

21.11.2023 11:57:00

Cours 10 – 21 octobre 2023

Quizz du jour

Le CMB est de la lumière visible



oui: 5, non: 15 (20 réponses)

Le CMB est pratiquement constant sur tout le ciel



oui: 15, non: 5 (20 réponses)

La longueur d'onde pic d'émission d'un corps noir décroît avec la température



oui: 13, non: 7 (20 réponses)

Le CMB était beaucoup plus chaud au début que maintenant



oui: 17, non: 3 (20 réponses)

La majorité de tous les photons de l'Univers proviennent du CMB



oui: 15, non: 5 (20 réponses)

Le CMB est créé au moment de la réionisation de l'hydrogène



oui: 15, non: 5 (20 réponses)

La seule émission millimétrique observable est le CMB



oui: 4, non: 16 (20 réponses)

La taille caractéristique des fluctuations du CMB nous indique si l'Univers est plat ou courbé



oui: 13, non: 7 (20 réponses)

Si la densité de masse de l'Univers (Ω_M) augmente, les pics des oscillations du spectre de puissance du CMB sont plus prononcés

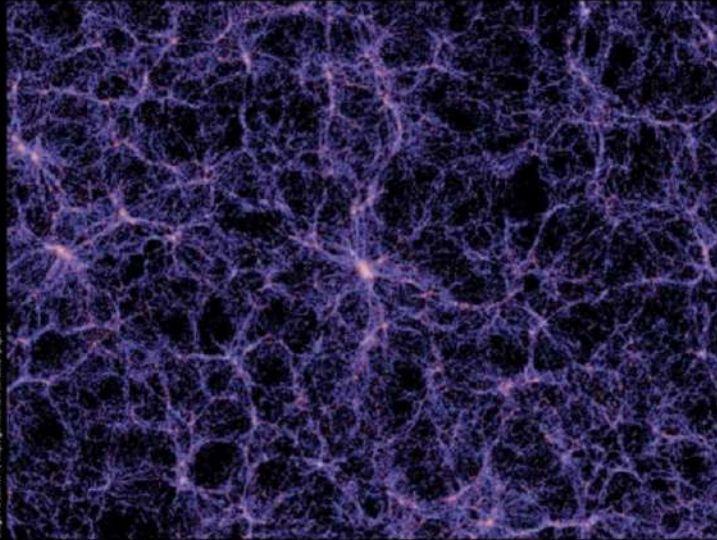


oui: 13, non: 7 (20 réponses)



Cosmologie

Corinne Charbonnel & Stéphane Paltani
Professeur.e.s au Département d'Astronomie UniGE



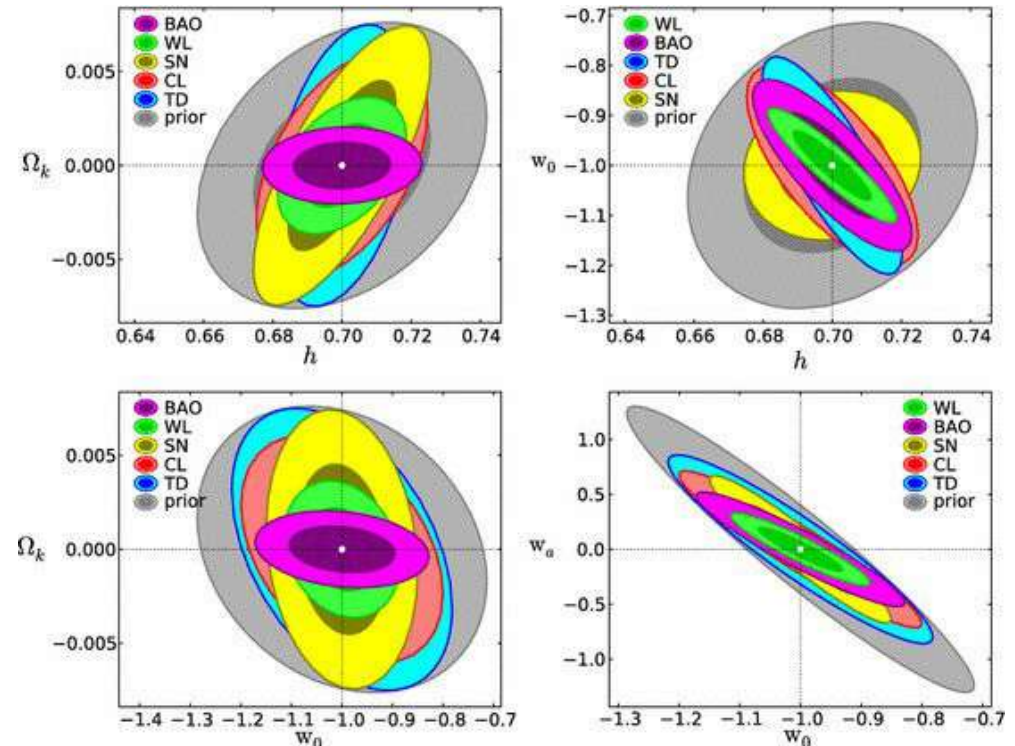
le mardi, du 19 septembre au 19 décembre 2023
de 17h45 à 18h45
Auditoire A300 - Sciences II, 30 quai Ernest-Ansermet, Genève

Inscription au cours sur place le 19 septembre
Renseignements : <http://unige.ch/sciences/astro>

Cours 10 – 21 novembre 2023

<https://mediaserver.unige.ch/play/206920>

Sondes cosmologiques



Contenu

- Paramètres cosmologiques
- Observables fondamentales
- Sondes principales
 - Supernovas
 - CMB
 - Fonction de corrélation de la matière baryonique et BAO
 - Cisaillement cosmique

Paramètres cosmologiques

Équations de Friedmann

Avec $a(t_0)=a_0$, les équations d'Einstein donnent les équations de Friedmann:

Pour la composante 00 :

$$\frac{\dot{a}^2 + kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G}{3} \rho$$

Pour les composantes ii :

$$\frac{\ddot{a}}{a} = \frac{-4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right)$$

a est le facteur d'échelle

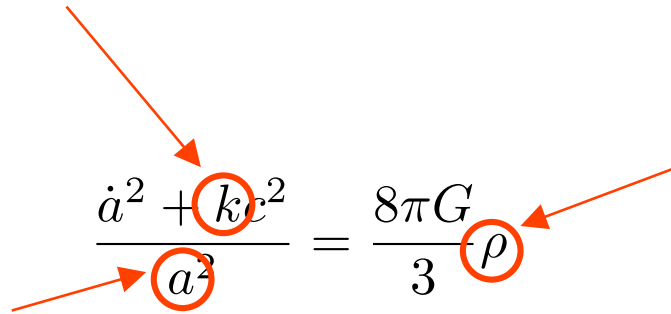
\dot{a} est la vitesse d'expansion

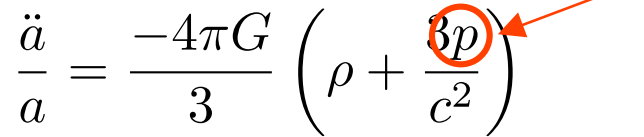
\ddot{a} est l'accélération de l'expansion

$$\frac{\dot{a}(t_0)}{a_0} \equiv H_0$$

Indice 0 \equiv maintenant

Inconnues

$$\frac{\dot{a}^2 + kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G}{3} \rho$$


$$\frac{\ddot{a}}{a} = \frac{-4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right)$$


Il nous faut donc connaître $\rho(a)$ et $p(a)$

Et les conditions initiales...

Sans oublier les équations d'état reliant p et ρ

L'équation de Friedmann en terme de densité

On peut exprimer toutes ces formes d'énergie en termes de densité par rapport à la densité critique + un terme de courbure:

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

$$\Omega_m = \frac{\rho_m}{\rho_c}$$

$$\Omega_r = \frac{\rho_r}{\rho_c}$$

$$\Omega_\Lambda = \frac{\rho_\Lambda}{\rho_c}$$

$$\Omega_k = \frac{\rho_k}{\rho_c}$$

L'équation de Friedmann devient, avec : $\hat{a} = \frac{a}{a_0}$

$$\frac{\dot{a}^2 + kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G}{3} \rho$$

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H_0^2 \left(\Omega_\Lambda + \frac{\Omega_m}{\hat{a}^3} + \frac{\Omega_r}{\hat{a}^4} + \frac{\Omega_k}{\hat{a}^2} \right)$$

Si on peut mesurer tous les Ω et H_0 , on **résout la cosmologie!**

Paramètres cosmologiques

• Densité de baryons	Ω_B
• Densité de matière noire	Ω_C
• Âge de l'Univers	t_0
• Indice spectral du spectre de puissance	n
• Amplitude du spectre de puissance des fluctuations	Δ^2_R
• Profondeur optique à la recombinaison	τ
• Densité totale	Ω_T
• Équation d'état de l'énergie noire	w
• Rapport tenseur/scalaire	r
• Courbure du spectre de puissance	$dn/d \ln k$
• Somme de la masse des neutrinos	$\sum m_\nu$
• Nombre de degrés de liberté relativistes	N_{eff}

