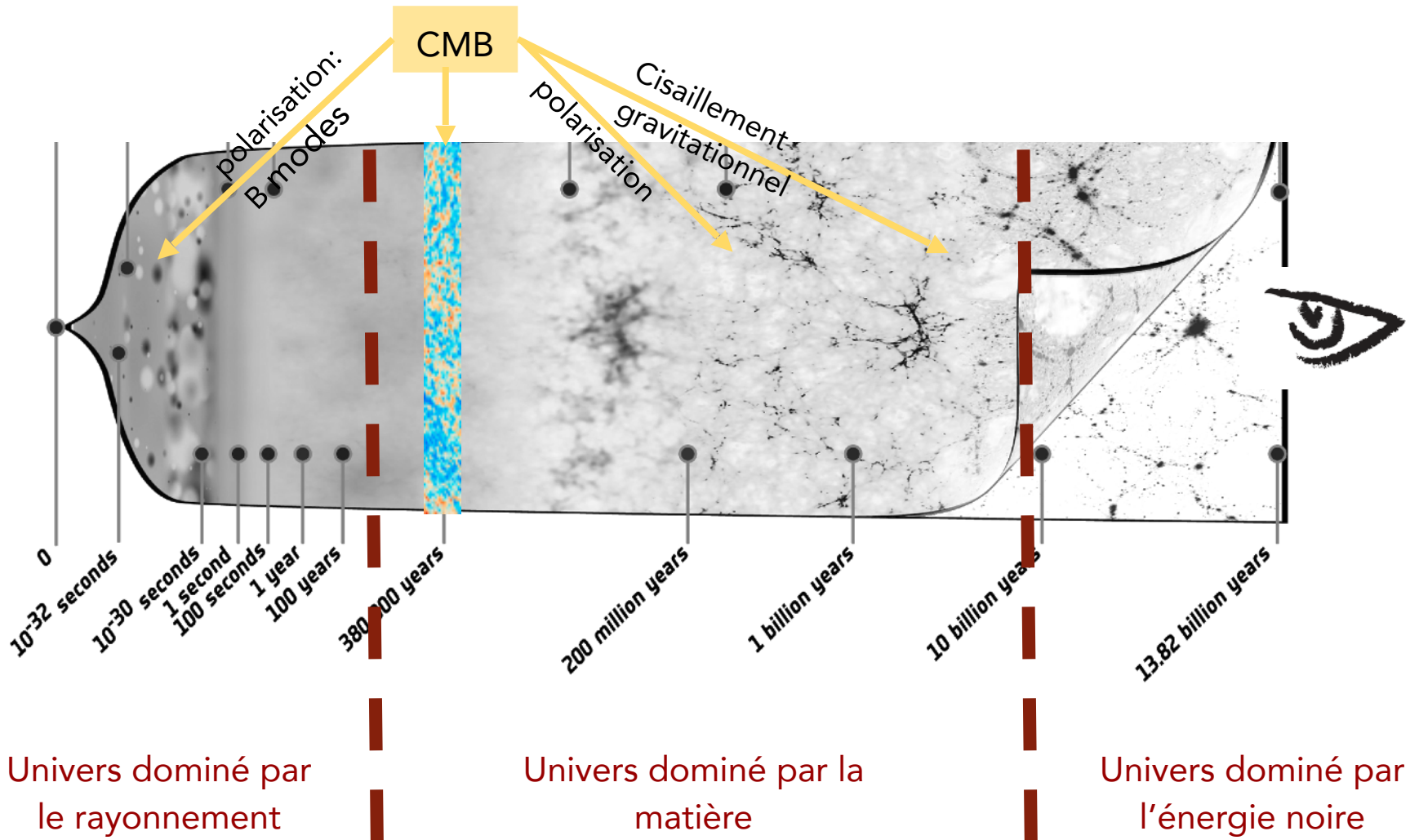
Introduction

- Histoire de l'univers
- Expansion
- Modèle de concordance



Les sondes cosmologiques

- Univers primordial : Le fond diffus cosmologique (CMB)
- Univers "récent"
 - La distribution des galaxies
 - Les supernovae (SNe)
 - Les autres sondes (en mode rapide)

Qu'est ce qui sonde quoi et quand?



La mission Planck

- télescope de 1.5 m
- 2 instruments
 - ❖ LFI (30-70 GHz), 20 K 
 - ❖ HFI (100-857 GHz), 0.1K 



Sensibilité : $2 \times 10^{-6} \Delta T/T$

Mission ESA: première mission européenne dédiée au CMB !

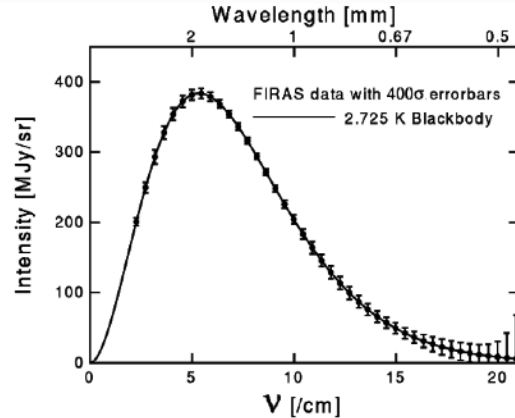
- Lancement 2009 à Kourou
- Résultats cosmologiques en 2013, 2015, 2018...

Cosmic Microwave Background (CMB)

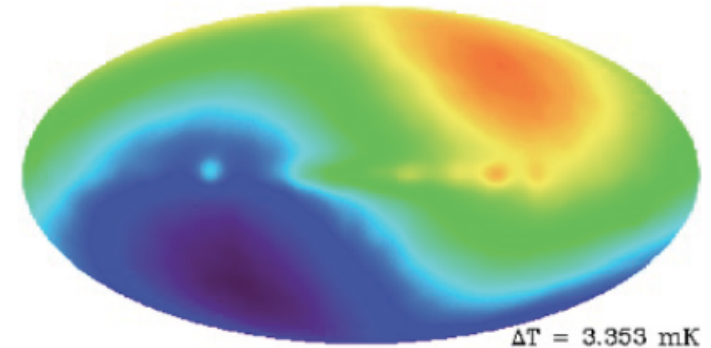
Rayonnement de corps noir isotrope

$$T = 2.73 \text{ K}$$

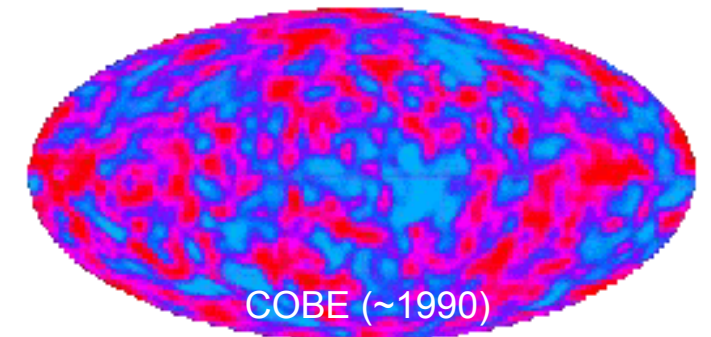
→ observations dans le mm



Anisotropie dipolaire due au mouvement du système solaire par rapport au CMB → $\Delta T/T \sim 10^{-3}$



Anisotropies dues aux fluctuations primordiales de densité → $\Delta T/T \sim 10^{-5}$

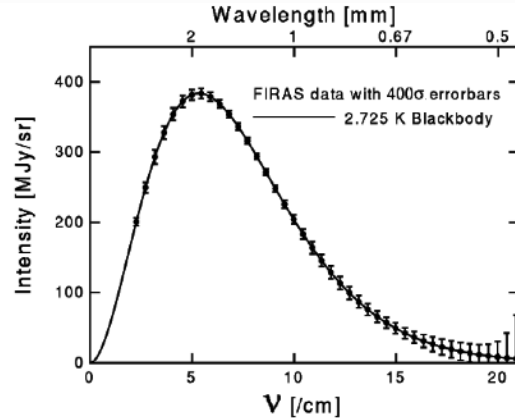


Cosmic Microwave Background (CMB)

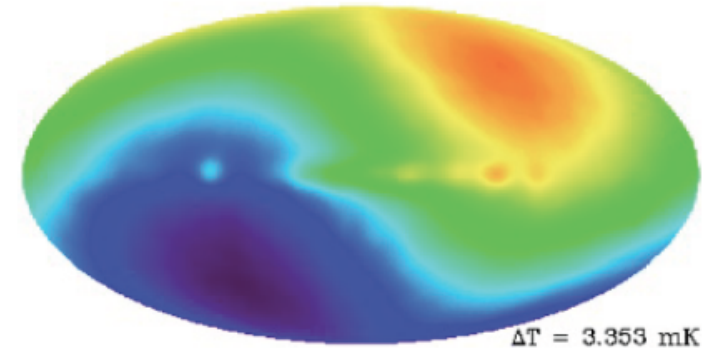
Rayonnement de corps noir isotrope

$$T = 2.73 \text{ K}$$

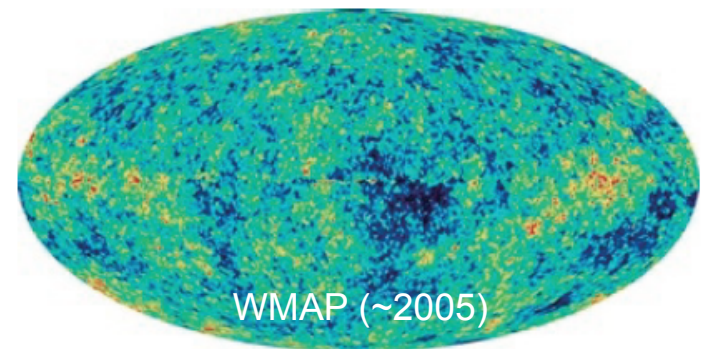
→ observations dans le mm



Anisotropie dipolaire due au mouvement du système solaire par rapport au CMB → $\Delta T/T \sim 10^{-3}$



Anisotropies dues aux fluctuations primordiales de densité → $\Delta T/T \sim 10^{-5}$

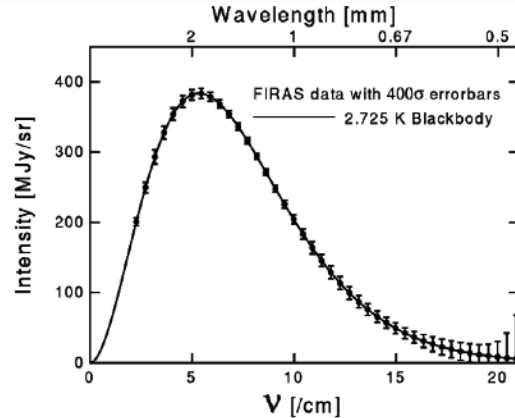


Cosmic Microwave Background (CMB)

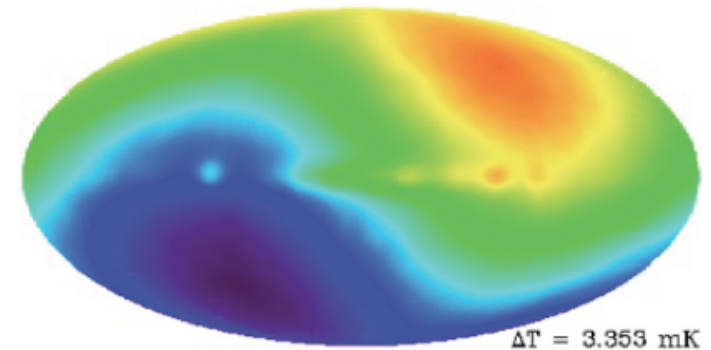
Rayonnement de corps noir isotrope

$$T = 2.73 \text{ K}$$

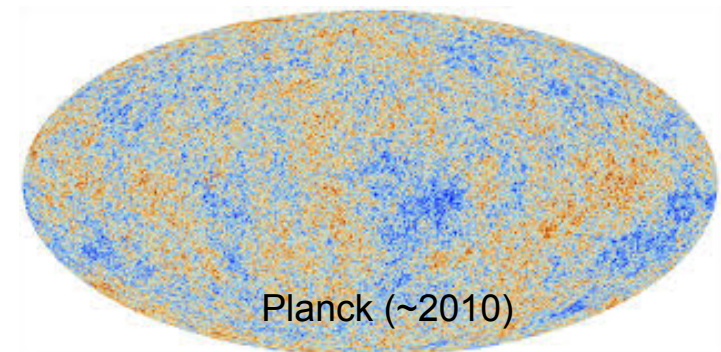
→ observations dans le mm



Anisotropie dipolaire due au mouvement du système solaire par rapport au CMB → $\Delta T/T \sim 10^{-3}$

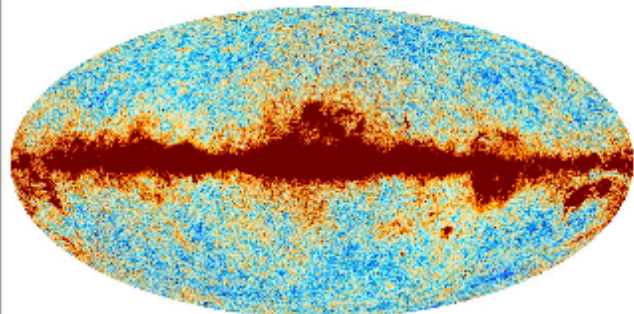


Anisotropies dues aux fluctuations primordiales de densité → $\Delta T/T \sim 10^{-5}$

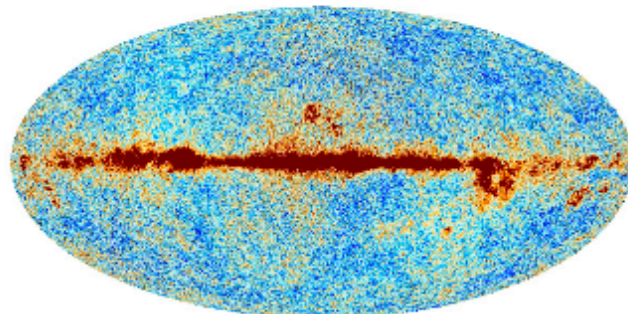


Les 9 cartes en fréquence de Planck

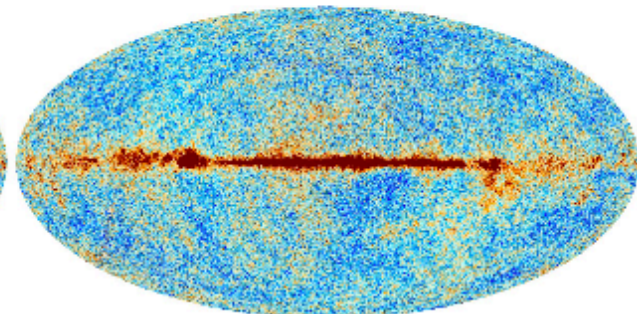
30 GHz



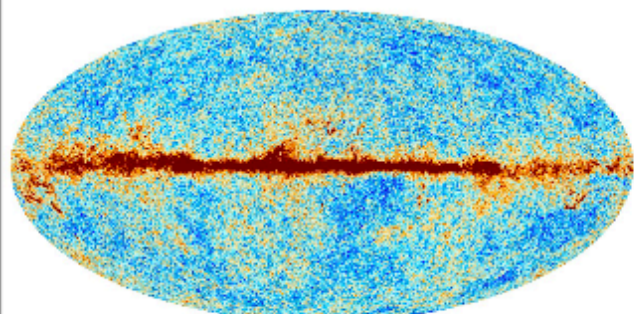
44 GHz



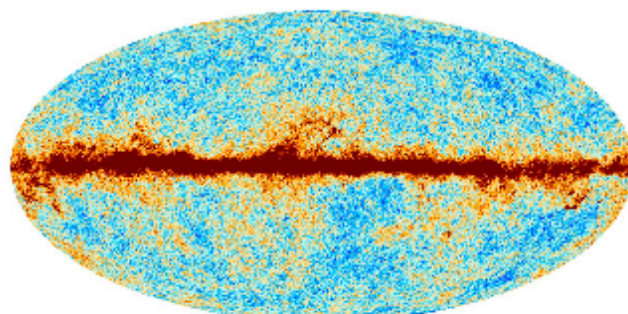
70 GHz



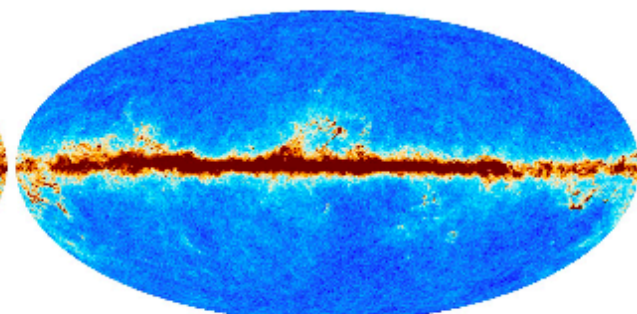
100 GHz



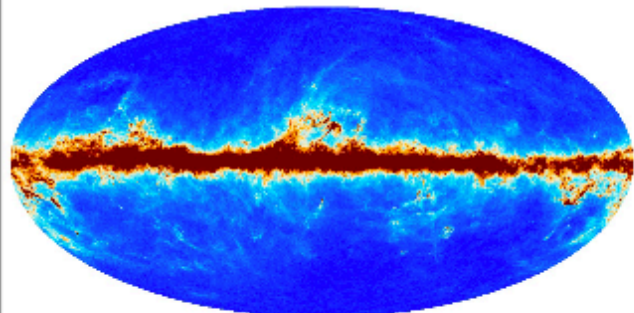
143 GHz



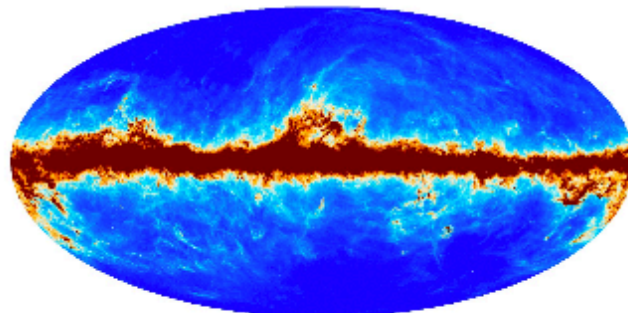
217 GHz



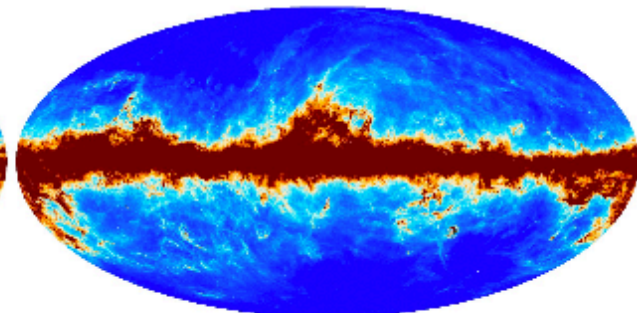
353 GHz



545 GHz

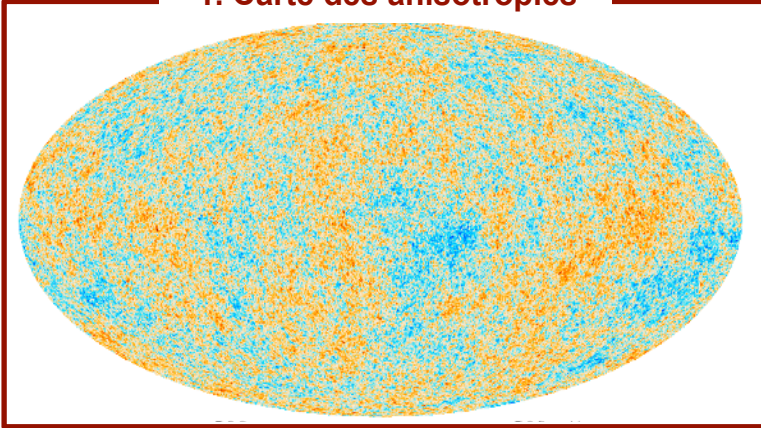


857 GHz



CMB : analyse en température

1. Carte des anisotropies



2. Décomposition en harmoniques sphériques

$$\frac{\Delta T}{T} = \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m}^T Y_{\ell m}$$
$$a_{\ell m}^T = \int \frac{\Delta T}{T}(\vec{n}) Y_{\ell m}^*(\vec{n}) d\vec{n}$$

4. Estimation des paramètres cosmologiques

Spectre est sensible aux param. cosmologiques

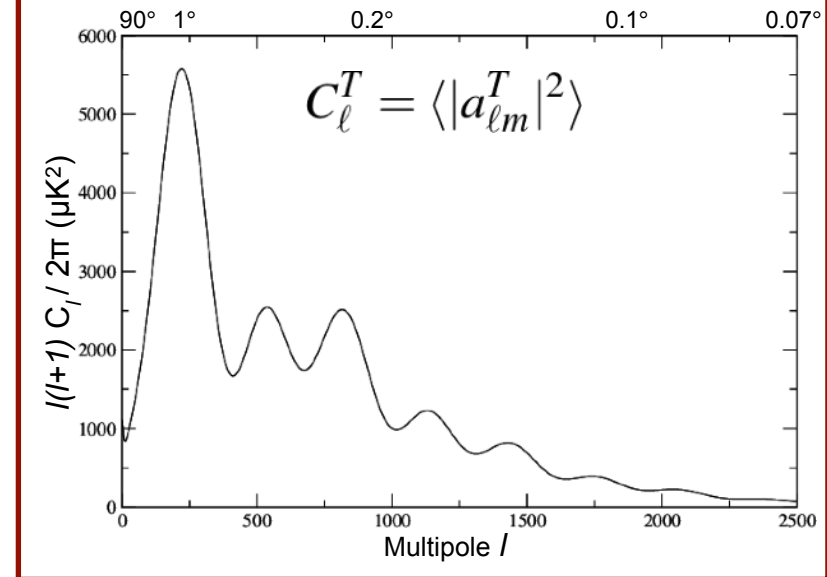
Courbure Ω_{κ}

Matière Ω_b, Ω_c

Réionisation τ

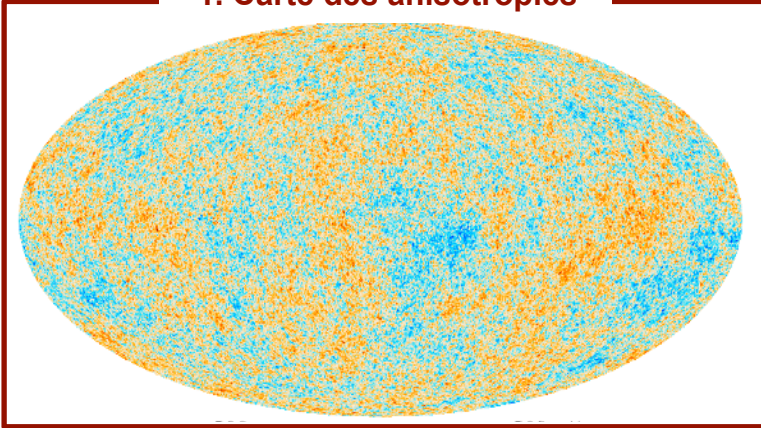
Spectre perturb. primordial $P(k) = A_s \left(\frac{k}{k_0}\right)^{n_s-1}$

3. Spectre de puissance



CMB : analyse en température

1. Carte des anisotropies



2. Décomposition en harmoniques sphériques

$$\frac{\Delta T}{T} = \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m}^T Y_{\ell m}$$
$$a_{\ell m}^T = \int \frac{\Delta T}{T}(\vec{n}) Y_{\ell m}^*(\vec{n}) d\vec{n}$$

4. Estimation des paramètres cosmologiques

Spectre est sensible aux param. cosmologiques

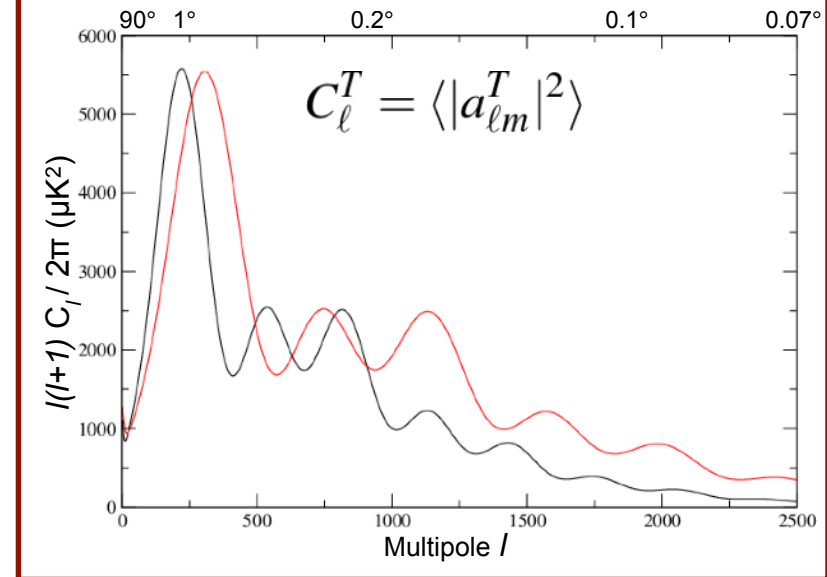
Courbure Ω_{κ}

Matière Ω_b, Ω_c

Réionisation τ

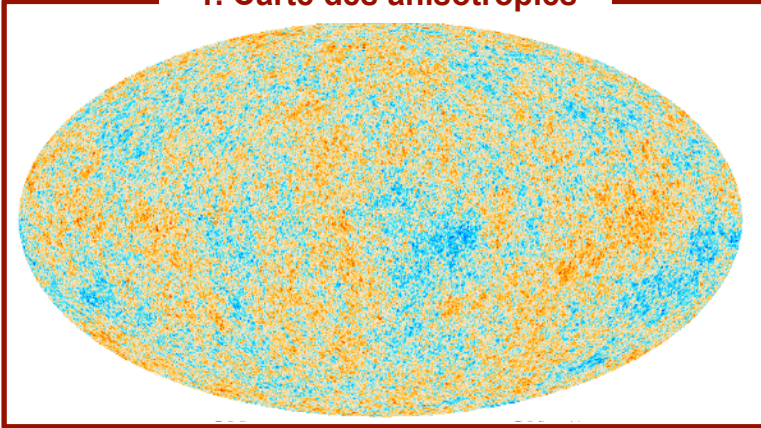
Spectre perturb. primordial $P(k) = A_s \left(\frac{k}{k_0}\right)^{n_s-1}$

3. Spectre de puissance



CMB : analyse en température

1. Carte des anisotropies



2. Décomposition en harmoniques sphériques

$$\frac{\Delta T}{T} = \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m}^T Y_{\ell m}$$
$$a_{\ell m}^T = \int \frac{\Delta T}{T}(\vec{n}) Y_{\ell m}^*(\vec{n}) d\vec{n}$$

4. Estimation des paramètres cosmologiques

Spectre est sensible aux param. cosmologiques

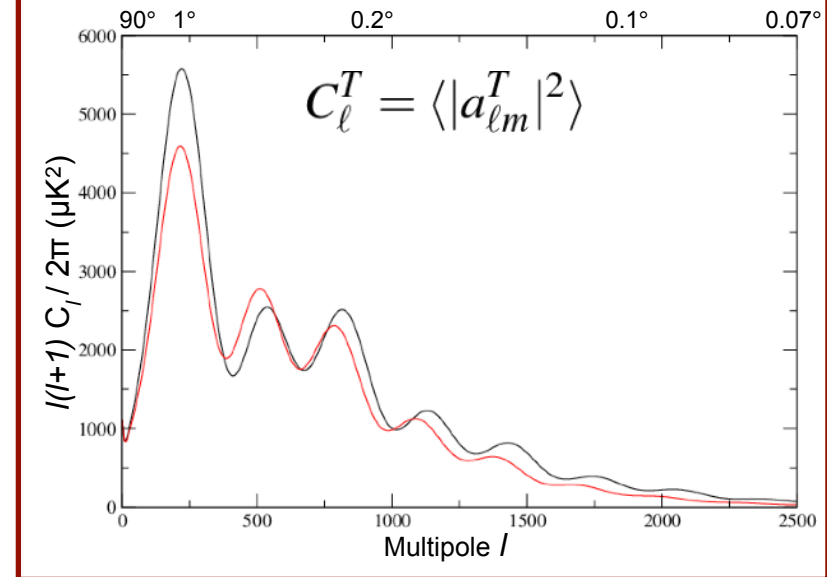
Courbure Ω_{κ}

Matière Ω_b, Ω_c

Réionisation τ

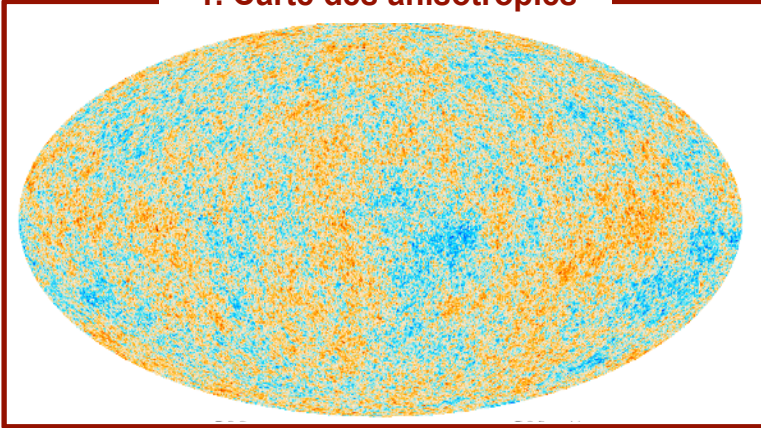
Spectre perturb. primordial $P(k) = A_s \left(\frac{k}{k_0}\right)^{n_s-1}$

3. Spectre de puissance



CMB : analyse en température

1. Carte des anisotropies



2. Décomposition en harmoniques sphériques

$$\frac{\Delta T}{T} = \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m}^T Y_{\ell m}$$
$$a_{\ell m}^T = \int \frac{\Delta T}{T}(\vec{n}) Y_{\ell m}^*(\vec{n}) d\vec{n}$$

4. Estimation des paramètres cosmologiques

Spectre est sensible aux param. cosmologiques

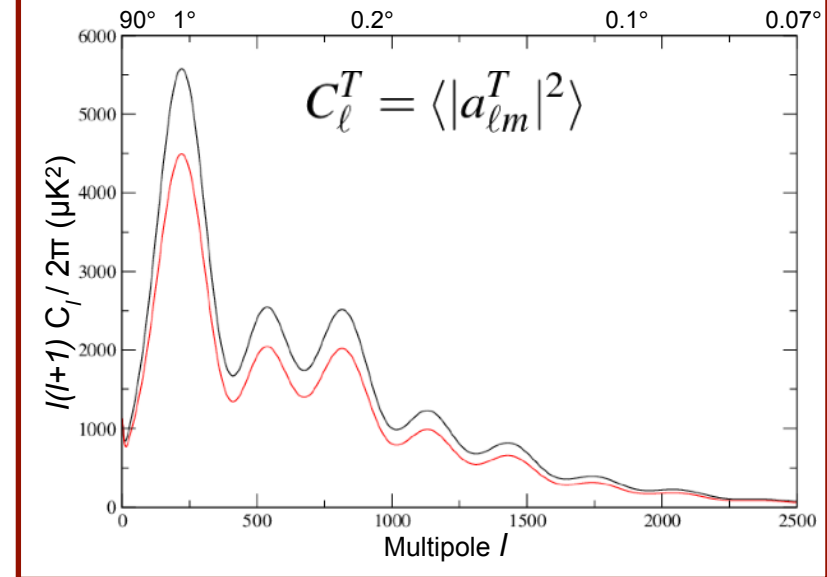
Courbure Ω_{κ}

Matière Ω_b, Ω_c

Réionisation τ

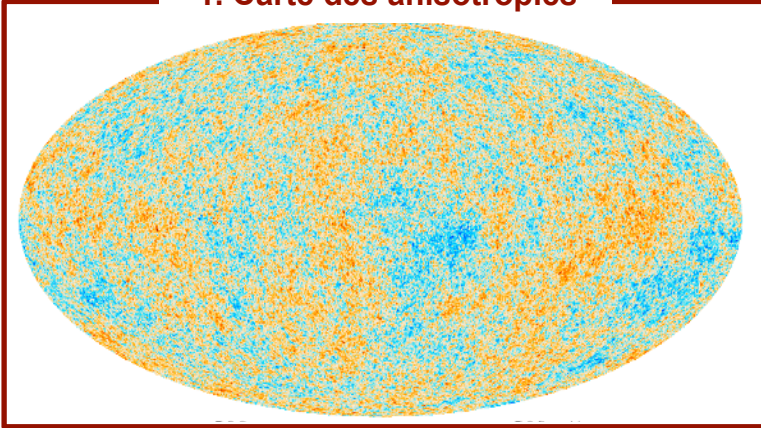
Spectre perturb. primordial $P(k) = A_s \left(\frac{k}{k_0}\right)^{n_s-1}$

3. Spectre de puissance



CMB : analyse en température

1. Carte des anisotropies



2. Décomposition en harmoniques sphériques

$$\frac{\Delta T}{T} = \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m}^T Y_{\ell m}$$
$$a_{\ell m}^T = \int \frac{\Delta T}{T}(\vec{n}) Y_{\ell m}^*(\vec{n}) d\vec{n}$$

4. Estimation des paramètres cosmologiques

Spectre est sensible aux param. cosmologiques

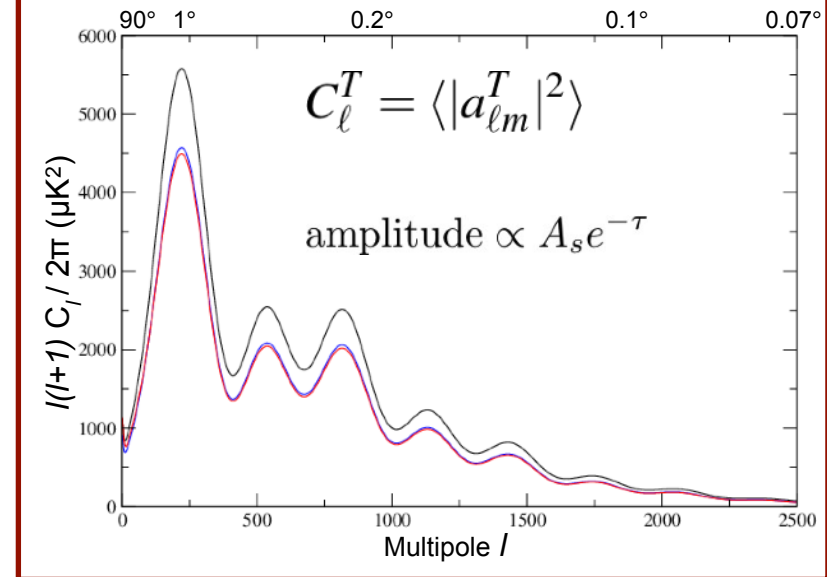
Courbure Ω_{κ}

Matière Ω_b, Ω_c

Réionisation τ

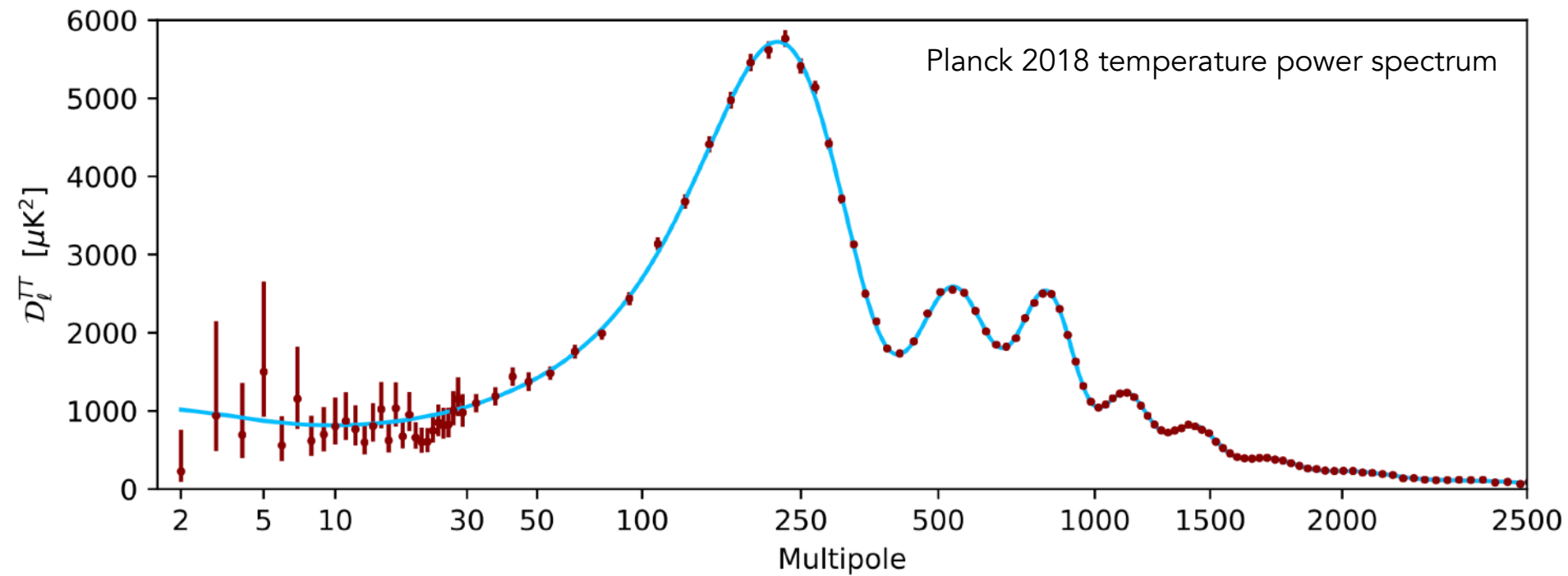
Spectre perturb. primordial $P(k) = A_s \left(\frac{k}{k_0}\right)^{n_s-1}$

3. Spectre de puissance



Dégénérescence entre paramètres peuvent être levées avec de l'information supplémentaire: polarisation, lentillage gravitationnelle

CMB : analyse en température



D'autres propriétés importantes du CMB

La polarisation du CMB

Produite par la **diffusion Thomson** en présence d'anisotropies quadripolaires

- over/underdensities
- ondes gravitationnelles

Impriée dans le CMB à 2 époques

- recombinaison (dernière diffusion)
- réionisation (nouveaux e- libres)

Permet de lever les dégénérescences (e.g $A_s - \tau$)

Modes B primordiaux (pas encore détectés) - signature of inflation !