Observables fondamentales

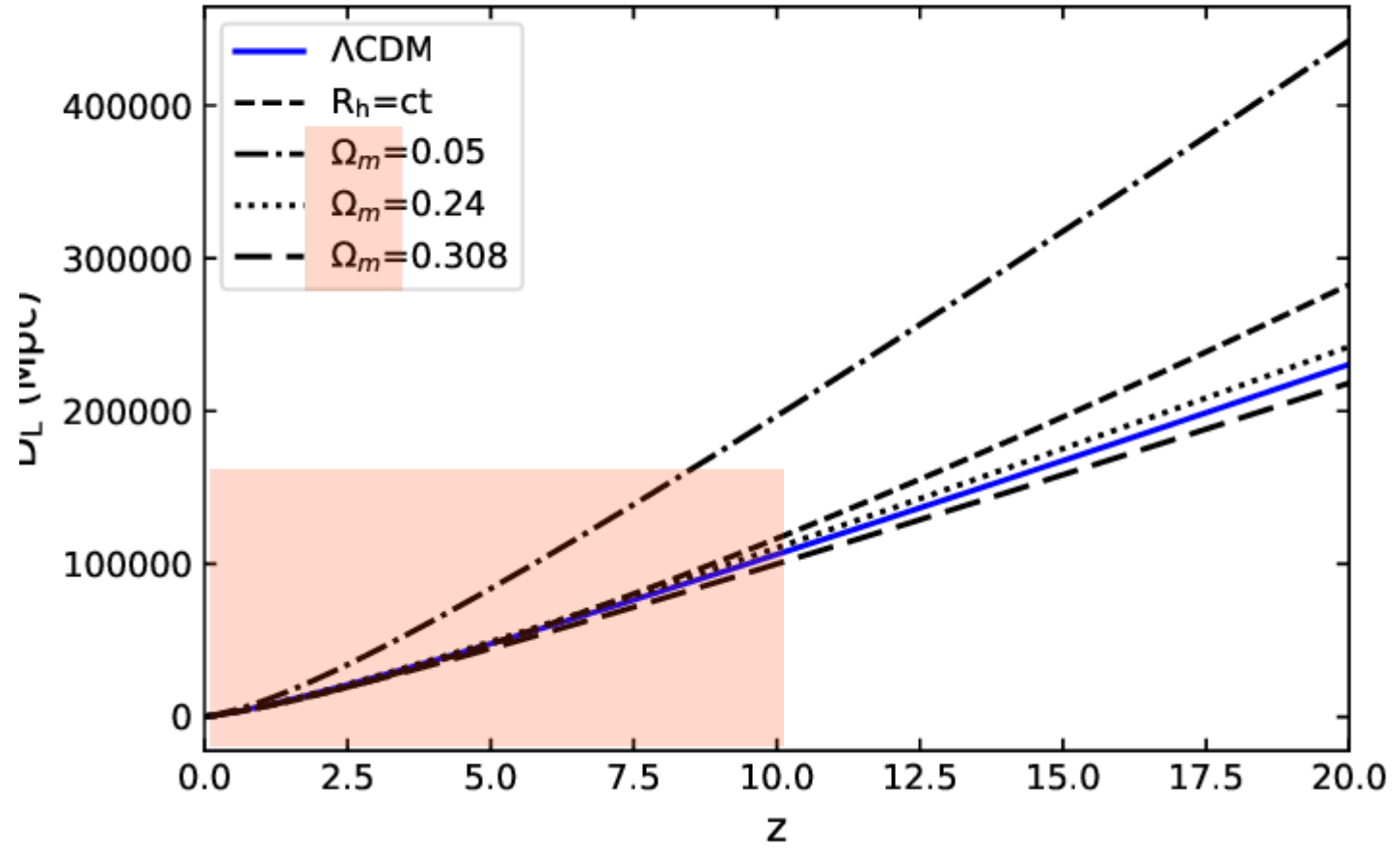
Relation distance – redshift

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = H_0^2 \left(\Omega_\Lambda + \frac{\Omega_m}{\hat{a}^3} + \frac{\Omega_r}{\hat{a}^4} + \frac{\Omega_k}{\hat{a}^2} \right)$$

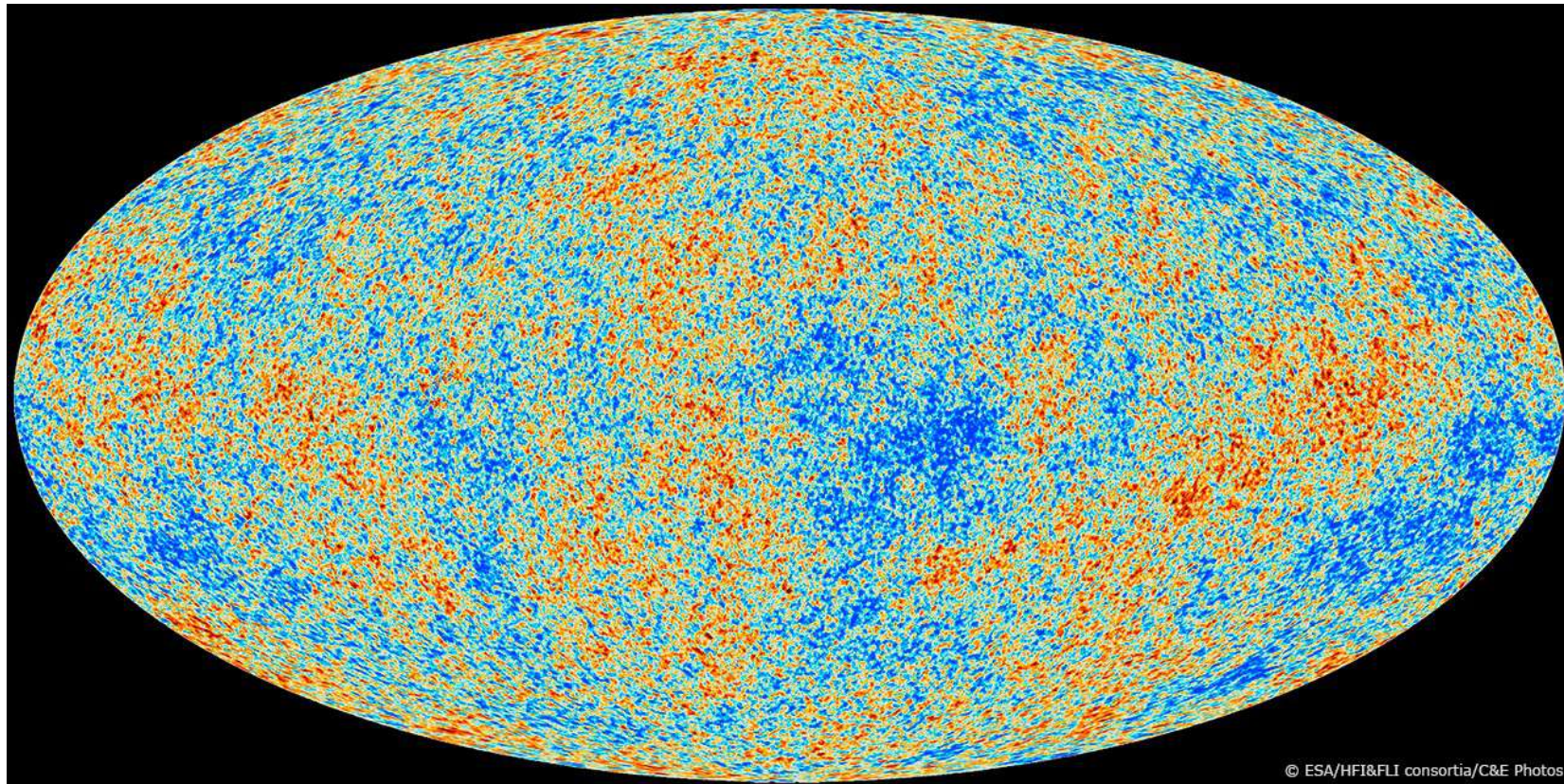
$$H \equiv H(z) \qquad \Omega_\Lambda + \frac{\Omega_m}{\hat{a}^3} + \frac{\Omega_r}{\hat{a}^4} + \frac{\Omega_k}{\hat{a}^2} \equiv E(z)$$