D'autres propriétés importantes du CMB

La polarisation du CMB

Produite par la **diffusion Thomson** en présence d'anisotropies quadrupolaires

- over/underdensities
- ondes gravitationnelles

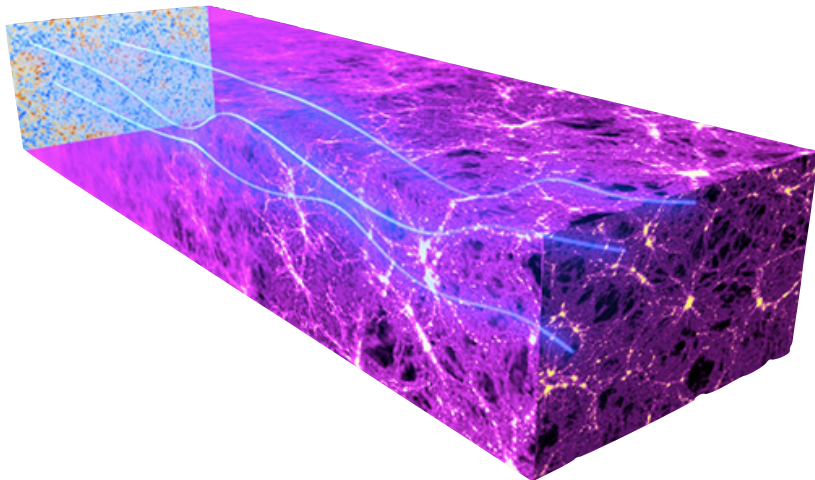
Impimée dans le CMB à 2 époques

- recombinaison (dernière diffusion)
- réionisation (nouveaux e- libres)

Permet de lever les dégénérescences (e.g $A_s - \tau$)

Modes B primordiaux (pas encore détectés) - signature of inflation !

Lentillage du CMB



Les structures à grande échelle le long de la ligne de visée agissent comme des lentilles :

- Déformation de l'image en température
- Transformation des modes E en modes B en polarisation (et vice-versa)

Le lentillage donne de l'information sur la distribution de masse dans l'univers

D'autres propriétés importantes du CMB

La polarisation du CMB

Produite par la **diffusion Thomson** en présence d'anisotropies quadrupolaires

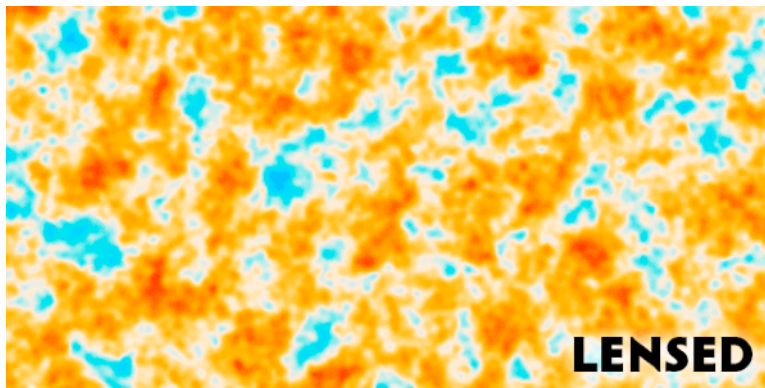
- over/underdensities
- ondes gravitationnelles

Impriée dans le CMB à 2 époques
→ recombinaison (dernière diffusion)
→ réionisation (nouveaux e⁻ libres)

Permet de lever les dégénérescences (e.g $A_s - \tau$)

Modes B primordiaux (pas encore détectés) - signature of inflation !

Lentillage du CMB

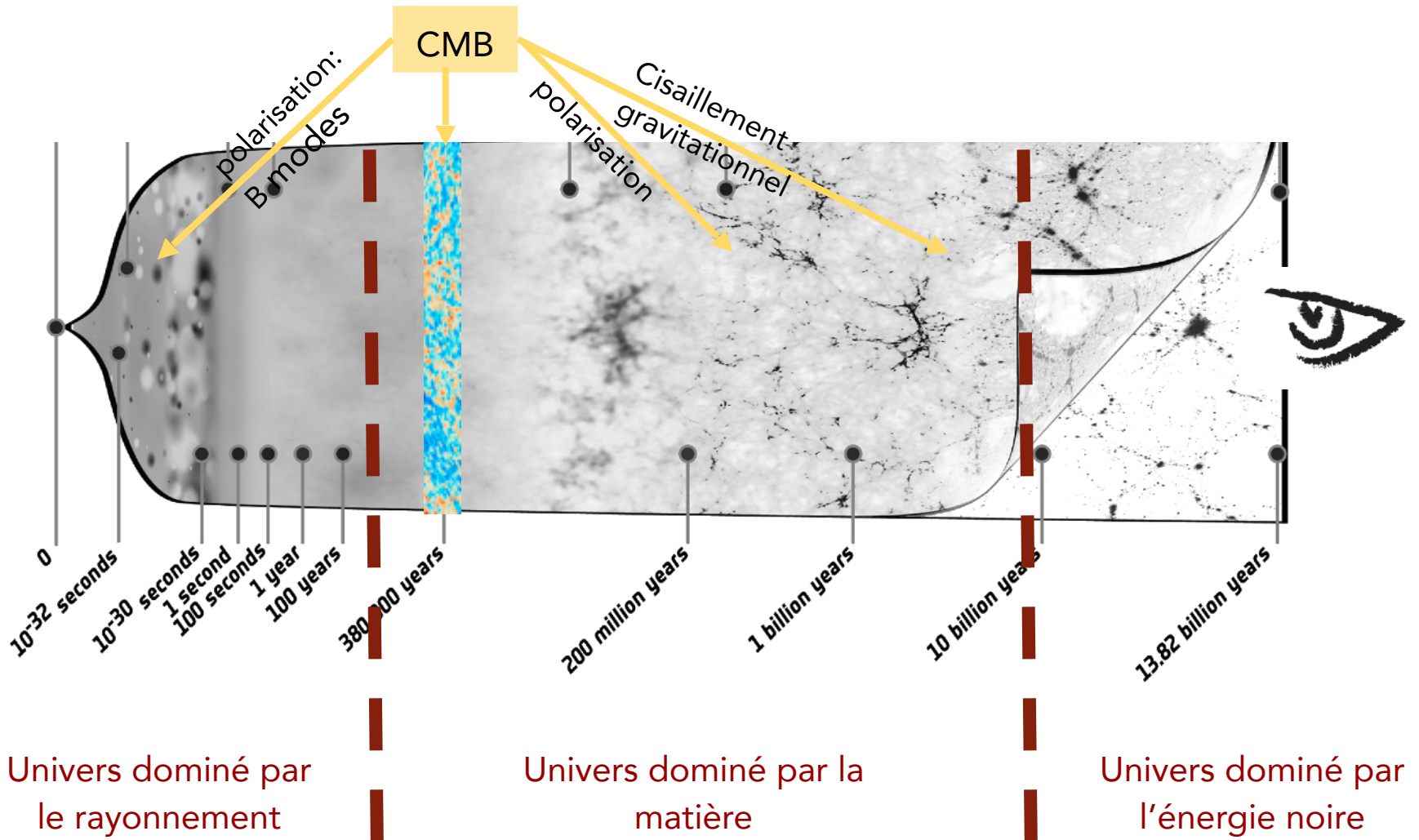


Les structures à grande échelle le long de la ligne de visée agissent comme des lentilles :

- Déformation de l'image en température
- Transformation des modes E en modes B en polarisation (et vice-versa)

Le lentillage donne de l'information sur la distribution de masse dans l'univers

Qu'est ce qui sonde quoi et quand?



Les expériences CMB en cours ou futures

La science du CMB se fait aujourd'hui au sol ; projets menés par les USA

BICEP et SPT (Pôle Sud)



ACT (Atacama Cosmology Telescope, Chili)

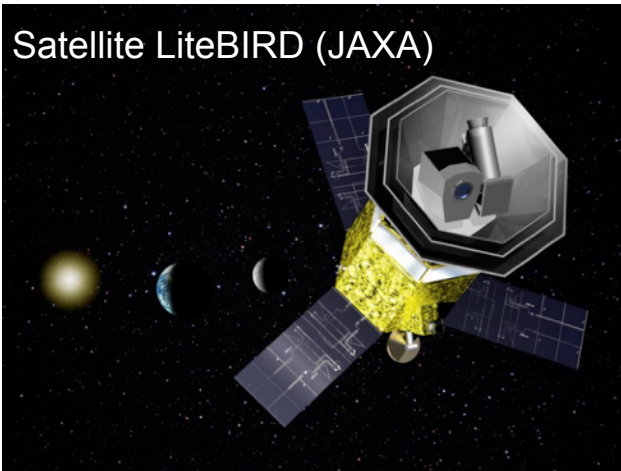


PolarBear (Chili, next to ACT)



D'ici 2030:

Satellite LiteBIRD (JAXA)



Projet CMB-S4 (USA) :

- 21 télescopes entre le Pôle Sud et l'Atacama
- 500 000 détecteurs
- 7 ans d'observation

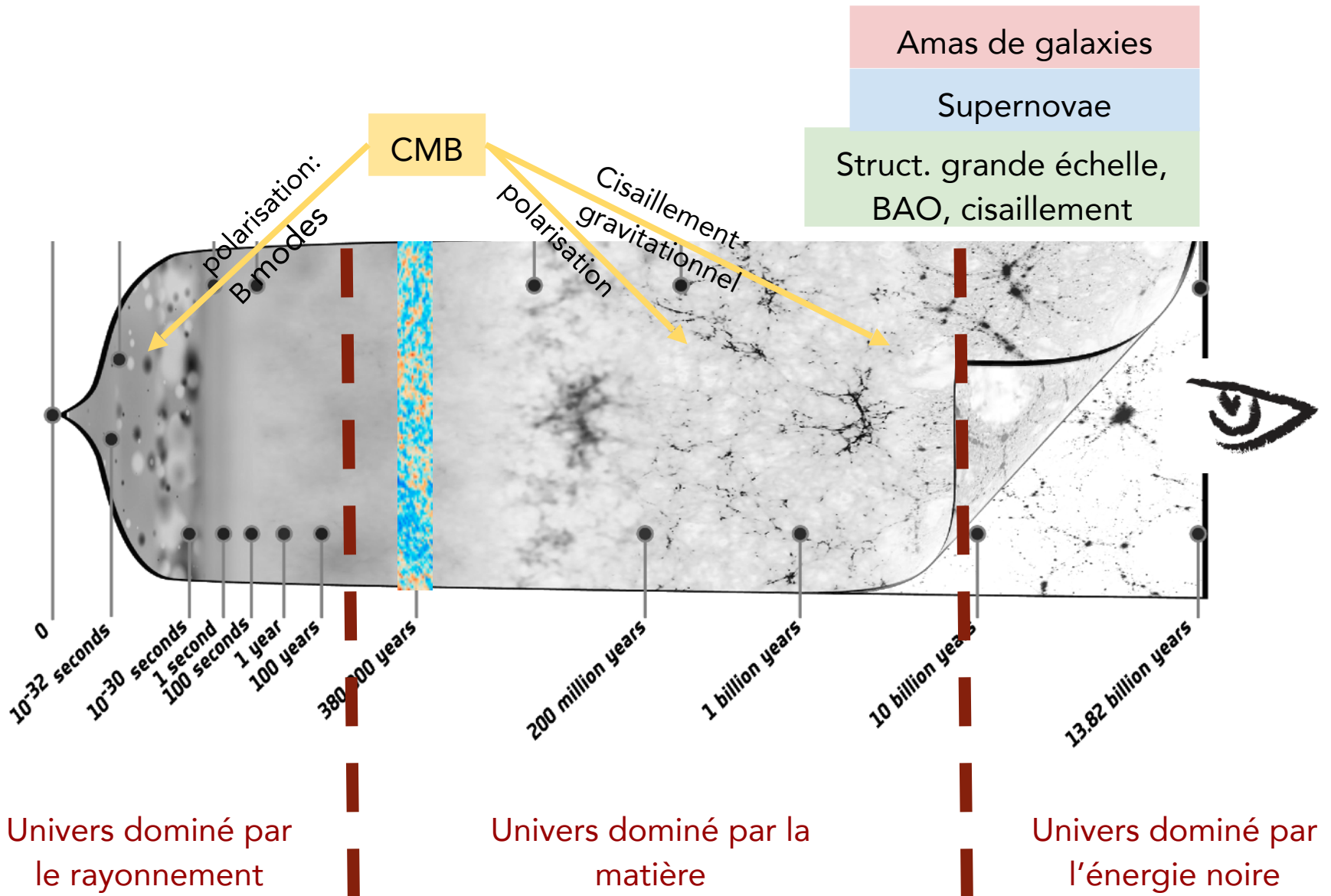
Introduction

- Histoire de l'univers
- Expansion
- Modèle de concordance

Les sondes cosmologiques

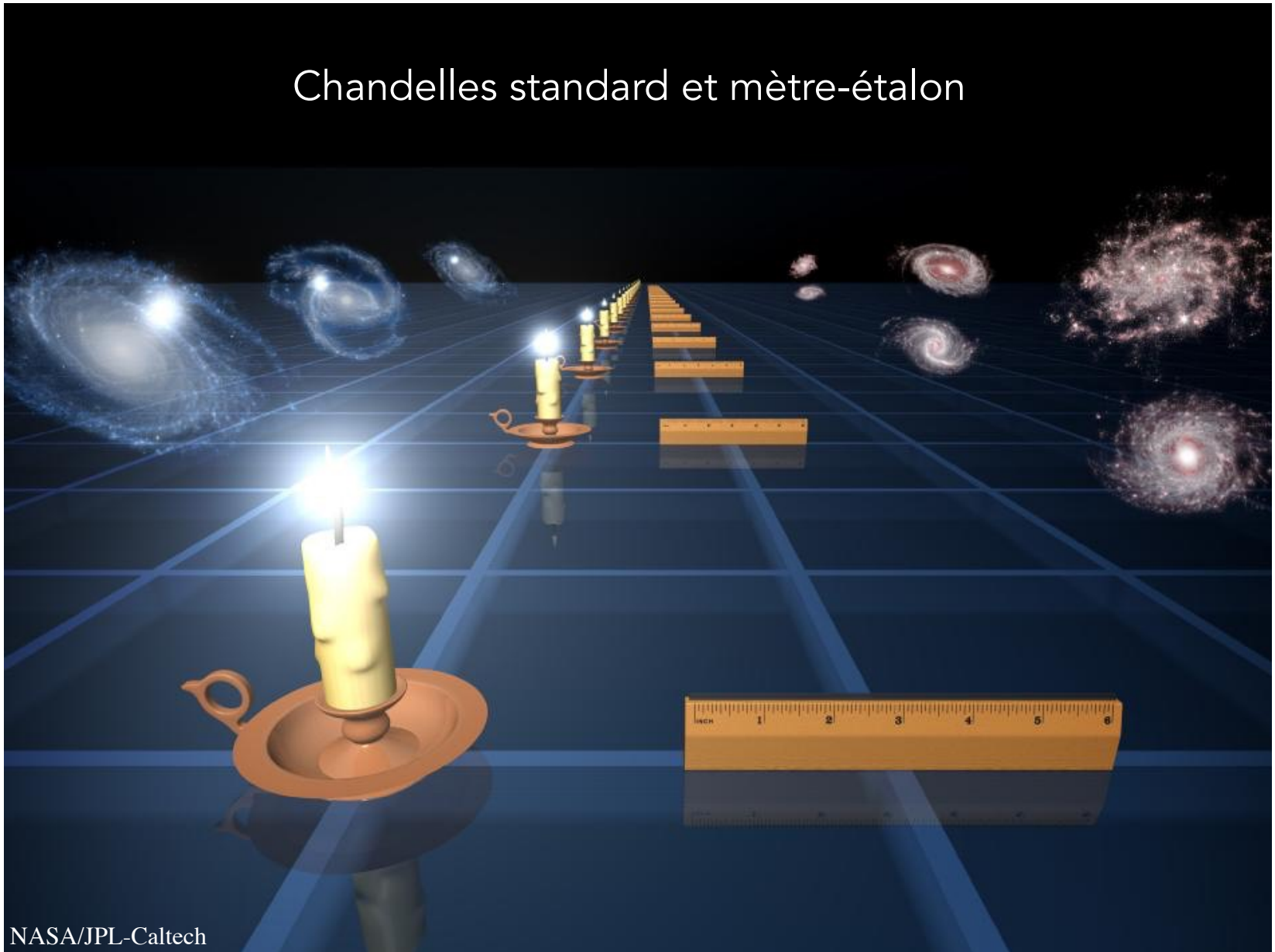
- Univers primordial : Le fond diffus cosmologique (CMB)
- Univers "récent":
 - La distribution des galaxies
 - Les supernovae (SNe)
 - Les autres sondes (en mode rapide)

Qu'est ce qui sonde quoi et quand?



Mesurer l'expansion de l'univers

Chandelles standard et mètre-étalon

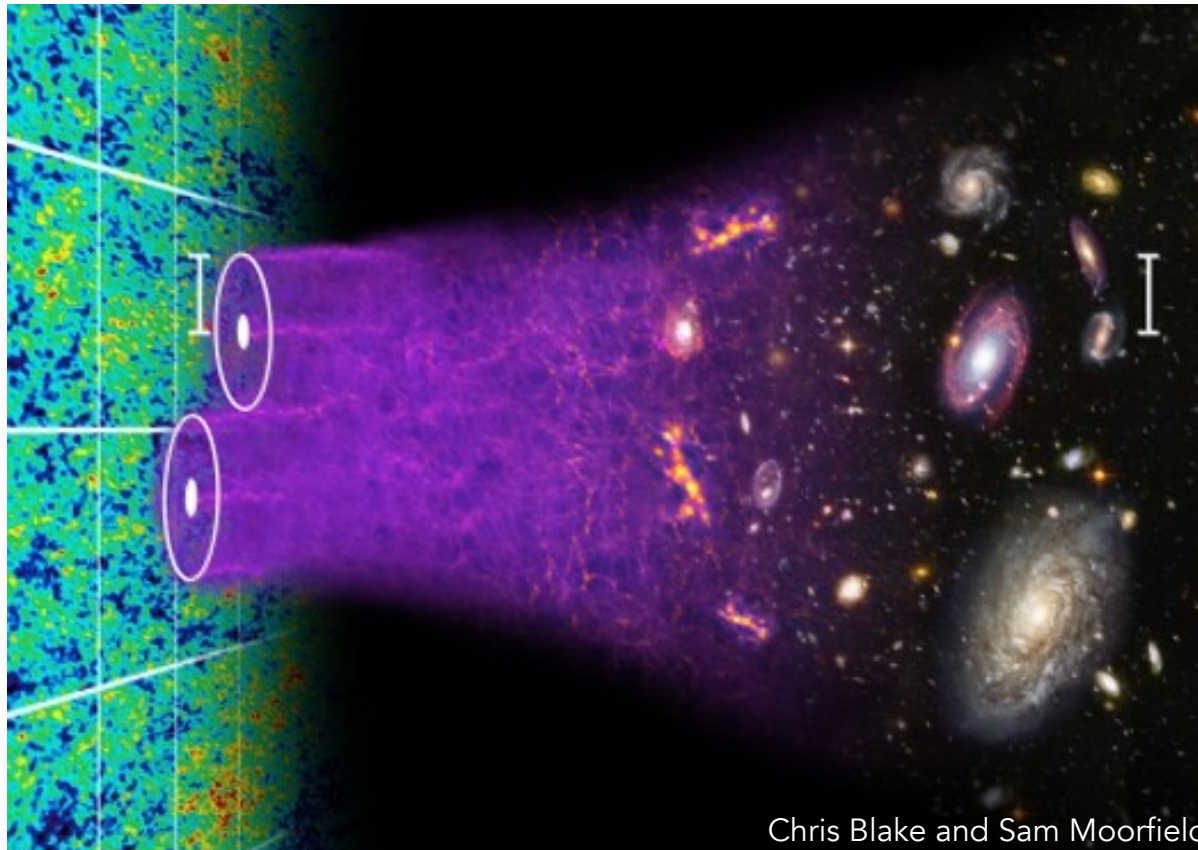


Les oscillations acoustiques de baryons = mètre étalon

BAO = ondes de densité se propageant dans le plasma primordial

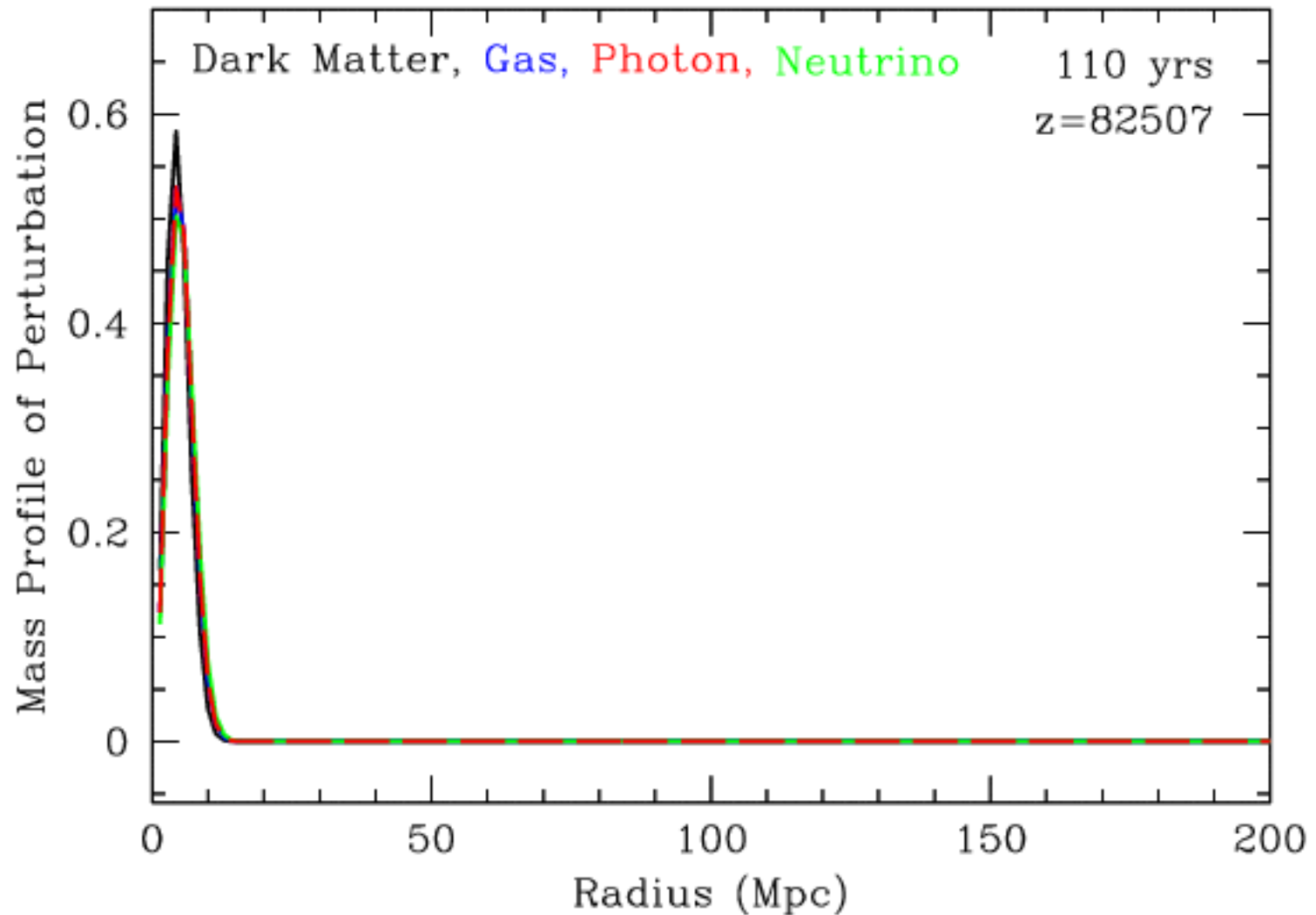
Échelle BAO = distance maximale de propagation d'une onde avant la recombinaison

- Laisse une empreinte dans le CMB
- Laisse une empreinte dans la distribution de matière aujourd'hui