$$d_C(z) = \int_0^z \frac{c}{H_0} \frac{d\zeta}{E(\zeta)}$$

Relation distance – redshift

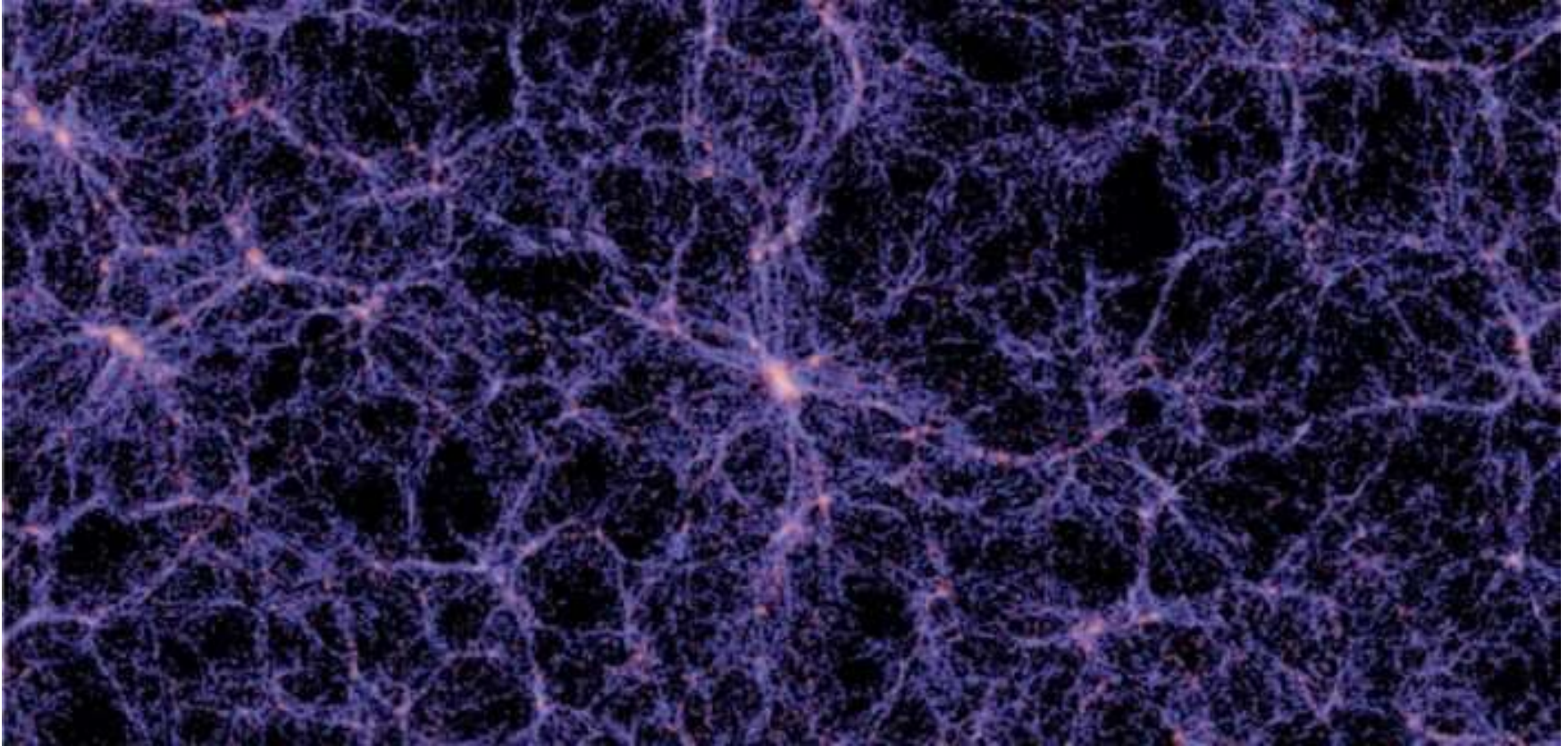


Fluctuations du CMB

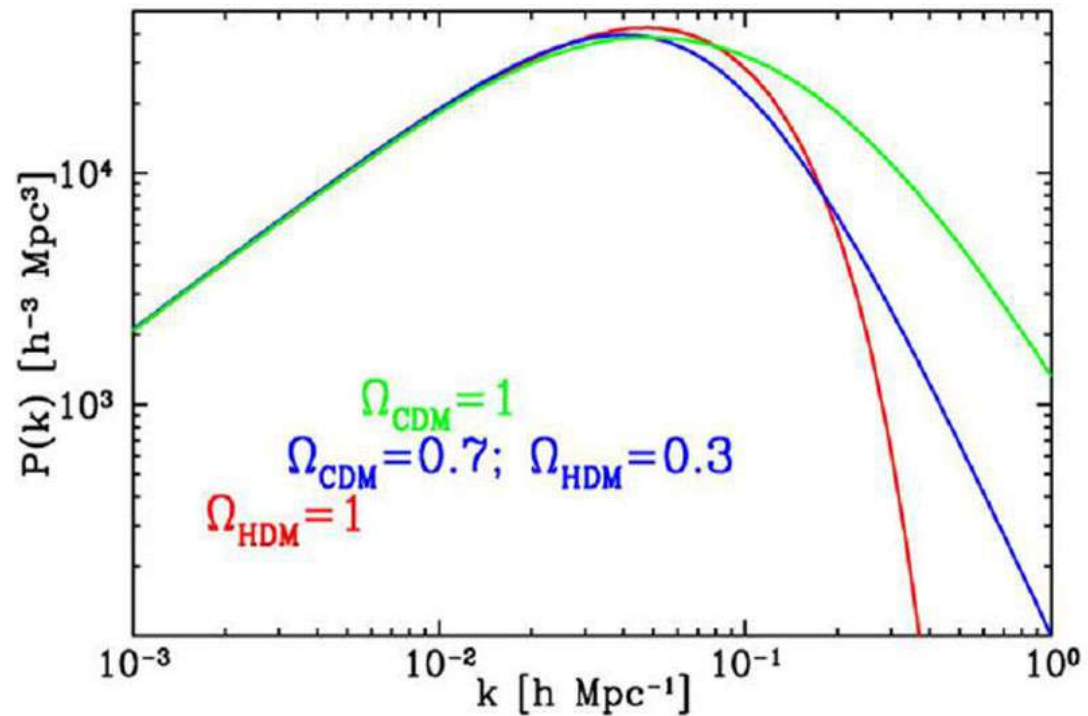
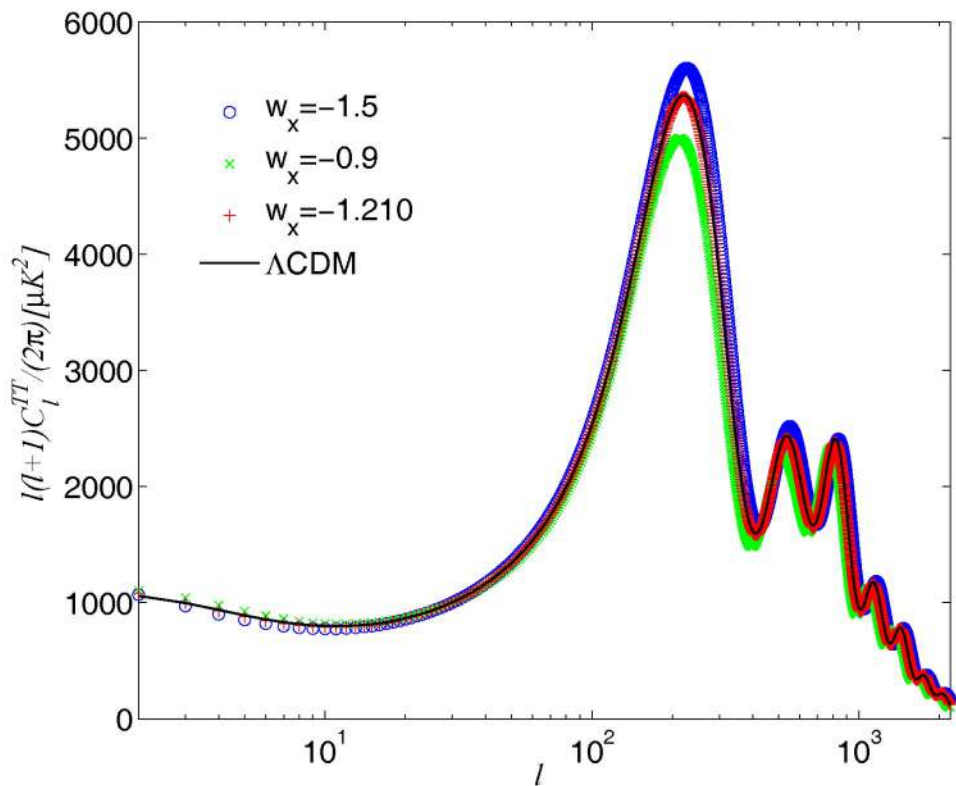


© ESA/HFI&FLI consortia/C&E Photos

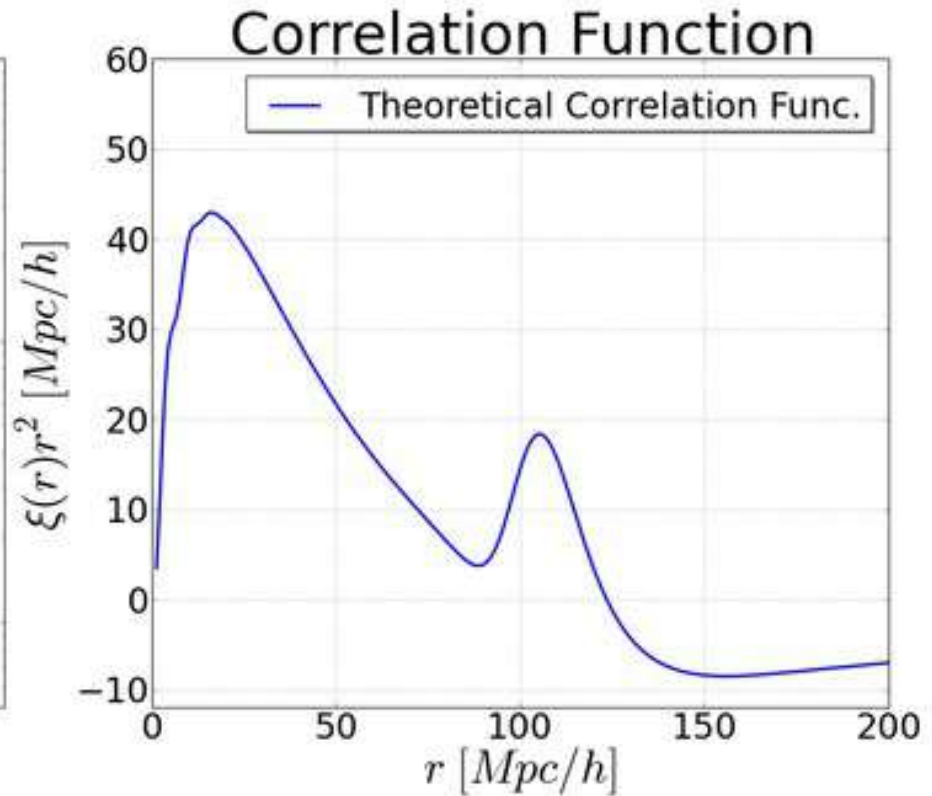
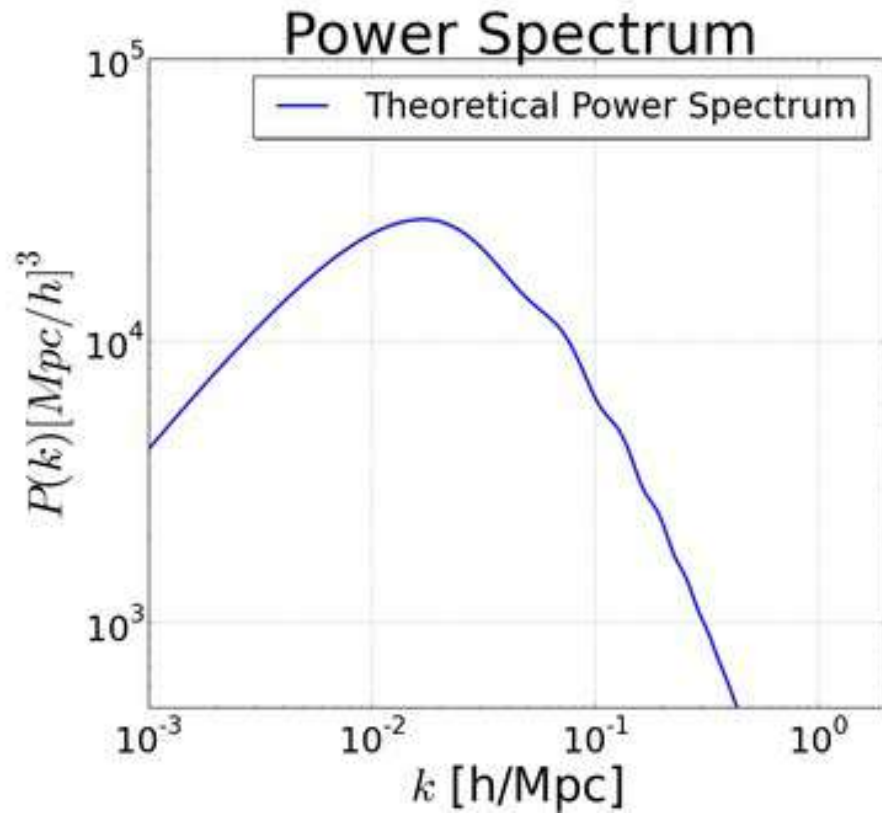
Structure à grande échelle



Spectre de puissance



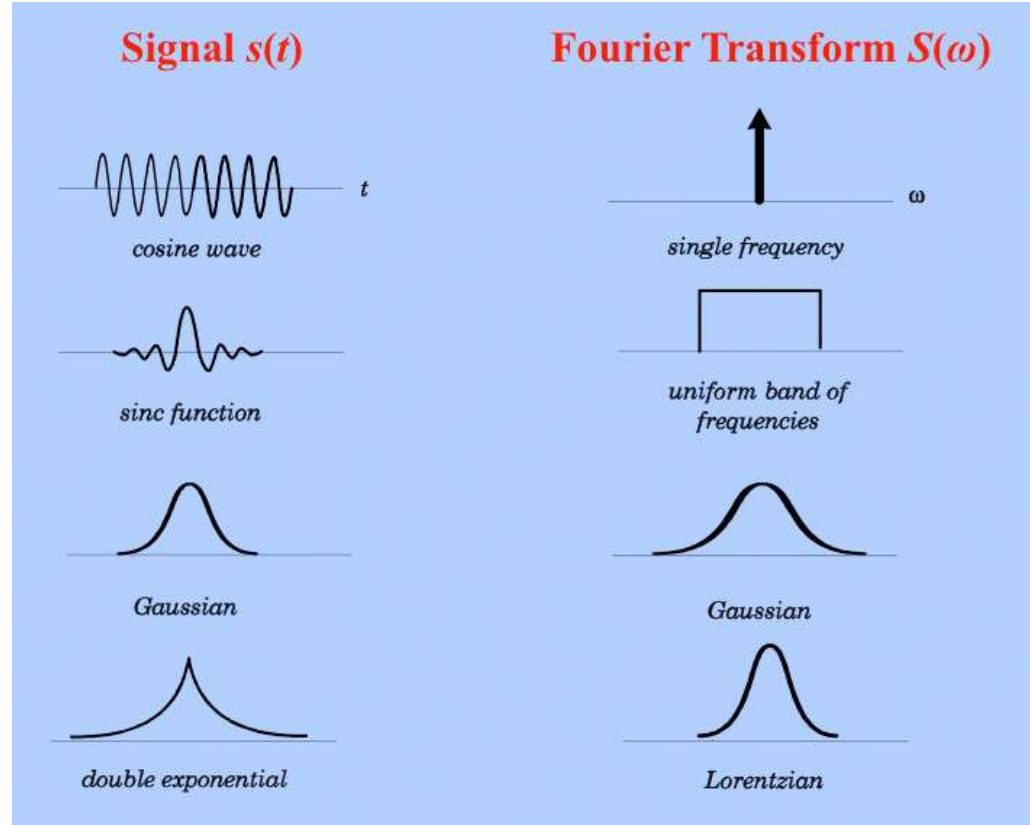
Fonction de corrélation



Note: espace de Fourier ou réciproque

Transformée de Fourier

$$F(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(r) e^{-2\pi i r k} dr$$

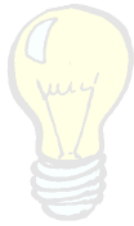
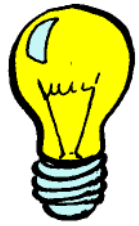


Observables fondamentales

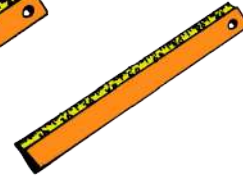
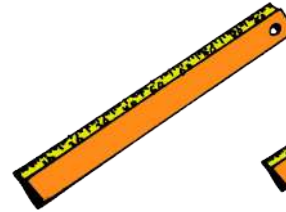
- **Relation distance – redshift**
 - Distance de luminosité
 - Distance angulaire
- **Structure à grande échelle**
 - CMB
 - Fonction de corrélation/spectre de puissance de la matière baryonique
 - Fonction de corrélation/spectre de puissance de la matière

Sondes cosmologiques

Relation distance – redshift



Distance →

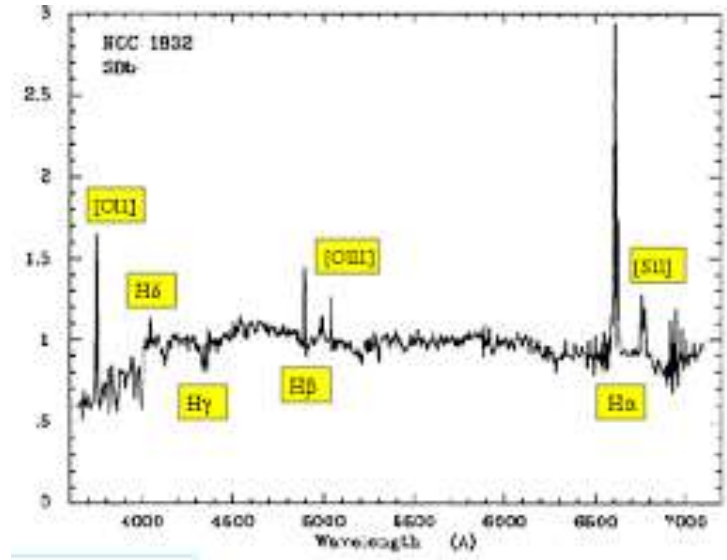
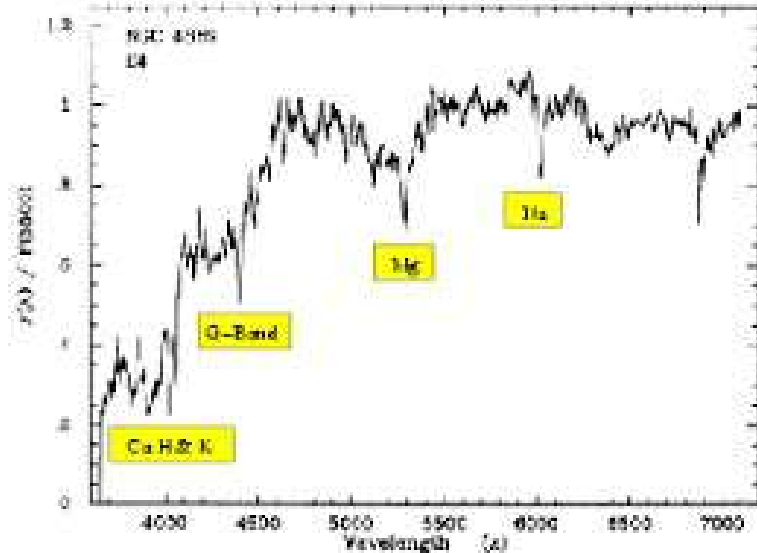
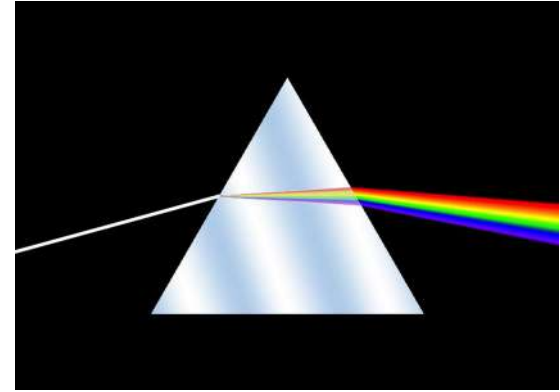


Distance →

- Objets dont on connaît:
 - La luminosité
 - La distance
- et
 - Le redshift

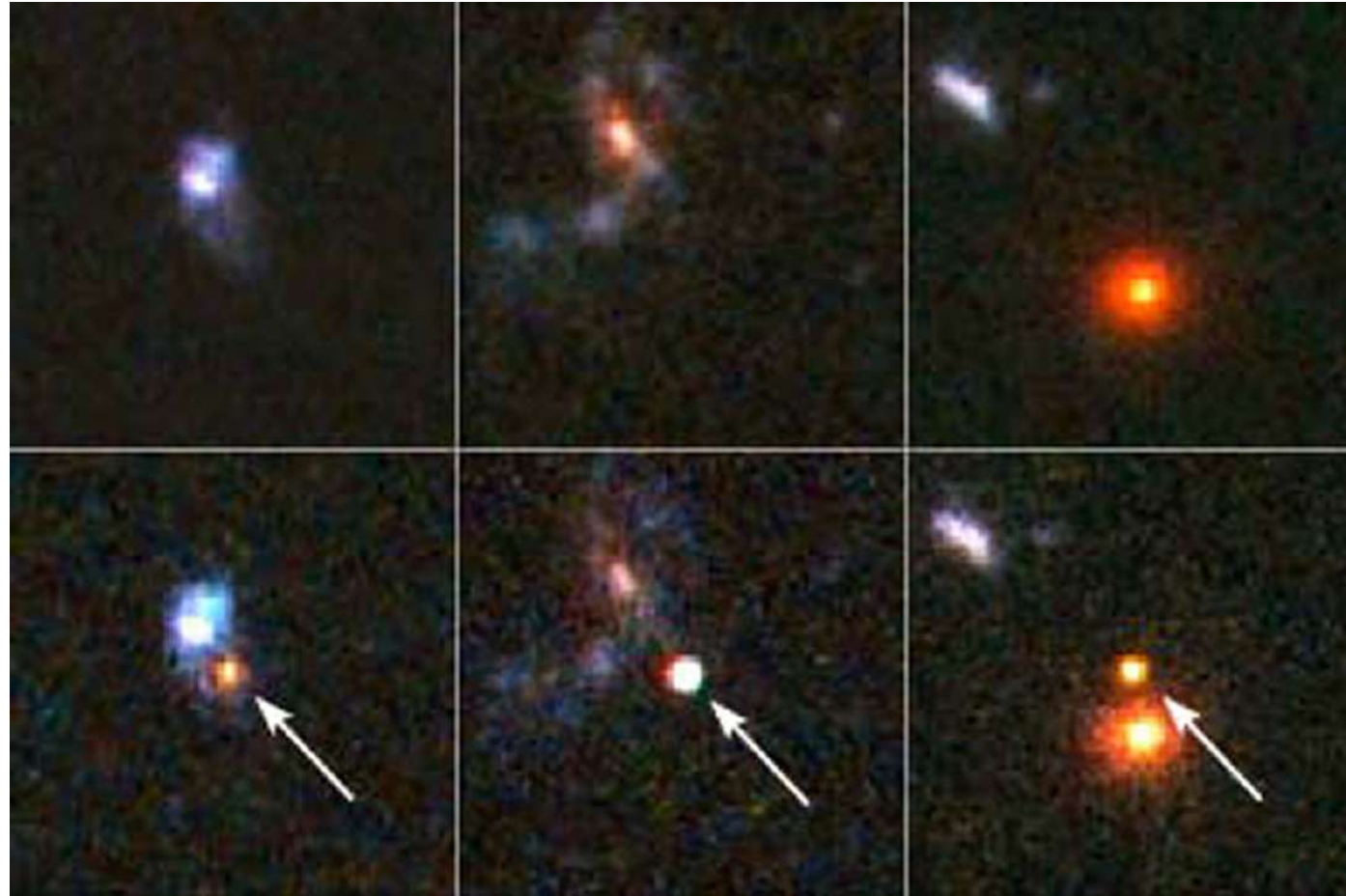
Mesure du redshift

- Les éléments chimiques ont des **signatures spectrales**
 - En émission dans le gaz chauffé
 - En absorption dans les étoiles
- **Spectroscopie**