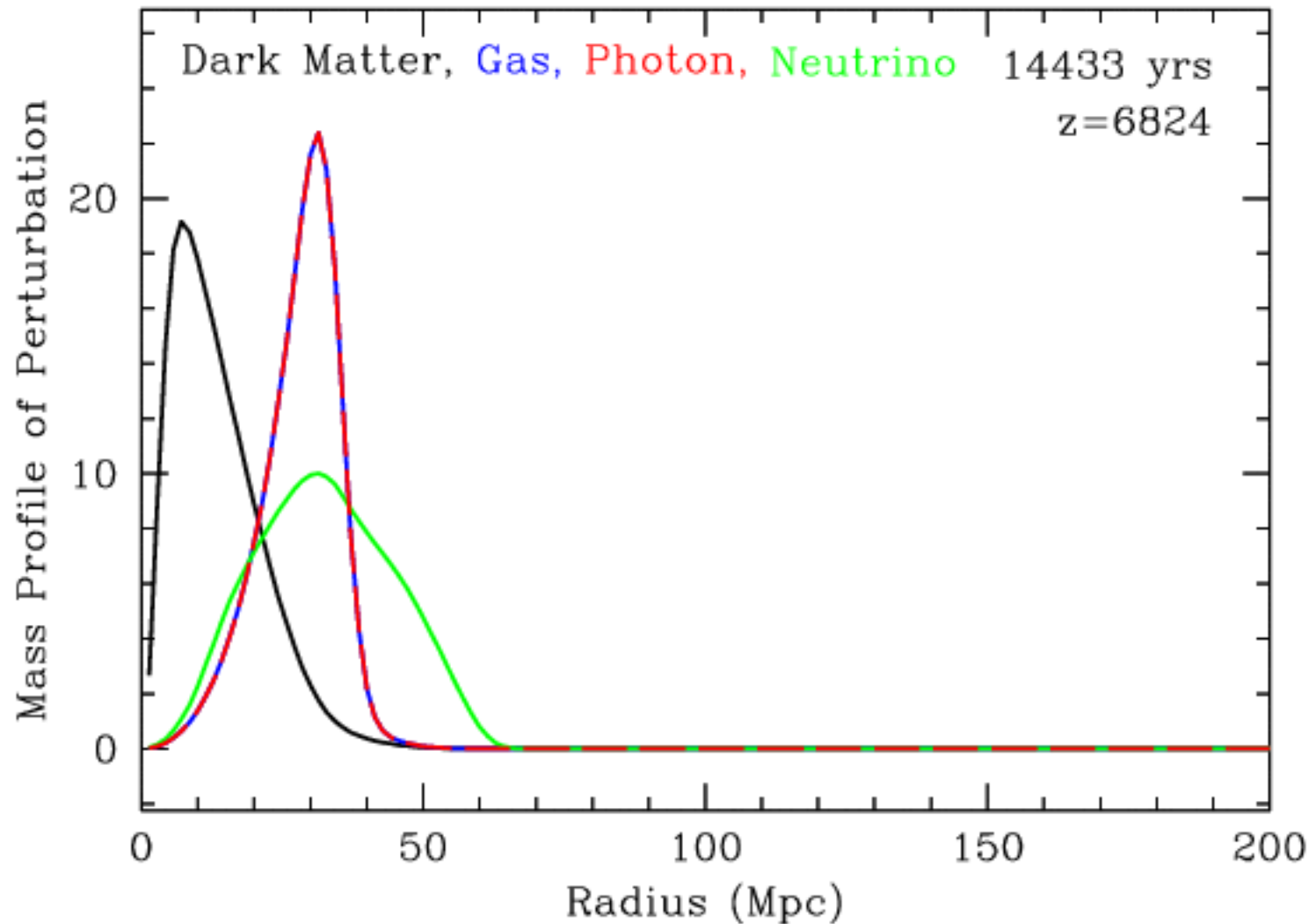
Le mètre-étalon BAO : le principe

https://www.cfa.harvard.edu/~deisenst/acousticpeak/acoustic_physics.html



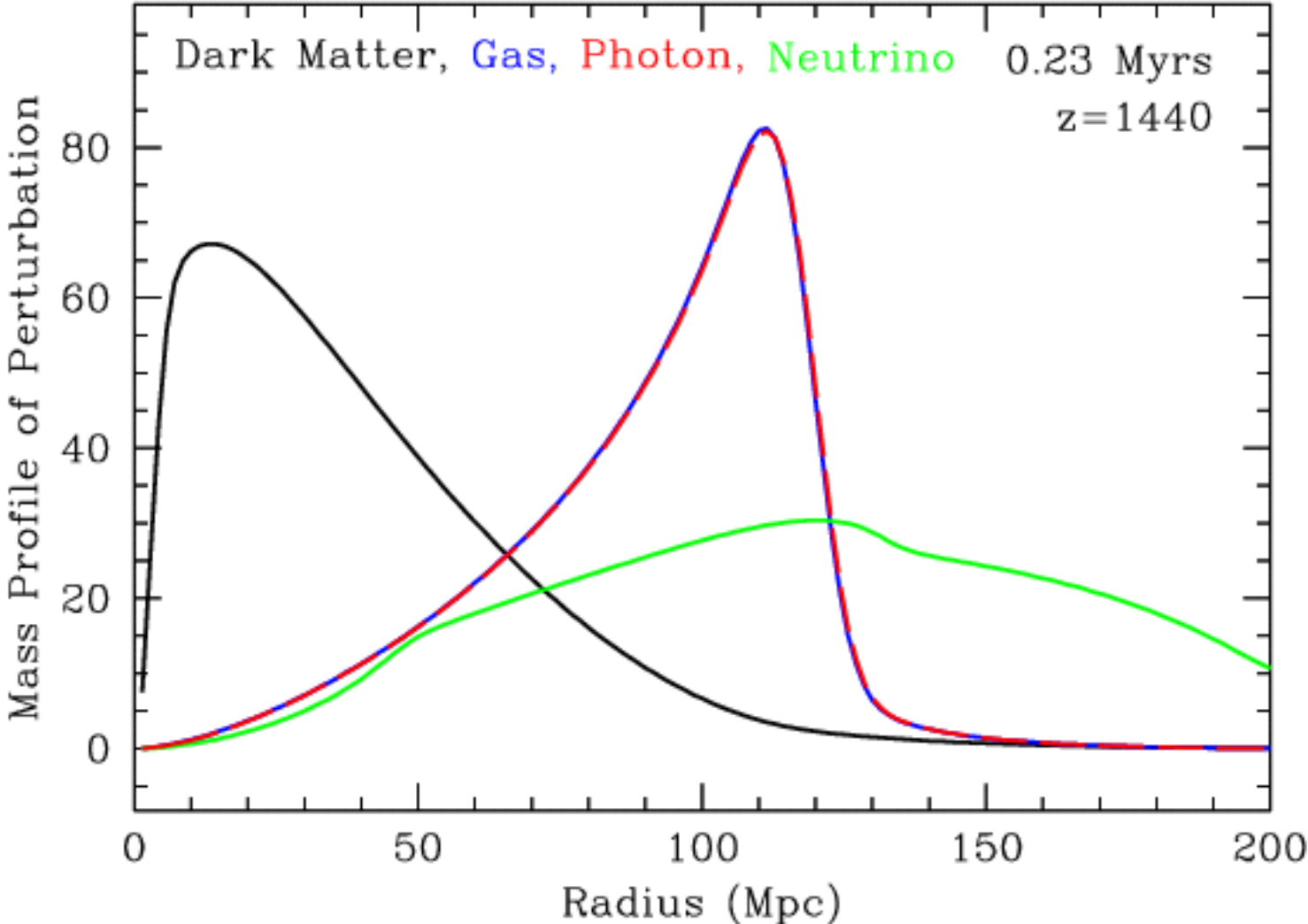
Le mètre-étalon BAO : le principe

https://www.cfa.harvard.edu/~deisenst/acousticpeak/acoustic_physics.html



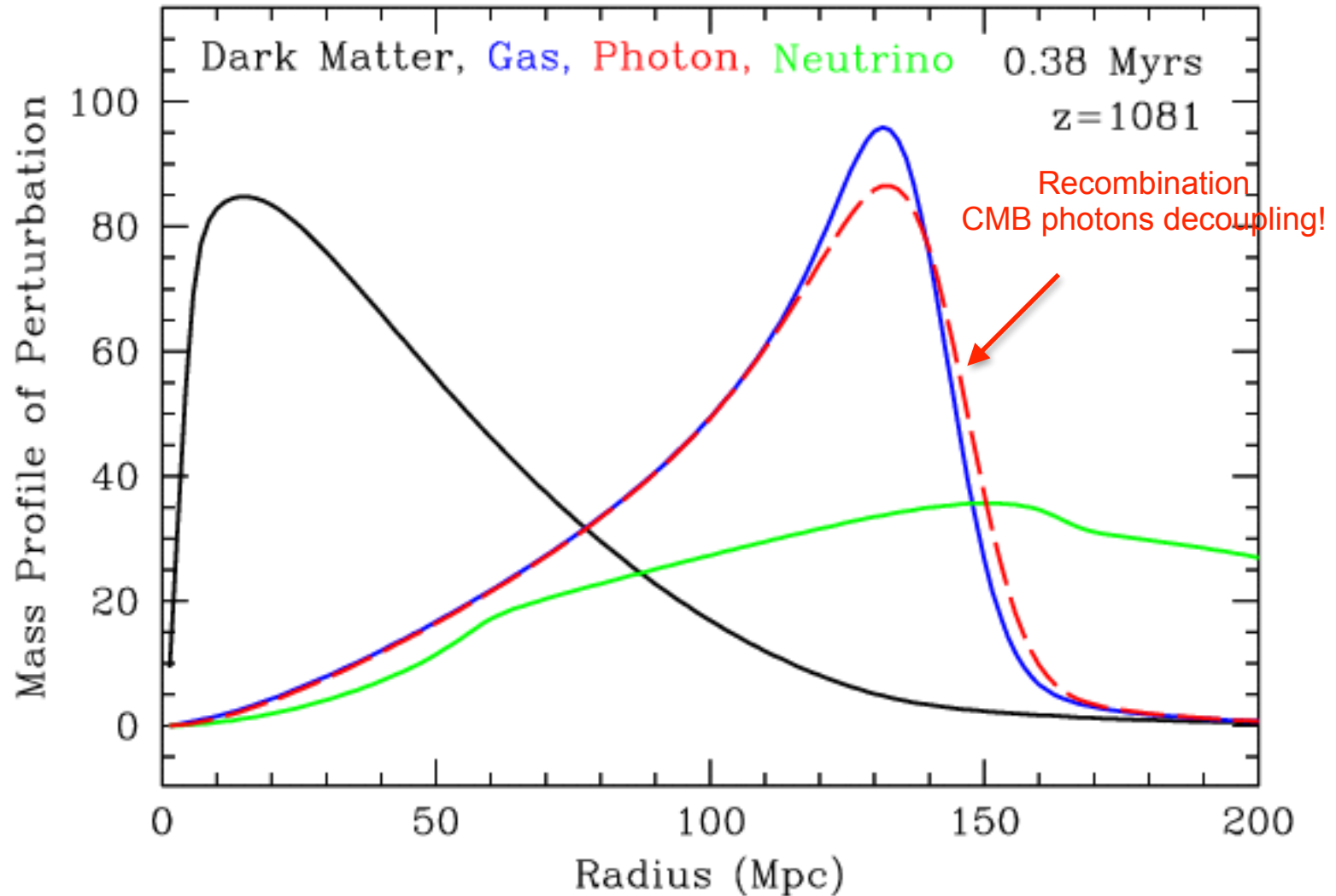
Le mètre-étalon BAO : le principe

https://www.cfa.harvard.edu/~deisenst/acousticpeak/acoustic_physics.html

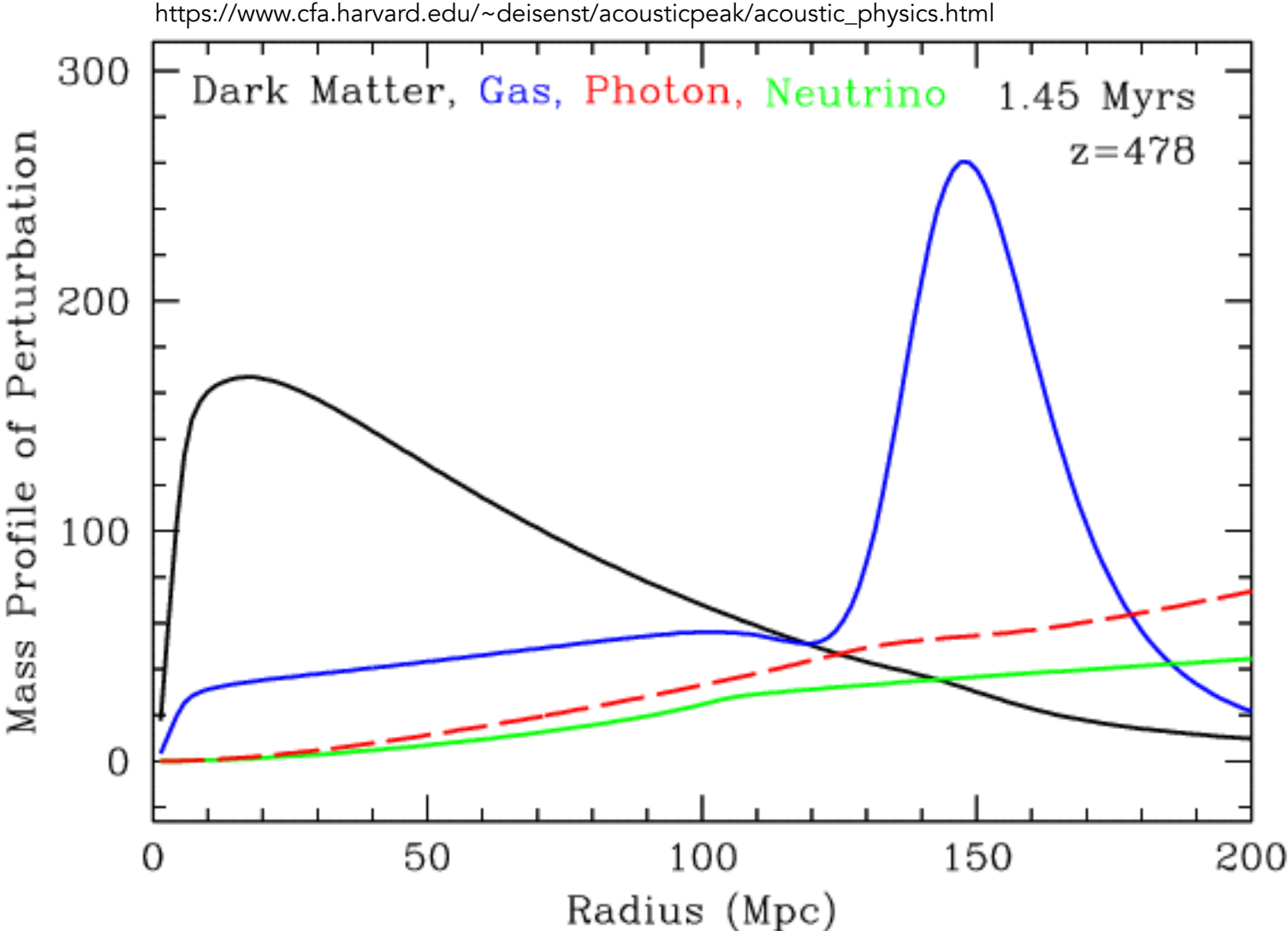


Le mètre-étalon BAO : le principe

https://www.cfa.harvard.edu/~deisenst/acousticpeak/acoustic_physics.html

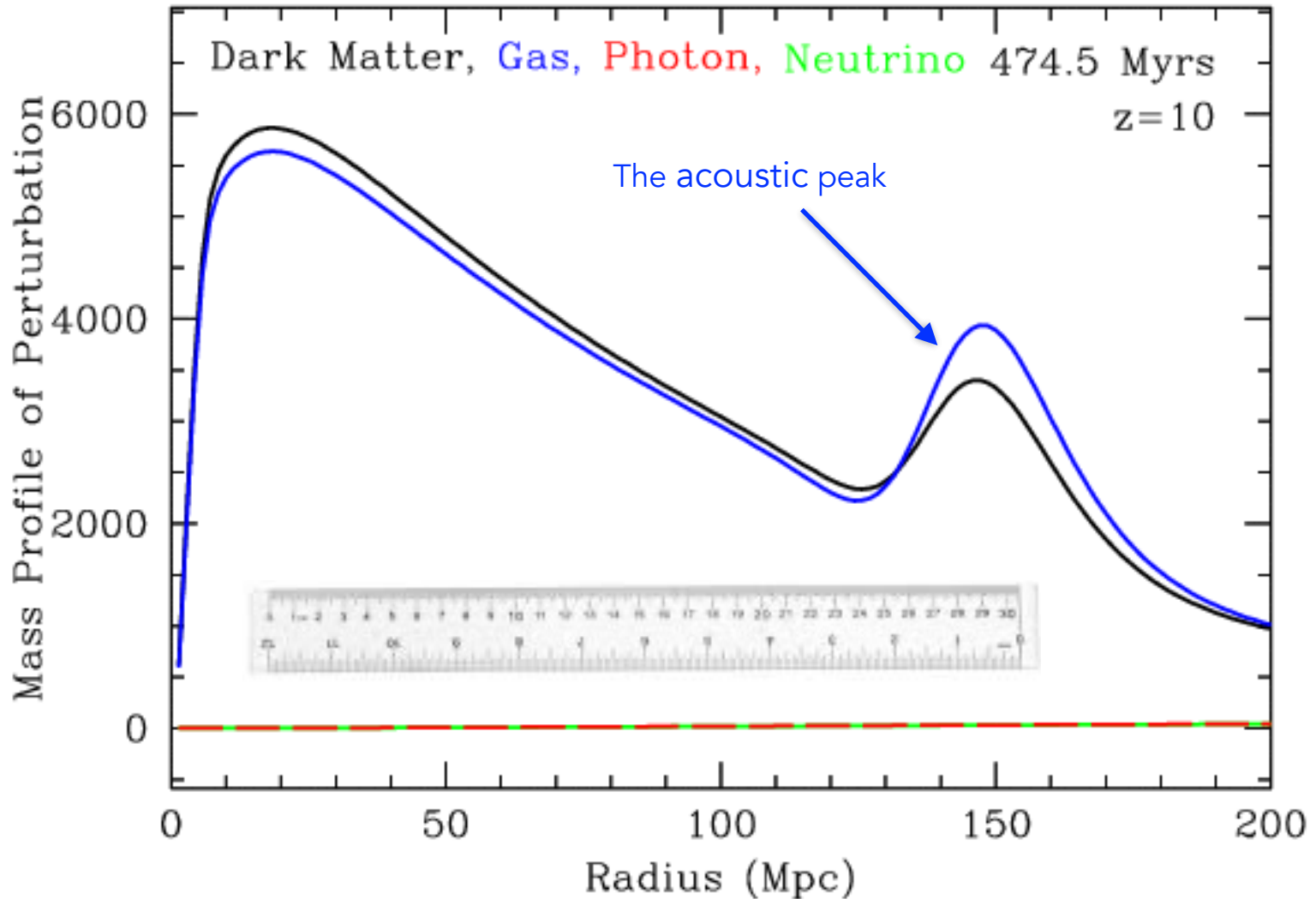


Le mètre-étalon BAO : le principe



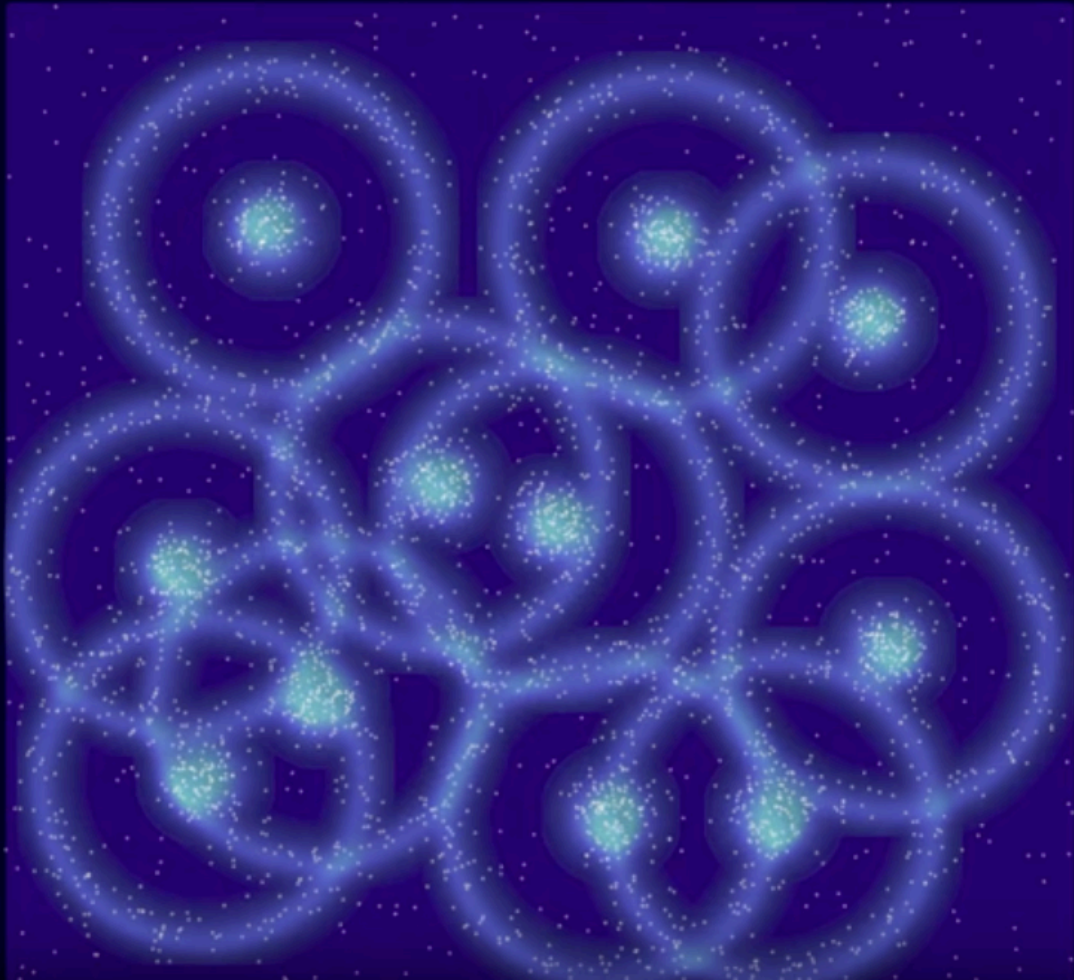
Le mètre-étalon BAO : le principe

https://www.cfa.harvard.edu/~deisenst/acousticpeak/acoustic_physics.html



Le mètre-étalon BAO : le principe

CAASTRO project



0

50

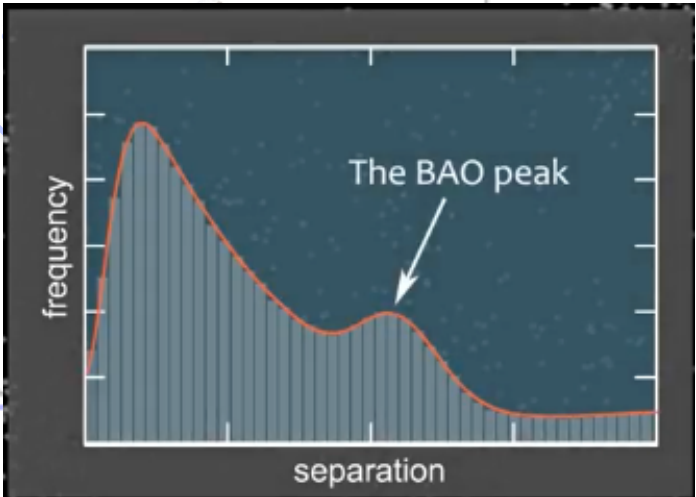
100

Radius (Mpc)

stic_physics.html

neutrino 474.5 Myrs

$z=10$



frequency

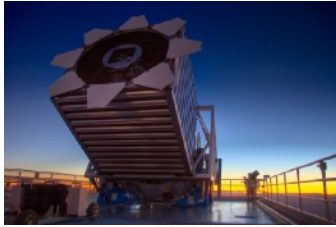
The BAO peak

separation

150

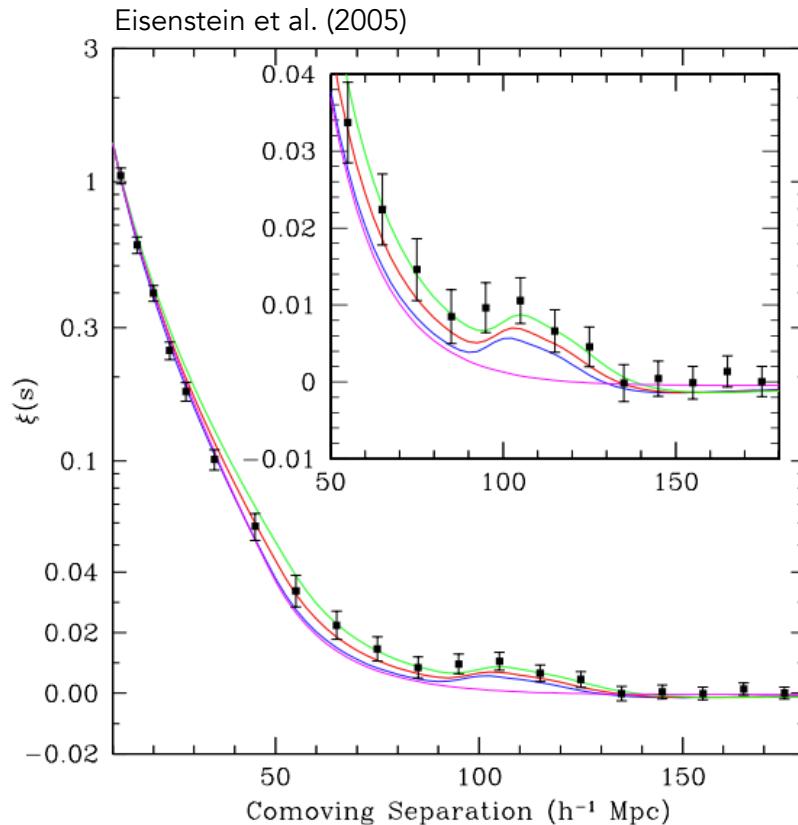
200

BAO : dans les données



Sloan Digital Sky Survey (SDSS, 2005-2020)
BOSS, eBOSS

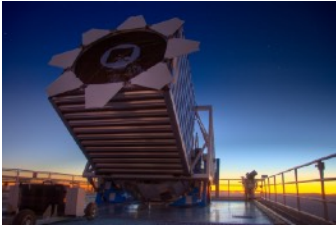
Eisenstein et al. (2005), avec SDSS DR3 - Le pic BAO est là !!