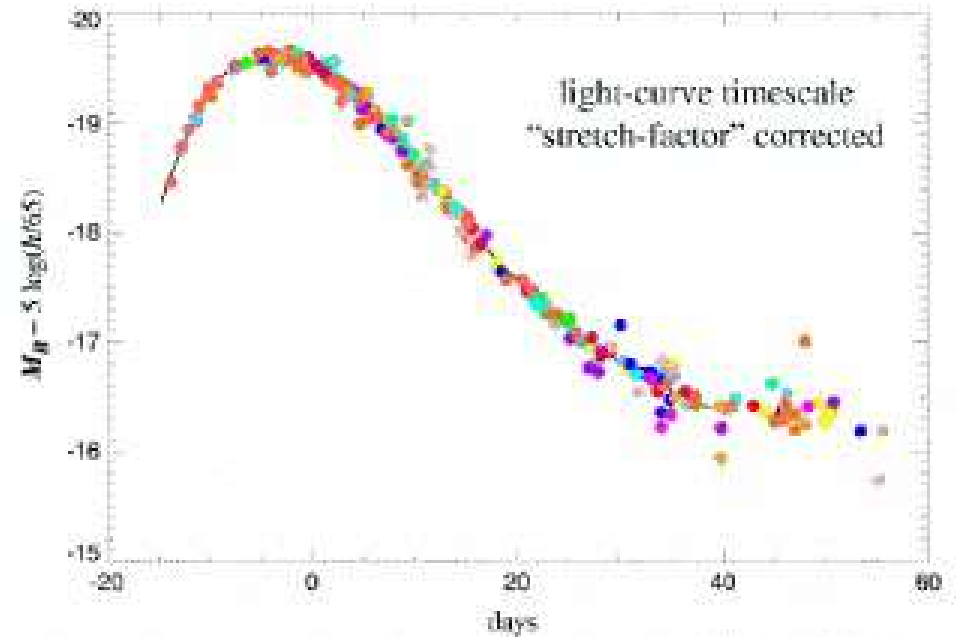
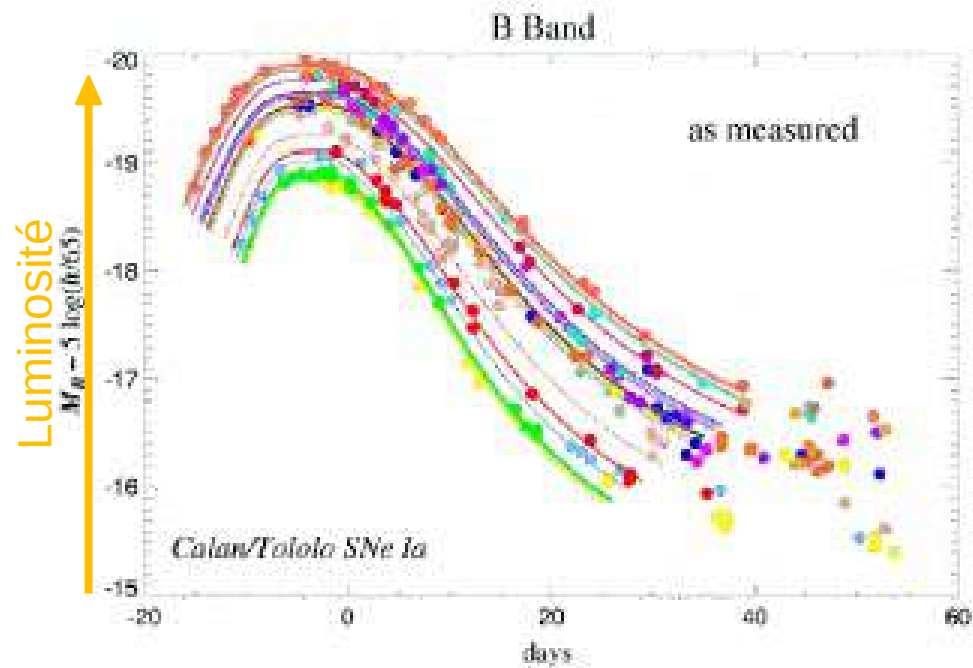


Chandelles standard(isables)

Supernovas

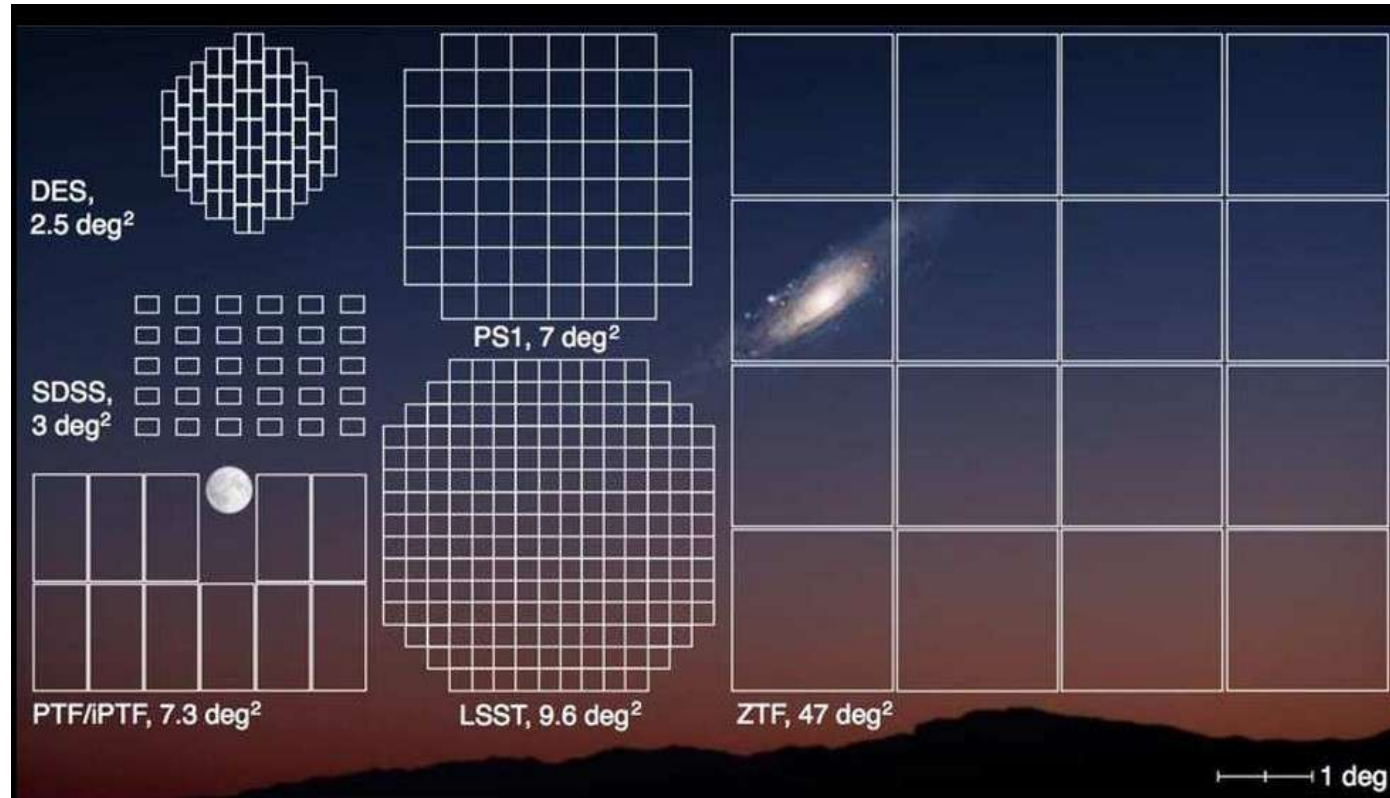


Chandelles standard(isables)

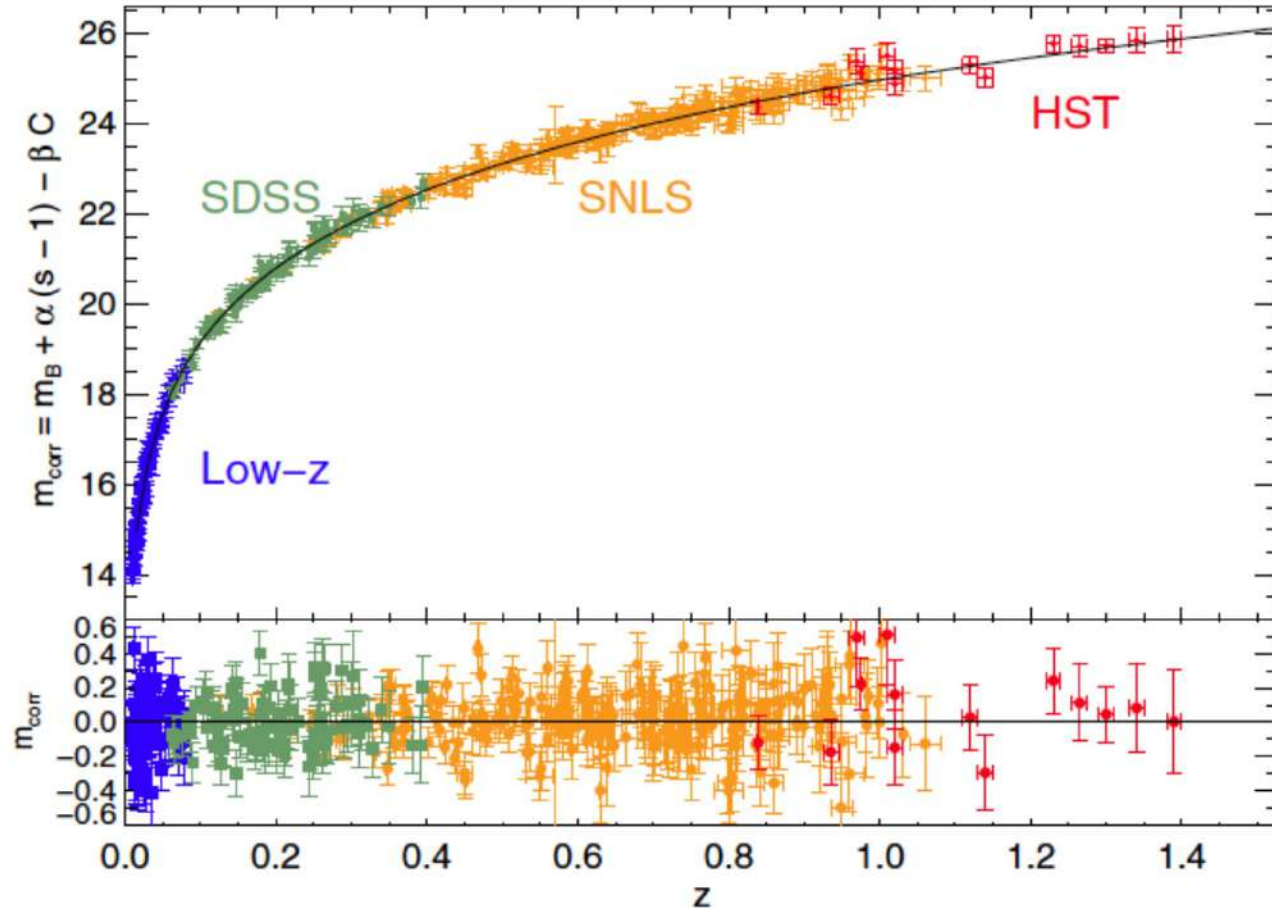


Recherches de supernovas

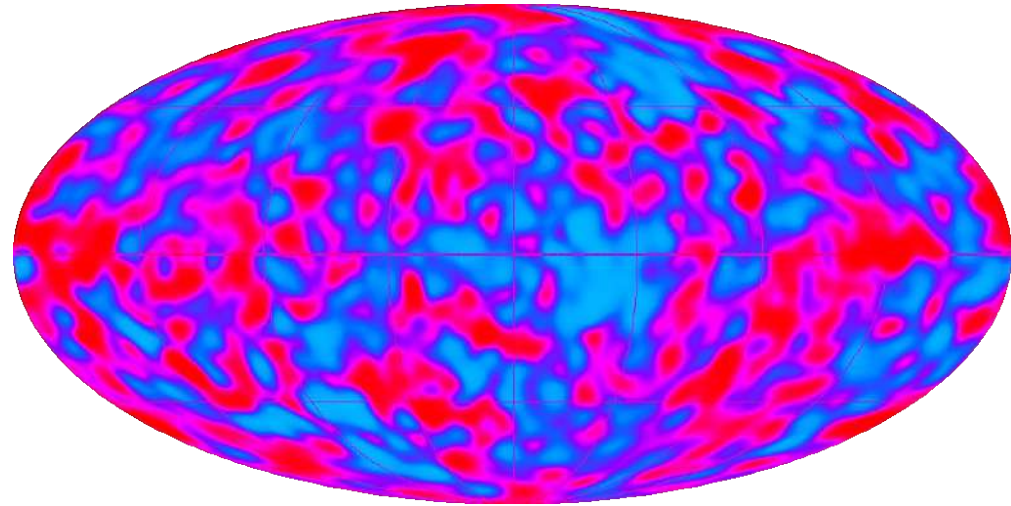
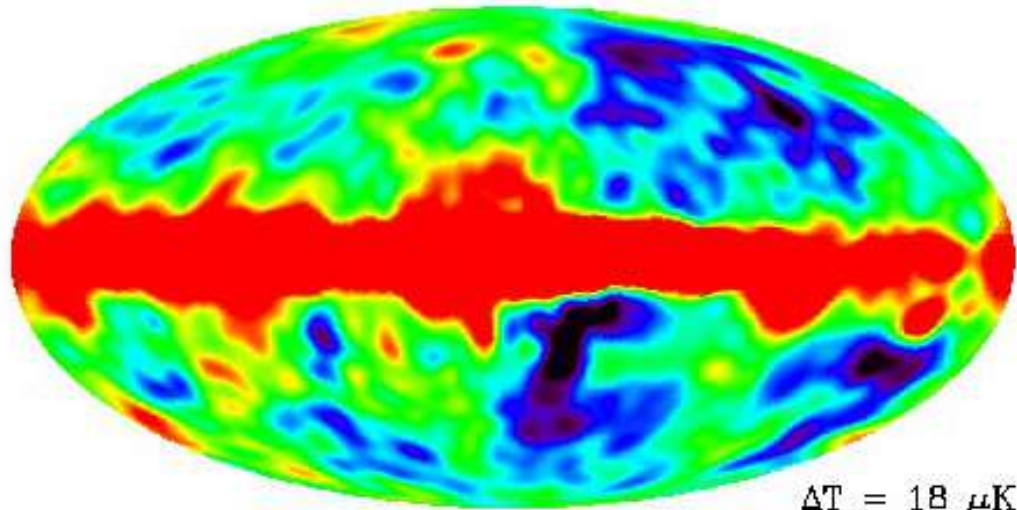
- Télescopes et caméras à très grand champ
- Observations répétées de la même région du ciel
- Recherche de “transients”



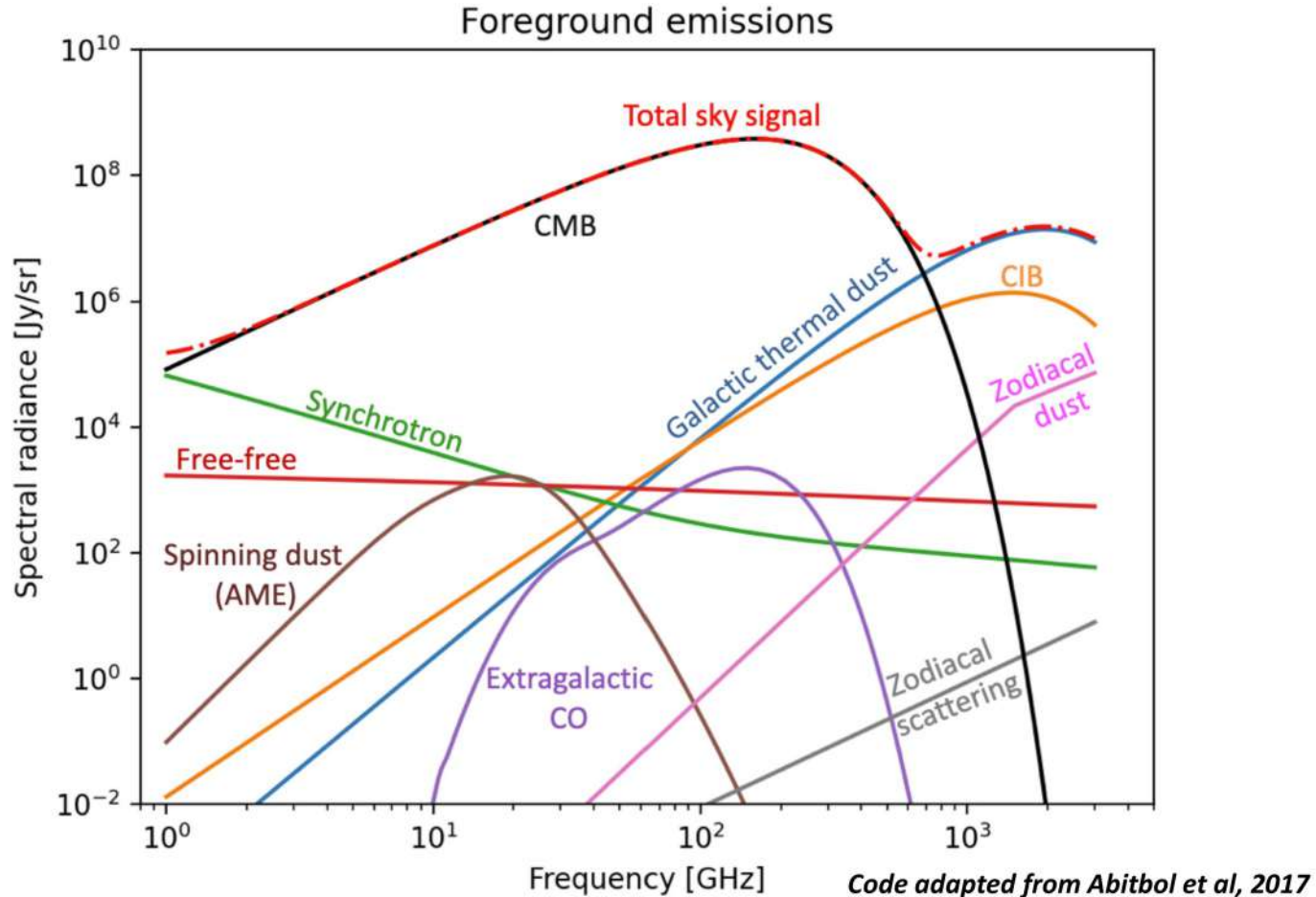
Distance-luminosity des supernovas



CMB

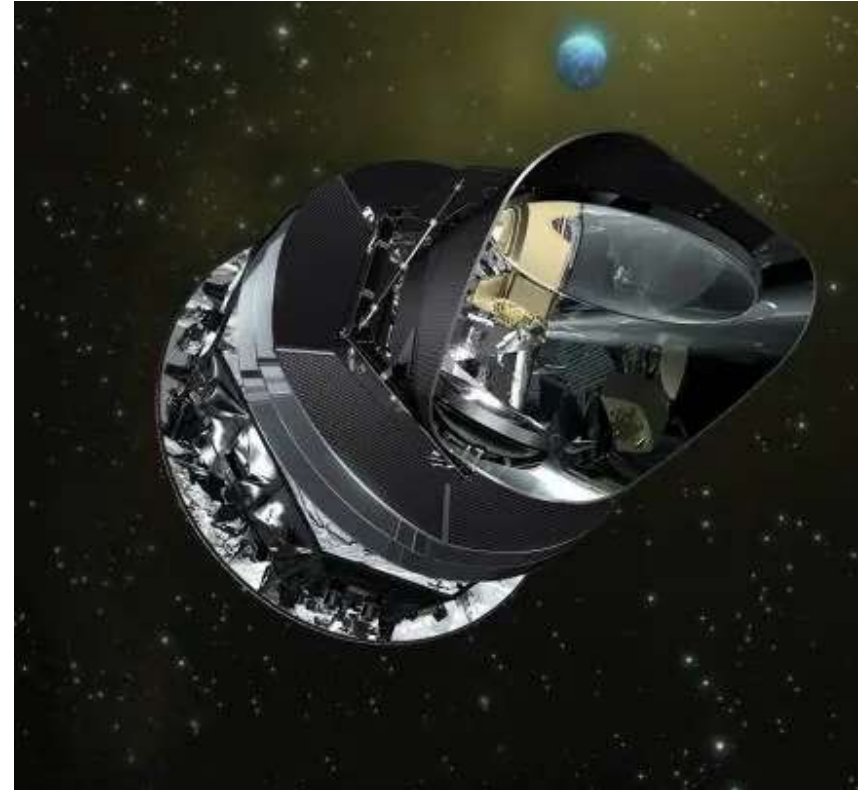


Émission millimétrique



Planck

- Satellite de l'Agence Spatiale Européenne (ESA)
- Lancé le 14 mai 2009, mission de 15 mois
- Point "L₂" (1'500'000 km de la Terre, opposé au Soleil)
- Télescope de 1.9x1.5 m²
- Deux instruments: HFI et LFI

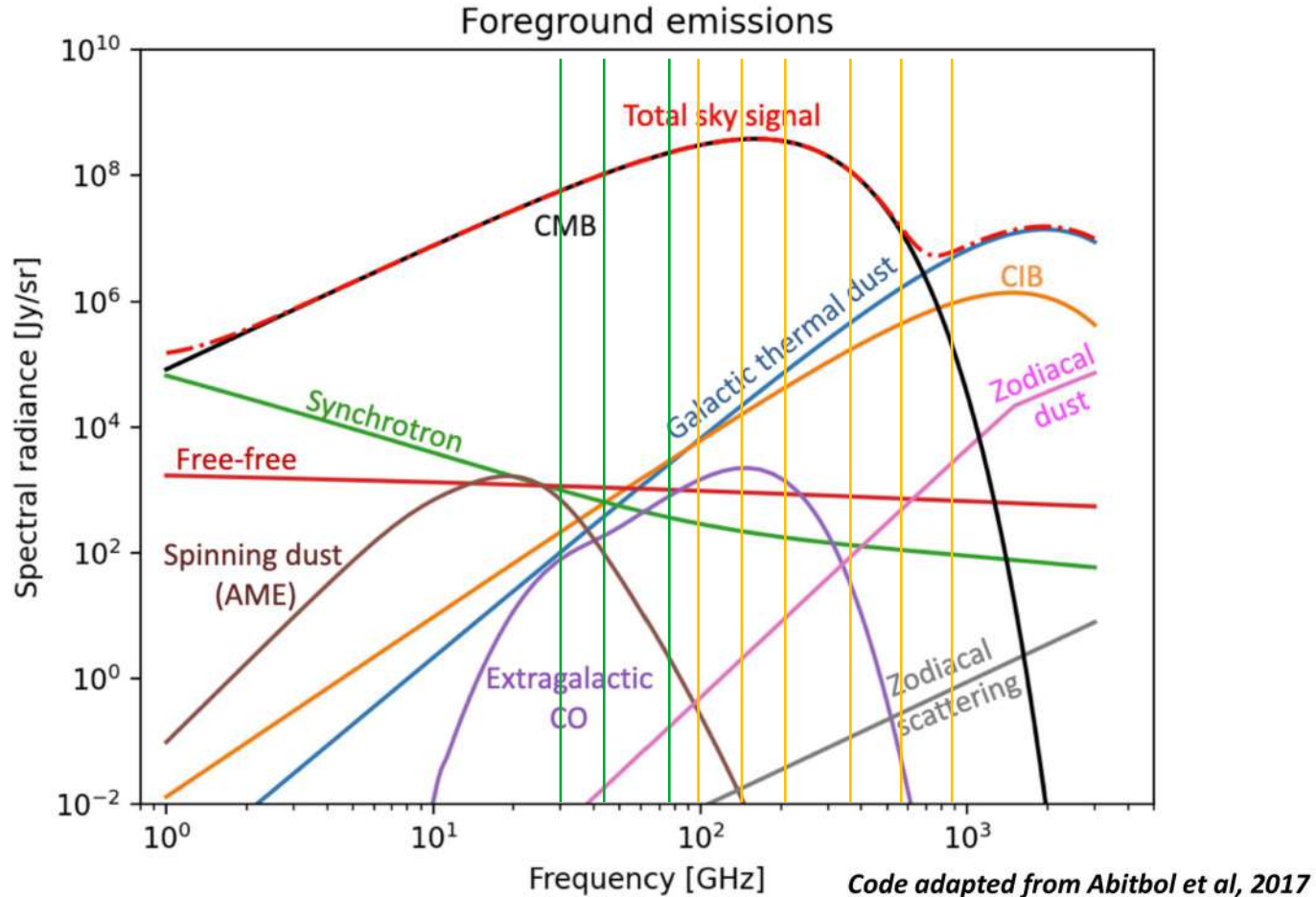


Plan focal

- LFI
 - 22 détecteurs
 - 3 bandes de 11.1 à 3.9 mm ou 27–77 GHz
- HFI
 - 52 détecteurs
 - 6 bandes de 3.6 à 0.3 mm ou 84–1000 GHz