46748 luminous red galaxies

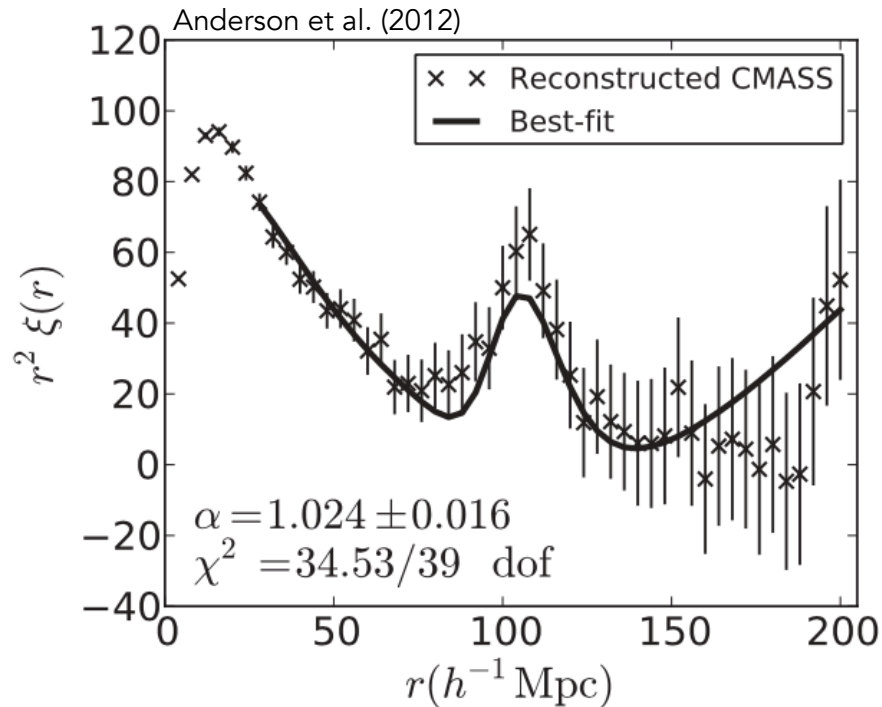
$0.16 < z < 0.47$

BAO : dans les données



Sloan Digital Sky Survey (SDSS, 2005-2020)
BOSS, eBOSS

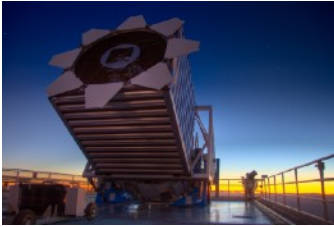
Anderson et al. (2012), avec SDSS DR9



264283 massive galaxies

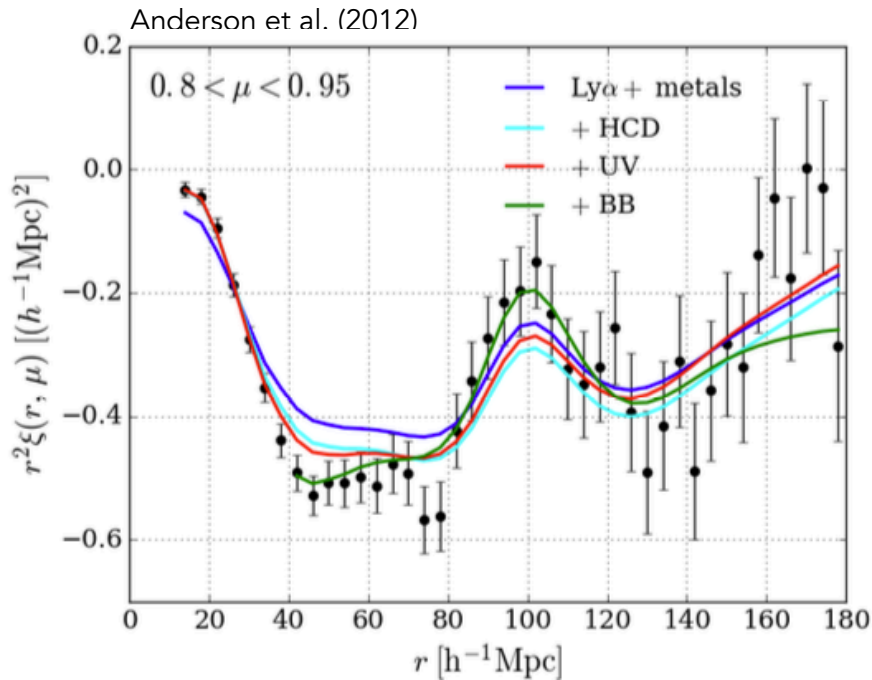
$0.43 < z < 0.7$

BAO : dans les données



Sloan Digital Sky Survey (SDSS, 2005-2020)
BOSS, eBOSS

Bautista et al. (2017), avec SDSS DR12



157783 quasar spectra

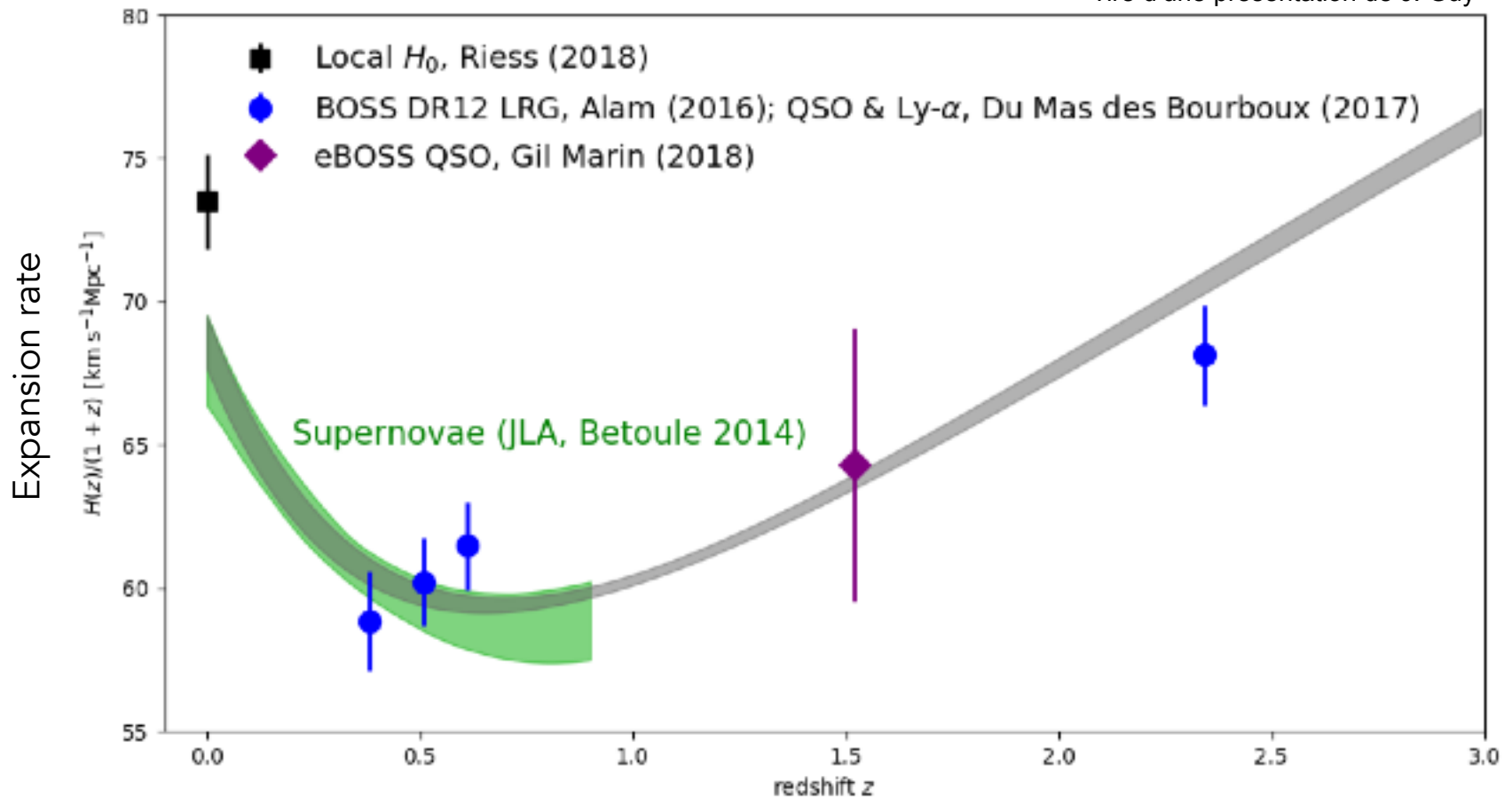
$2.1 < z < 3.5$

BAO - histoire de l'expansion

BAO scale: 2 measurements

- along the line of sight — $H(z)$
- transverse to the line of sight — $D_A(z)$

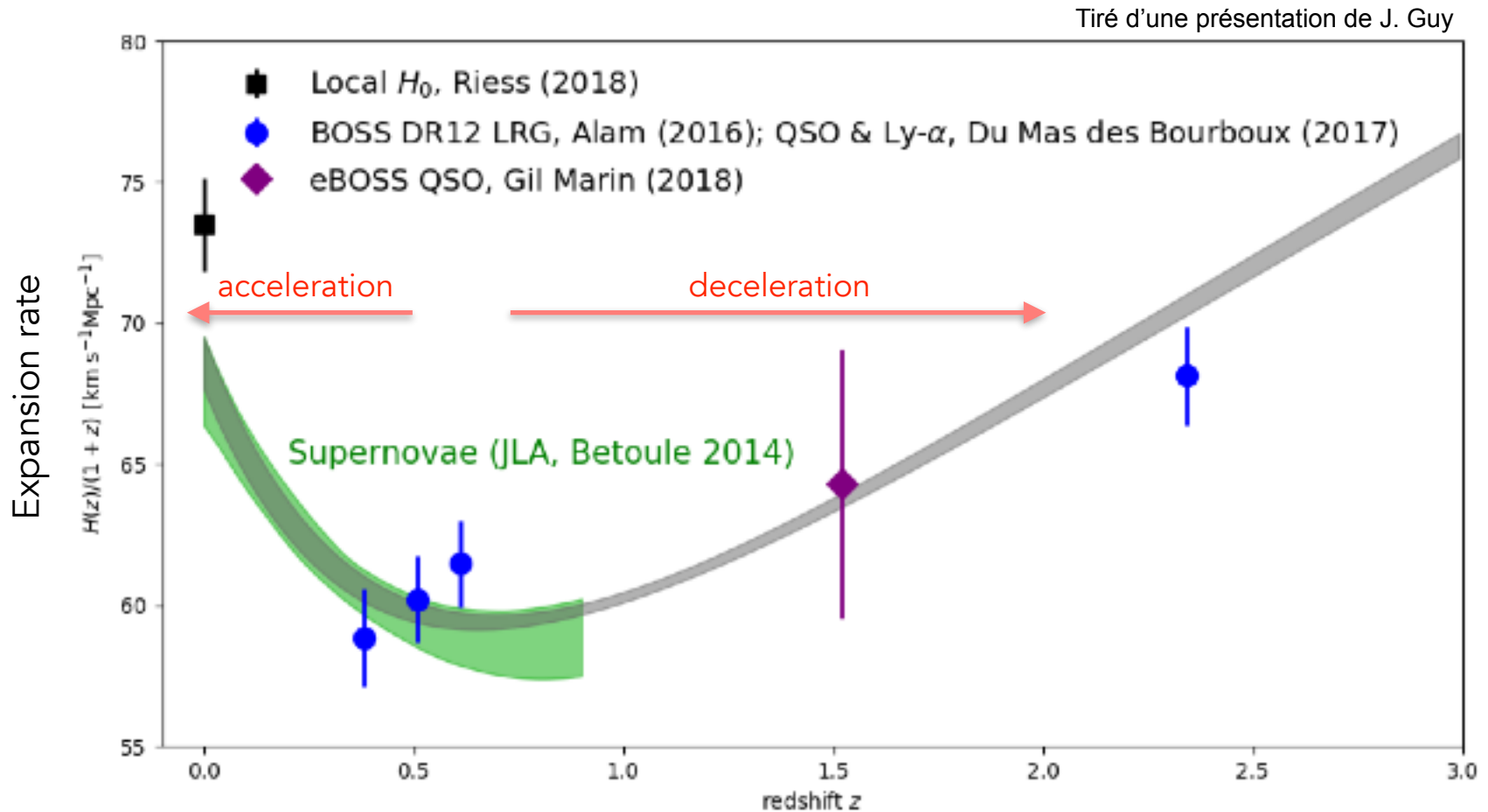
Tiré d'une présentation de J. Guy



BAO - histoire de l'expansion

BAO scale: 2 measurements

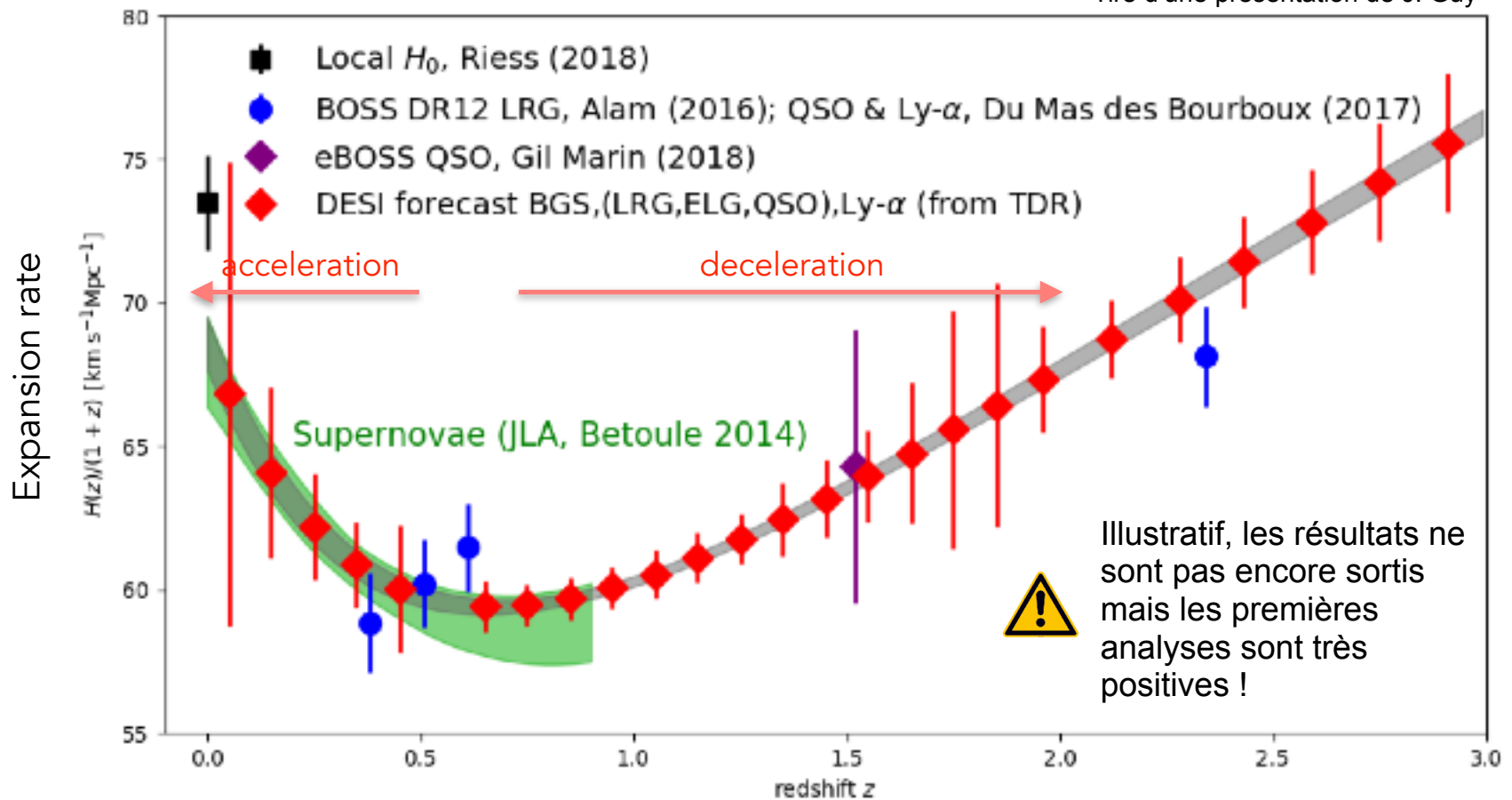
- along the line of sight — $H(z)$
- transverse to the line of sight — $D_A(z)$



BAO - histoire de l'expansion avec DESI (on attend les résultats !)



Tiré d'une présentation de J. Guy



Mesurer l'expansion de l'univers

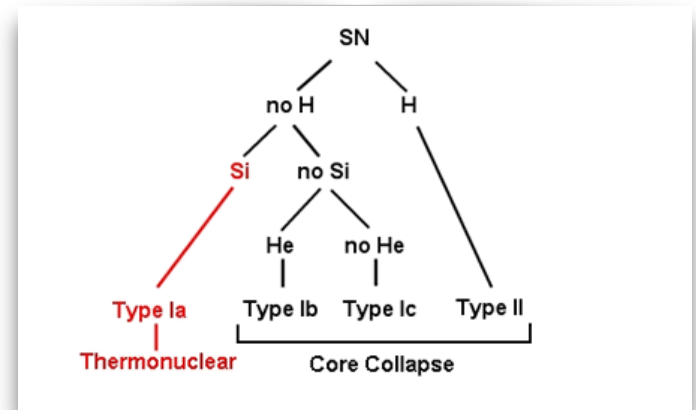
Chandelles standard et mètre-étalon



Supernovae de type 1a comme chandelle standard

Supernova = "explosion d'une étoile"

Luminosité = qq milliards de luminosités solaires



Type Ia supernovae: système binaire avec une naine blanche

- 1 naine blanche accrète de la matière d'une étoile compagnon

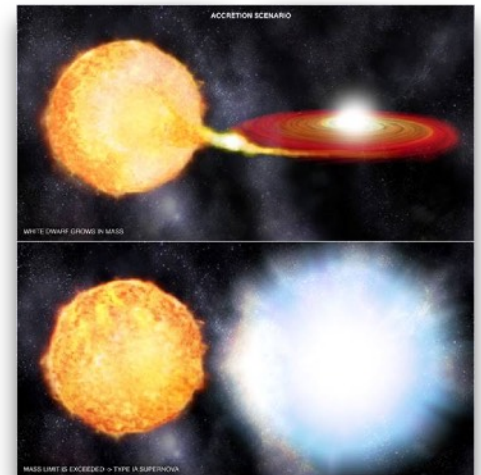
ou

- Fusion de 2 naines blanches

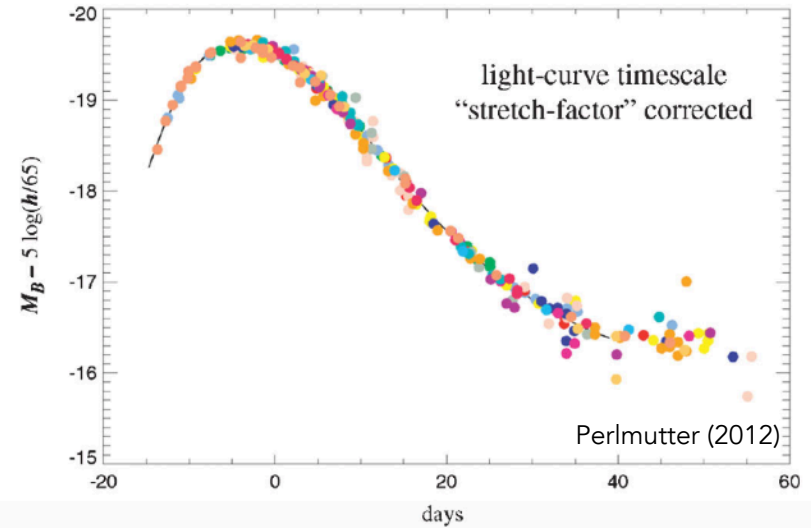
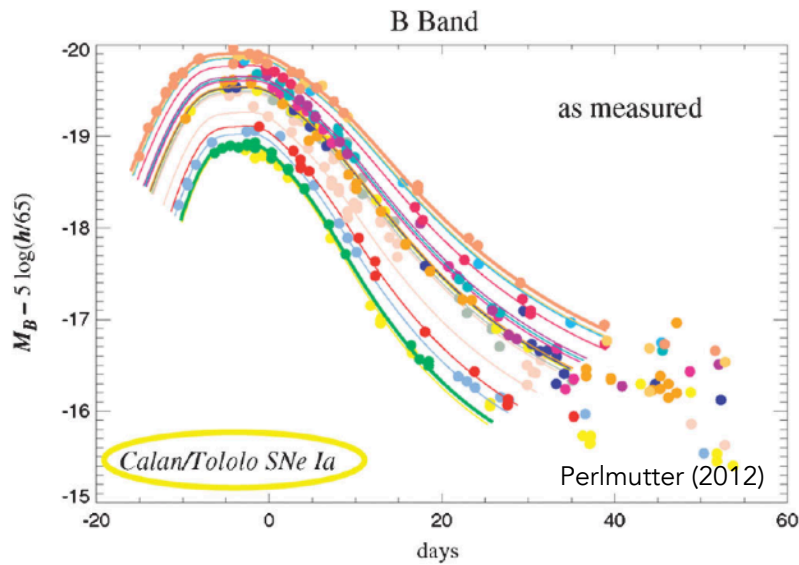
Si la masse de la naine blanche $> 1.4 M_{\text{sun}}$: explosion !