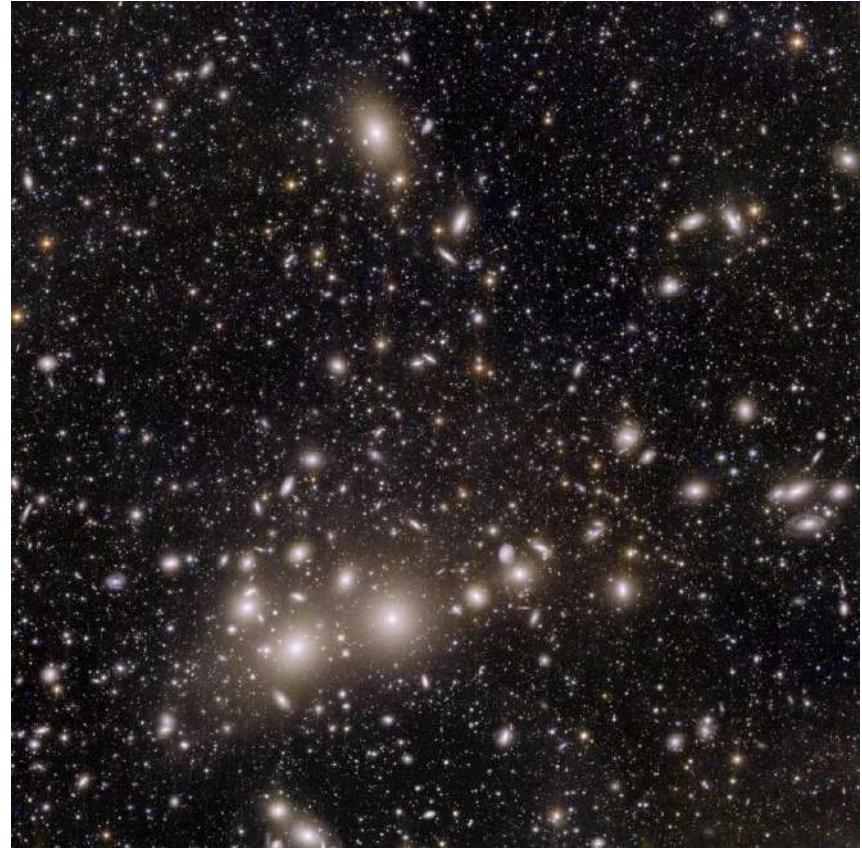


Émission millimétrique



Fonction de corrélation de la matière baryonique

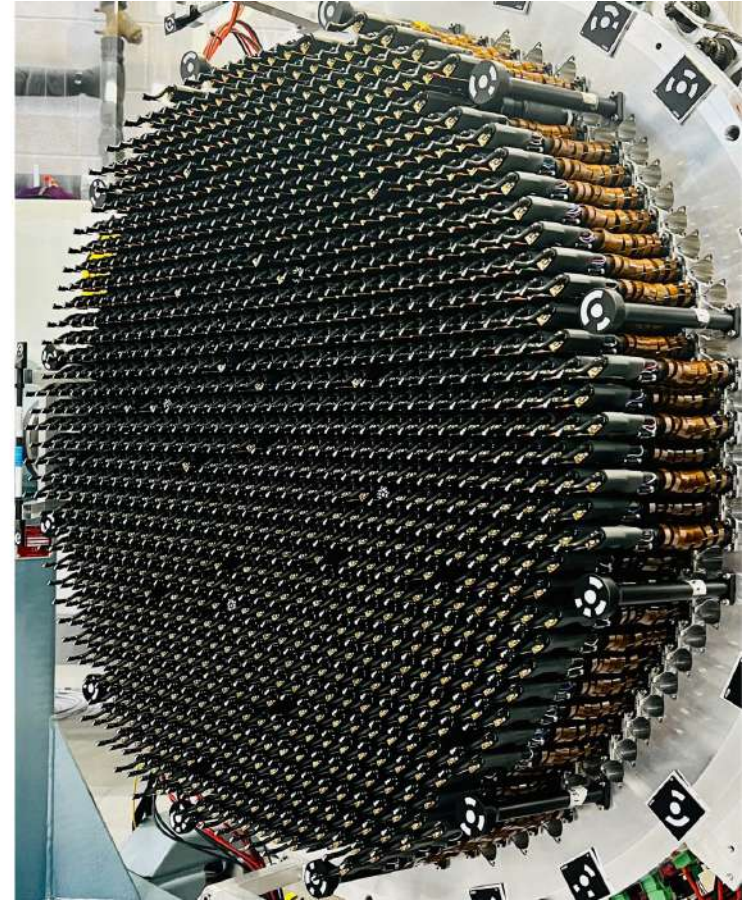
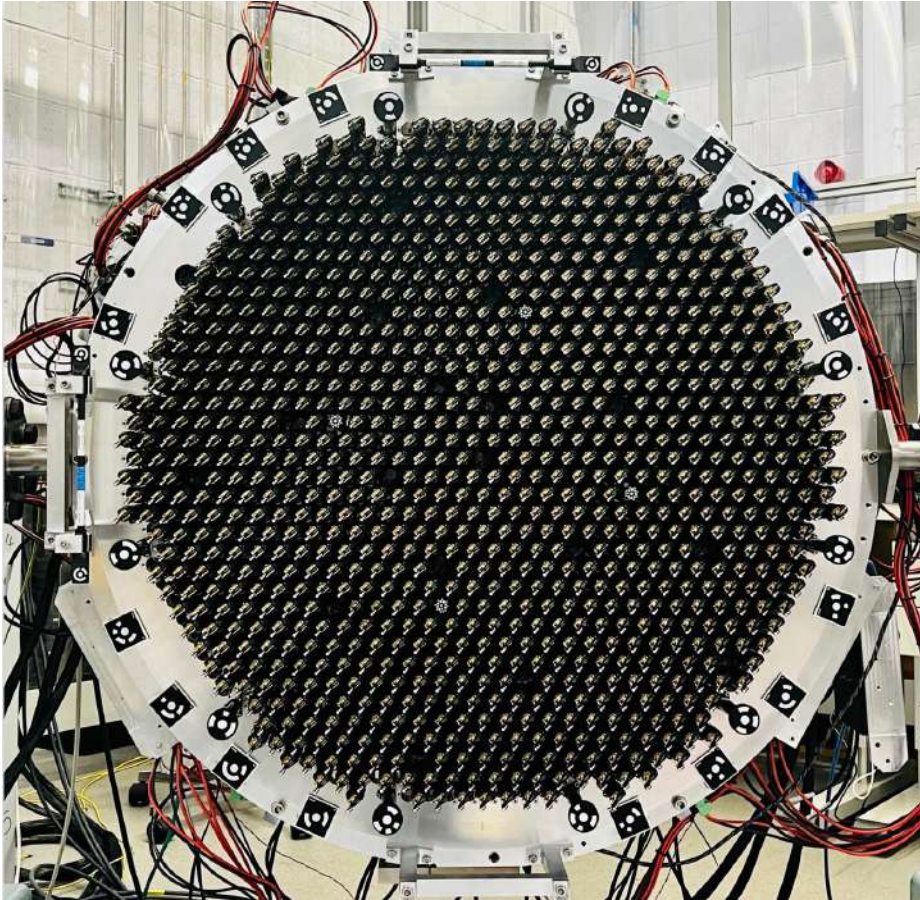
- Les galaxies sont les traceurs les plus évidents de matière baryonique
- Les télescopes à grand champ permettent de placer les galaxies en **deux dimensions**
- La **troisième dimension** est accessible par spectroscopie
 - Redshift, et non distance
 - Relié par le modèle que l'on veut tester
 - Sensibilité est beaucoup plus faible, ce qui limite le nombre de galaxies



Spectroscopie multi-objets

- Multiples spectrographes
 - 1000-5000 en parallèle
- Projets:
 - 4MOST (4 m)
 - DESI (4 m)
 - MOONS (8 m)
 - PFS (8 m)