Explosion toujours à la même masse => même luminosité

"standard" candle



Supernovae de type 1a comme chandelle standard(isables)



Standardisation

Flux mesuré

Luminosité connue car
chandelle standard

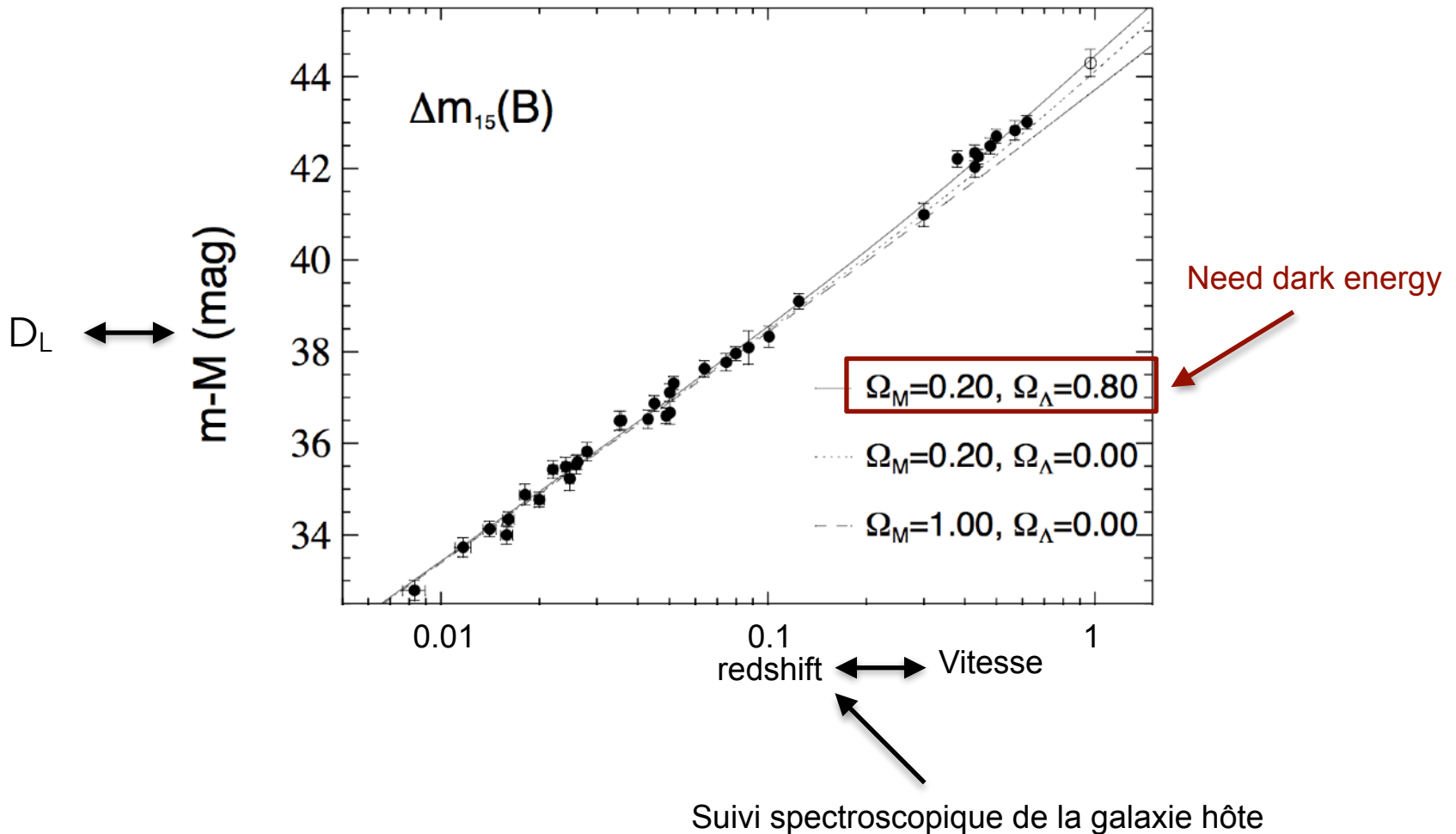
$$F = \frac{L}{4\pi D_L^2}$$

D_L = distance de luminosité = f(cosmology)

Diagramme de Hubble des SN1a - 1998



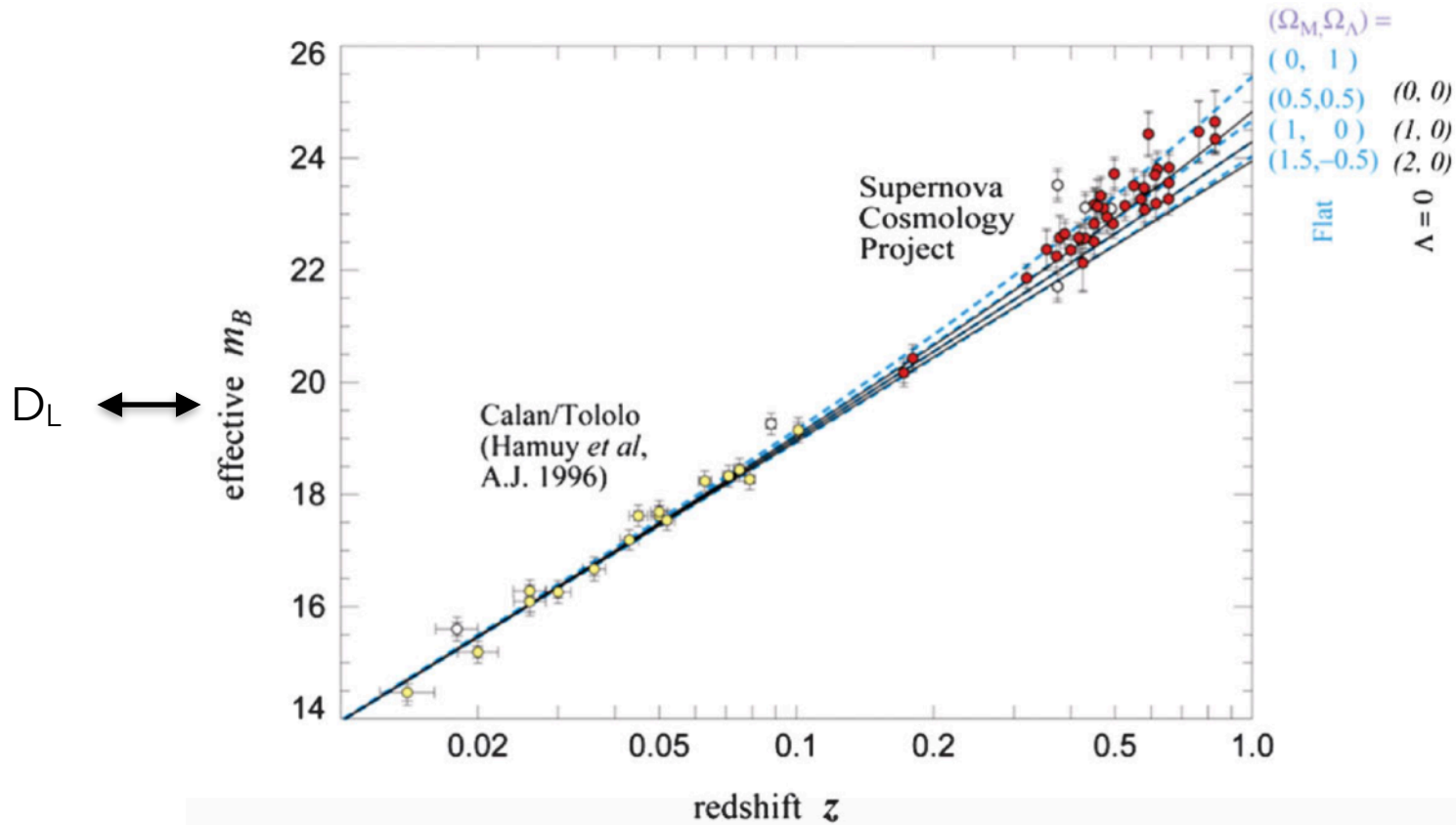
Riess et al. SCP (1998) - 34 supernovae



Type Ia supernovae Hubble diagram - 1998



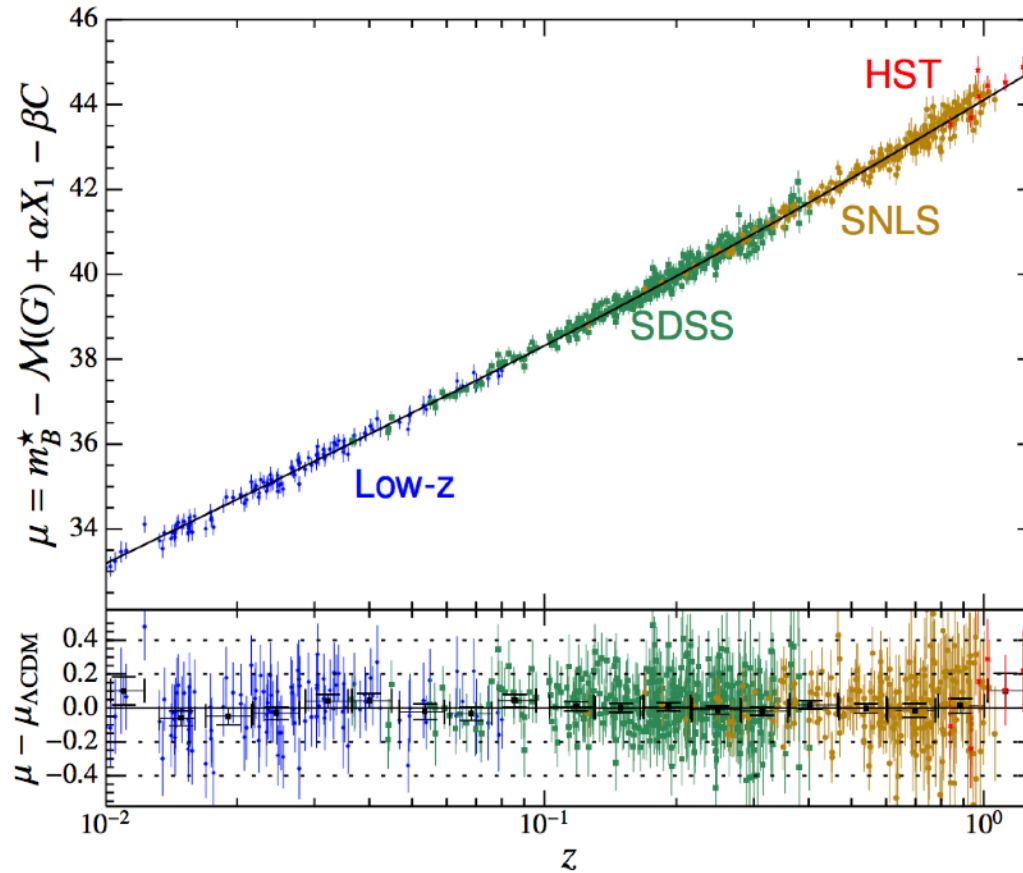
Perlmutter et al. SCP (1998) - 42 supernovae



Type Ia supernovae Hubble diagram - 2014

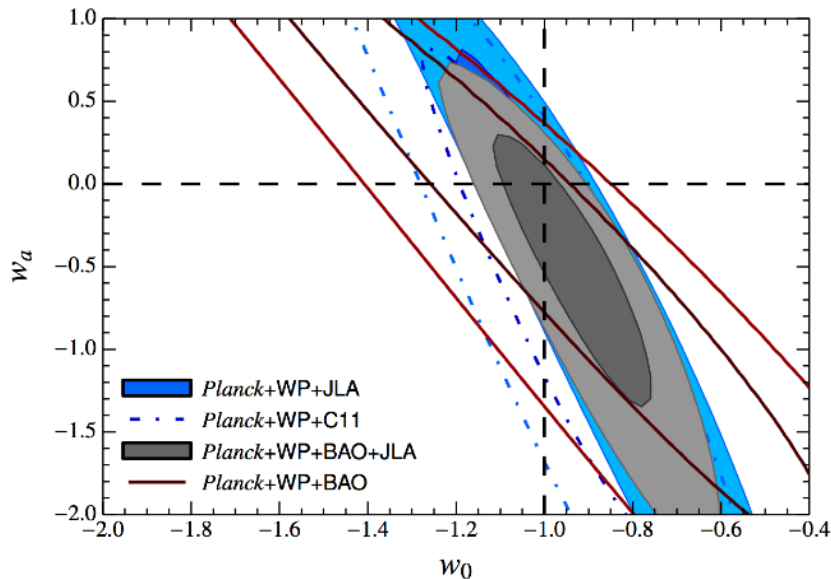
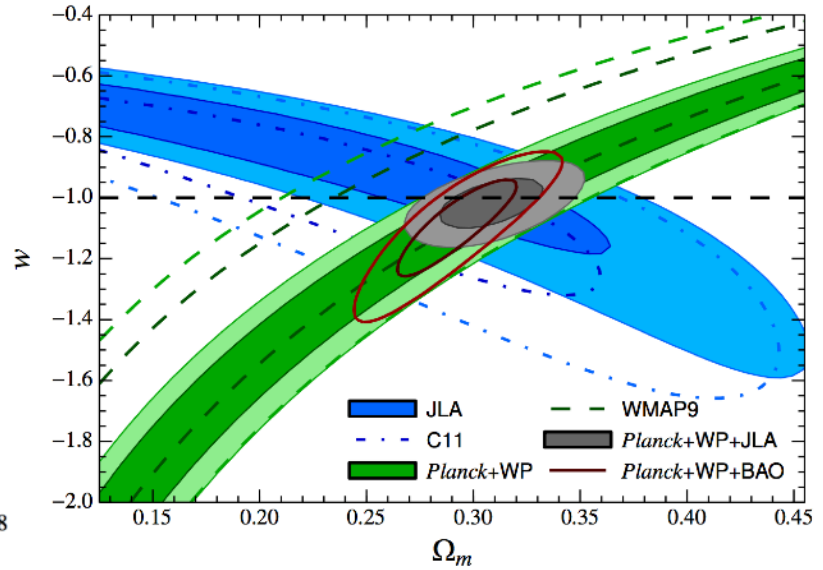
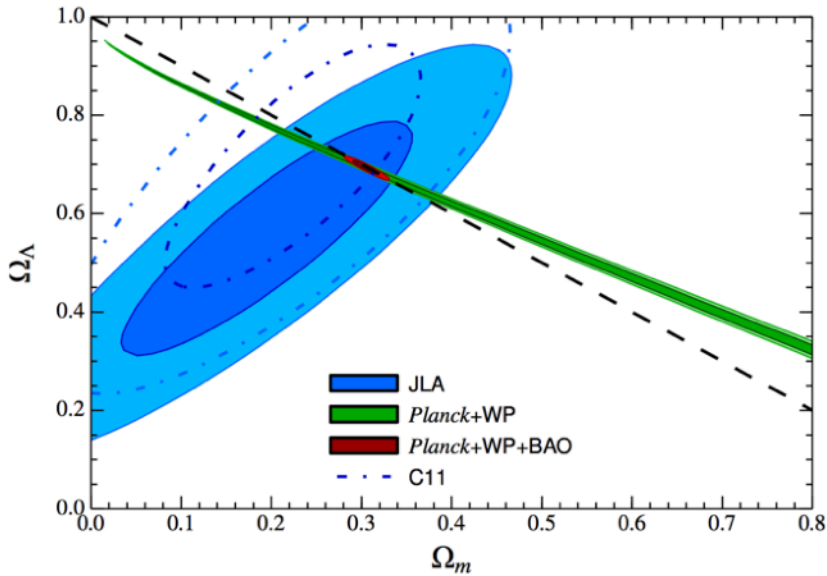
Betoule et al. JLA (2014) - 740 supernovae

D_L \longleftrightarrow



SN1a et énergie noire

Betoule et al. JLA (2014) - 740 supernovae



$$w = \frac{p}{\rho}, \quad \text{Equation of state}$$

$$w(z) = w_0 + w_a \frac{z}{1+z}$$

With current data, dark energy compatible with a cosmological constant

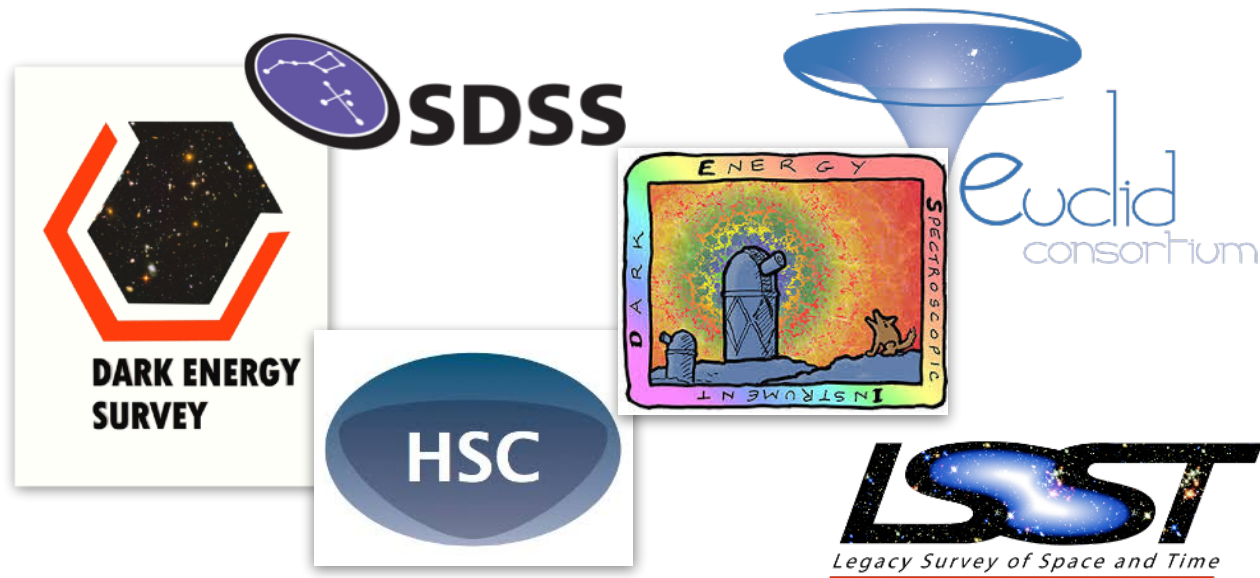
Introduction

- Histoire de l'univers
- Expansion
- Modèle de concordance

Les sondes cosmologiques

- Univers primordial : Le fond diffus cosmologique (CMB)
- Univers "récent":
 - La distribution des galaxies
 - Les supernovae (SNe)
 - Les autres sondes (en mode rapide)

De grands relevés du ciel (visible ou infrarouge proche) sont nécessaires !



L'observatoire Vera C. Rubin (Cerro Pachón, 2700m, Chili)

04/2011



12/2016



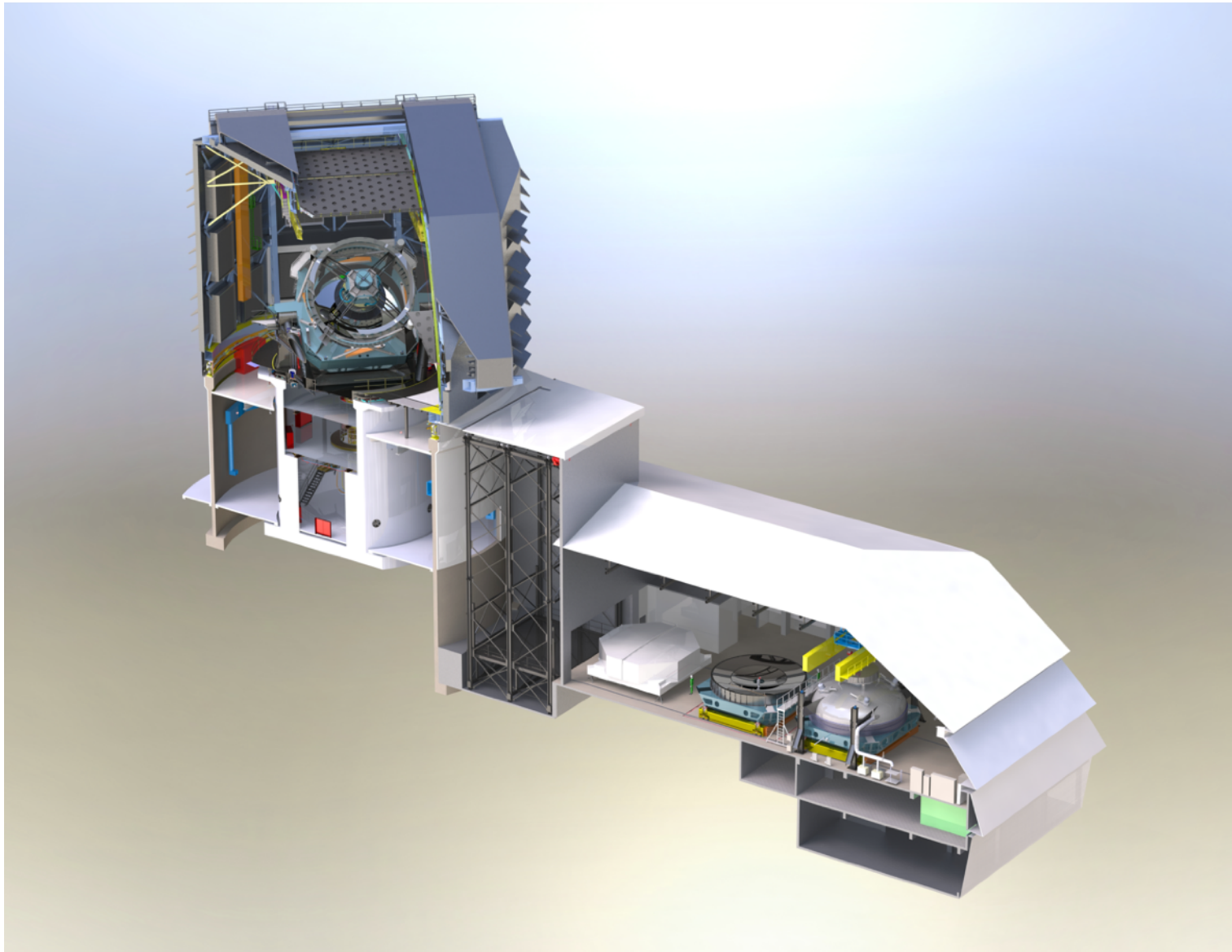
10/2019



05/2022



L'observatoire Vera C. Rubin



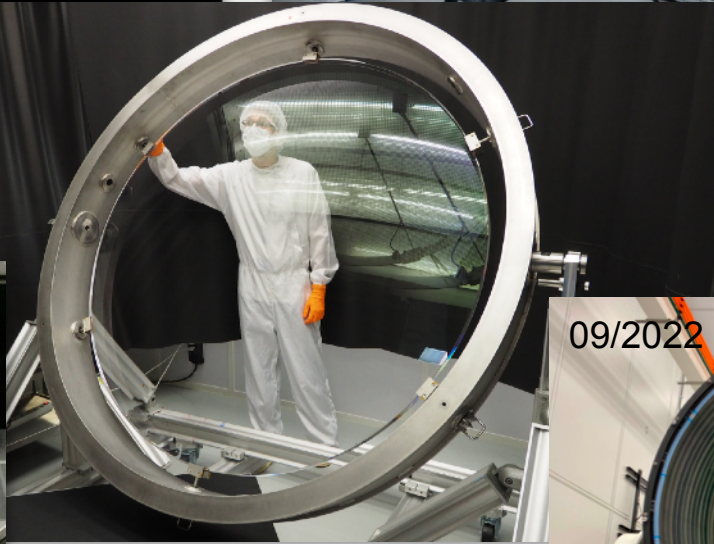
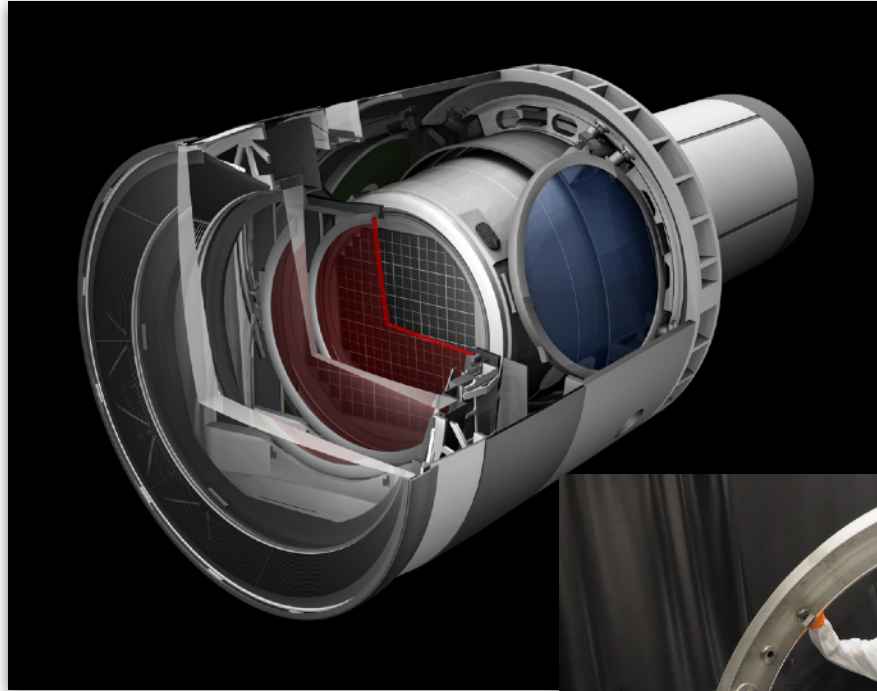
La monture du telescope (2019, Espagne)



Les miroirs



La caméra : 3.2 Gigapixels (CCD)



Rubin Legacy Survey of Space and Time (LSST)

Le relevé du ciel:

- 18000 deg² (~la moitié du ciel)
- 10 ans
- 6 filtres (UV - infra-rouge proche)
- Cadence d'observation optimisée pour les objets transitoires
SN Ia machine!!

Les données:

- 20 milliards de galaxies
- 20 TB /nuit = 4200 DVD or 800 BlueRay /nuit
- 15 PB après 10 years
- 10 millions d'alertes par nuit
- Défi informatique !

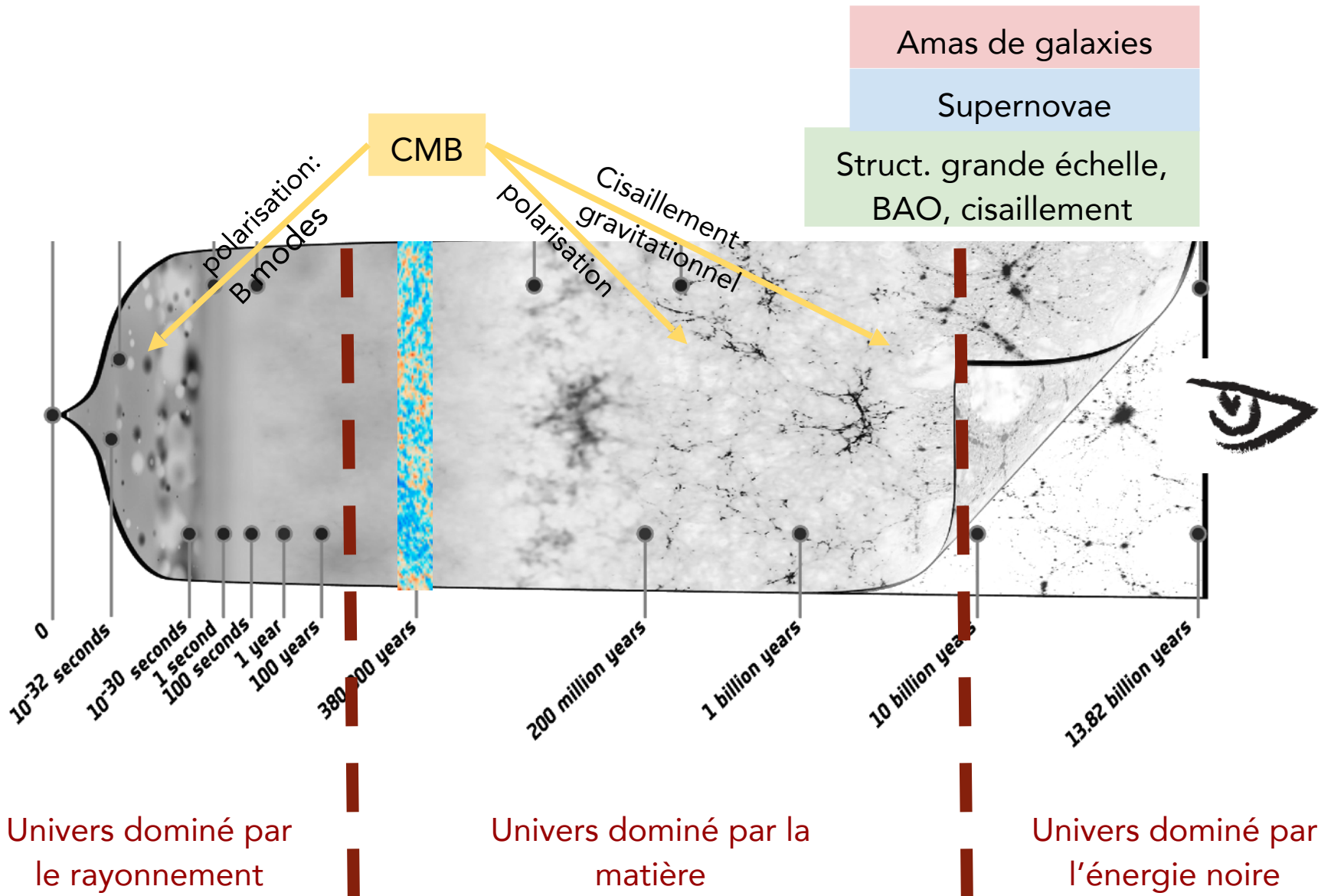
La Dark Energy Science Collaboration



- Cisaillement gravitationnel
- Structures à grandes échelles, BAO
- Supernovae de type Ia
- Amas de galaxies
- Lentillage gravitationnel fort (on en a pas parlé)

Conclusion

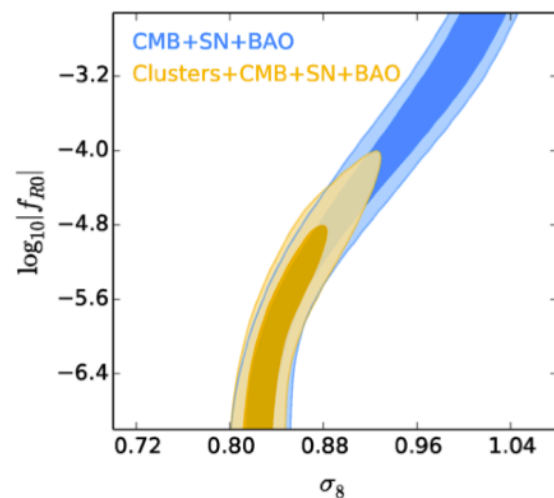
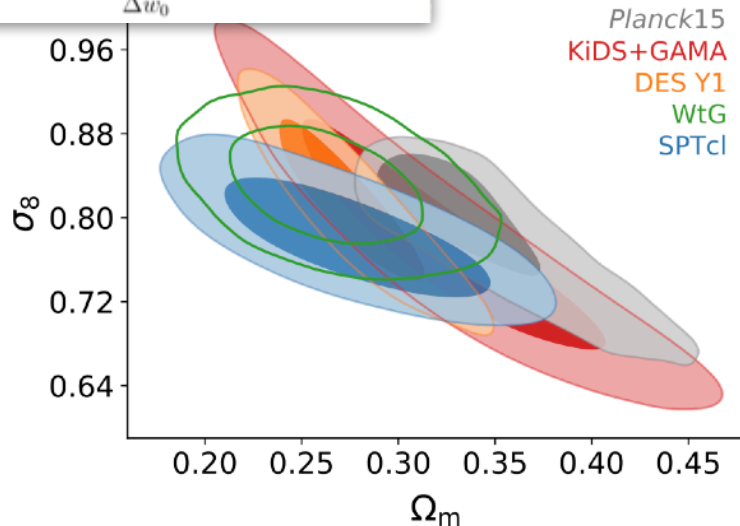
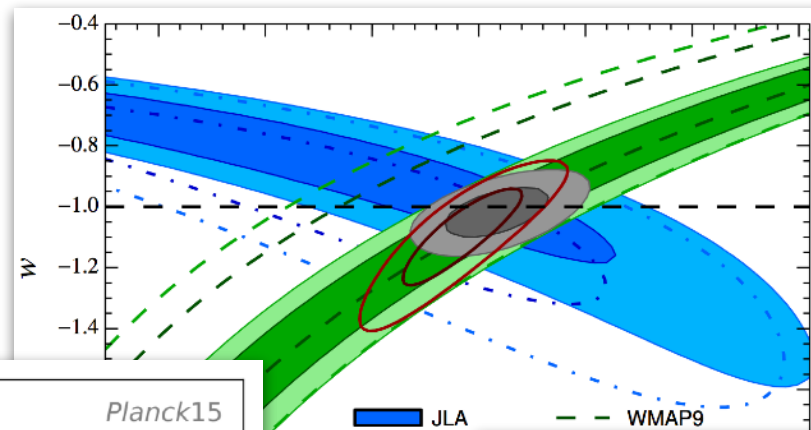
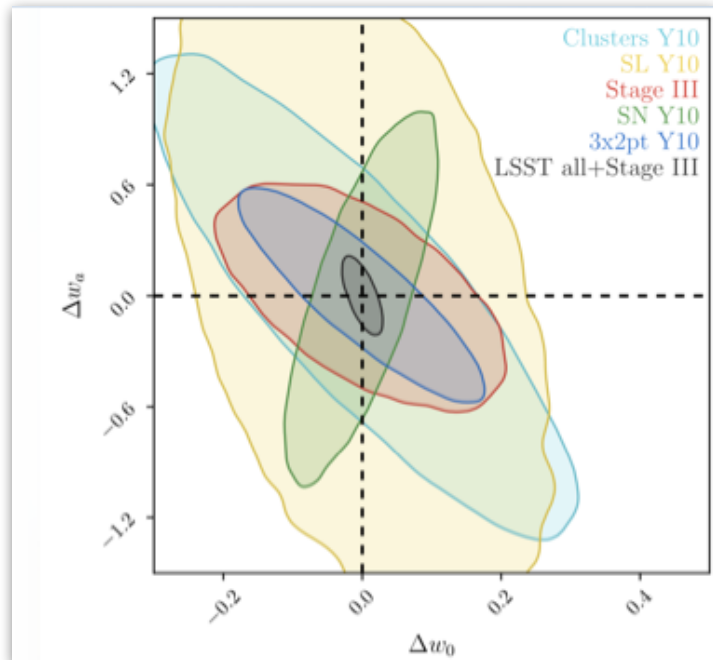
Qu'est ce qui sonde quoi et quand?



Mettons tout ensemble

Les différentes sondes sont

- combinées pour fournir les meilleures contraintes possibles
- comparées pour vérifier la cohérence et identifier de possible problèmes



Mettons tout ensemble

Aujourd'hui:

- Le modèle Λ CDM suffit pour décrire toutes les observations
- Mais il existe des tensions entre les contraintes de l'univers récent ou primordial (e.g., H_0) : faut-il revoir le modèle ?

Motivations des expériences futures:

- CMB B-modes - inflation ?
- Nature de l'énergie noire ?