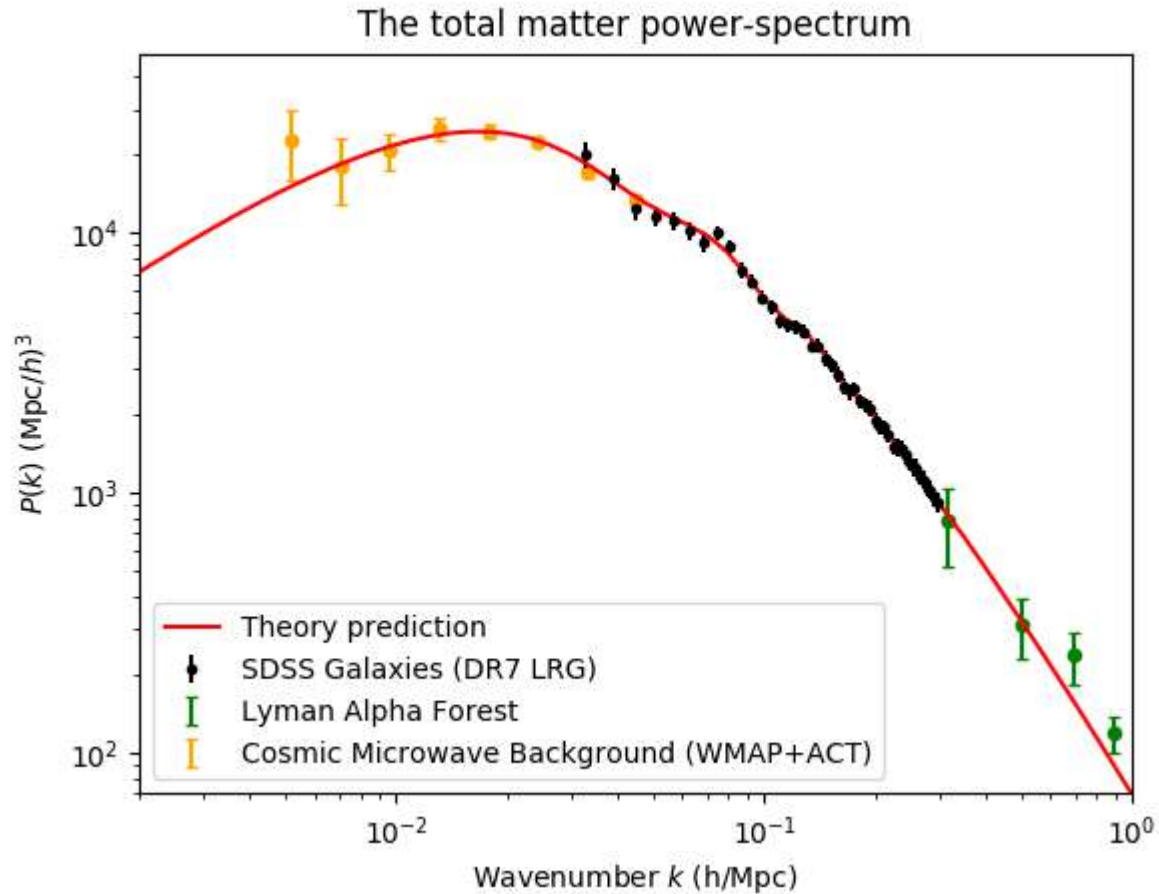
Plan focal d'un MOS



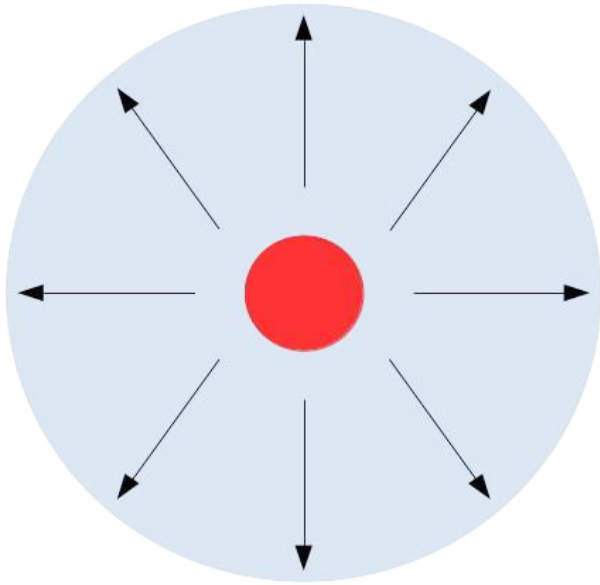
Fiber Positioning Unit



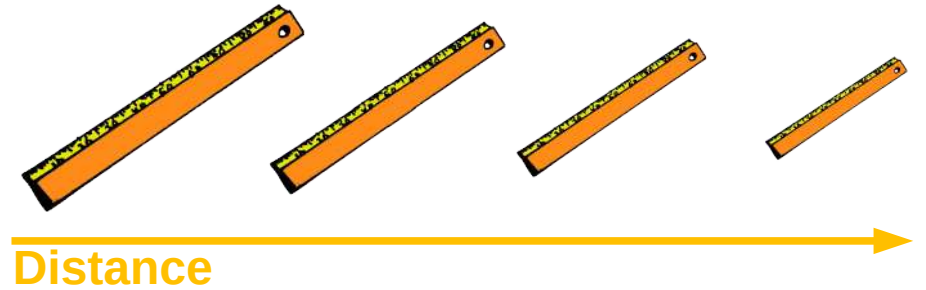
Spectre de puissance de la matière



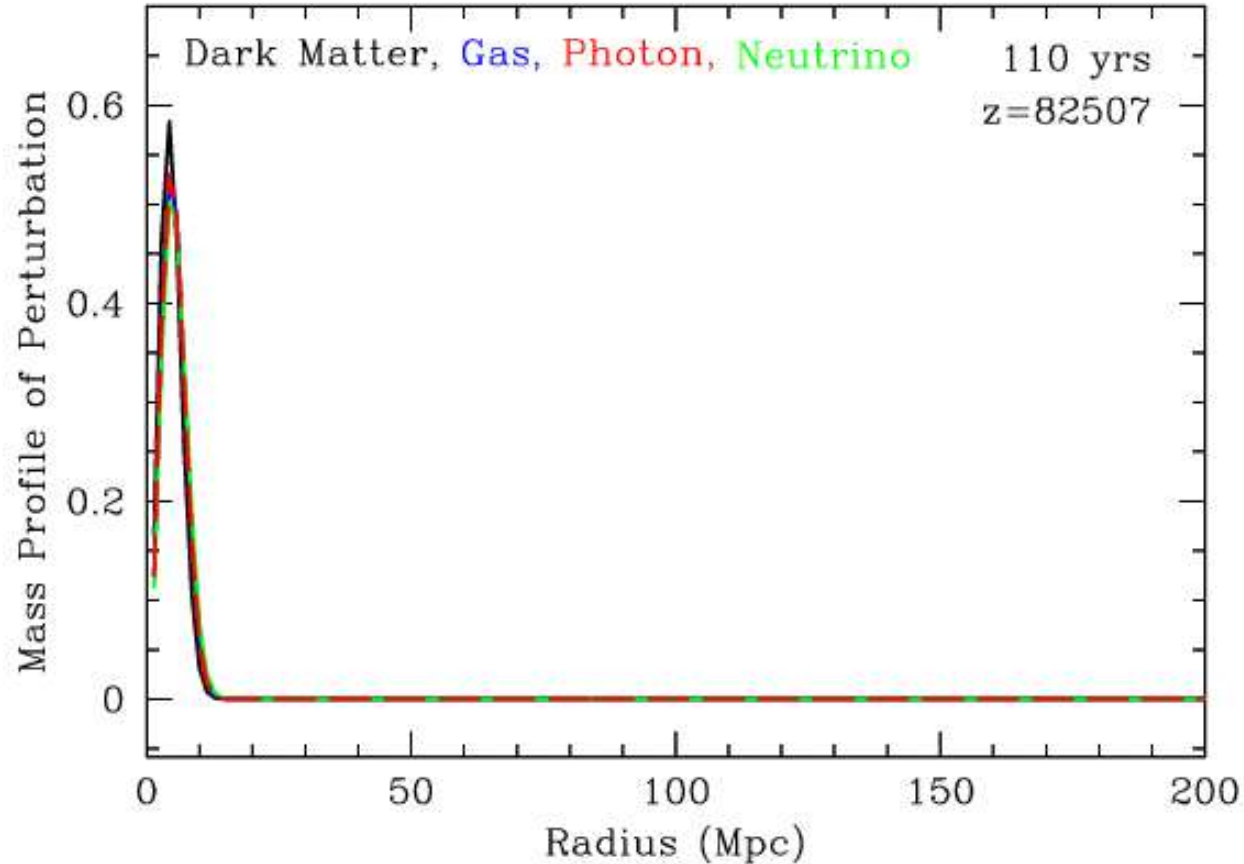
Oscillations acoustiques baryoniques



Fluctuation de densité
à la recombinaison



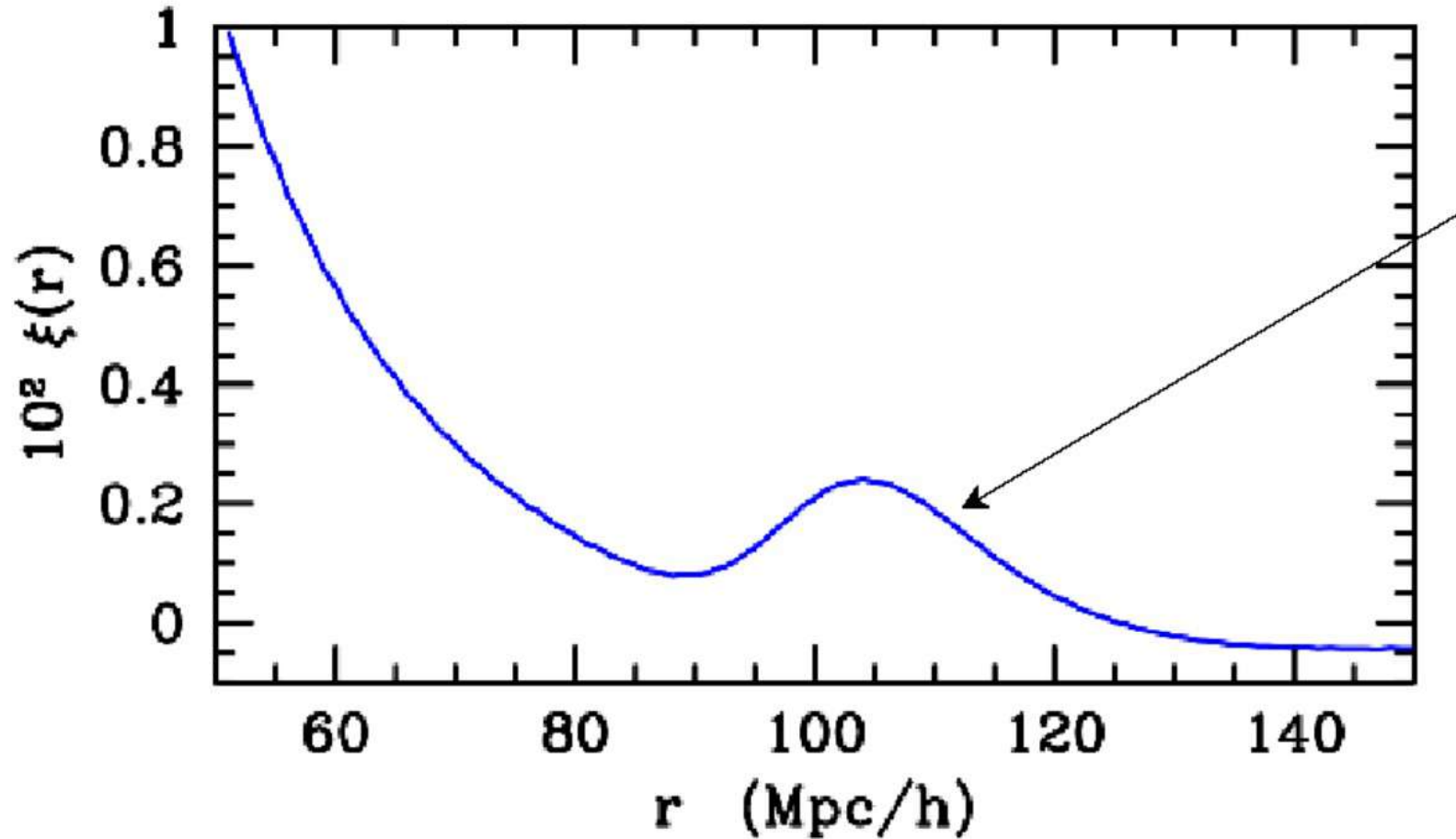
Propagation des fluctuations



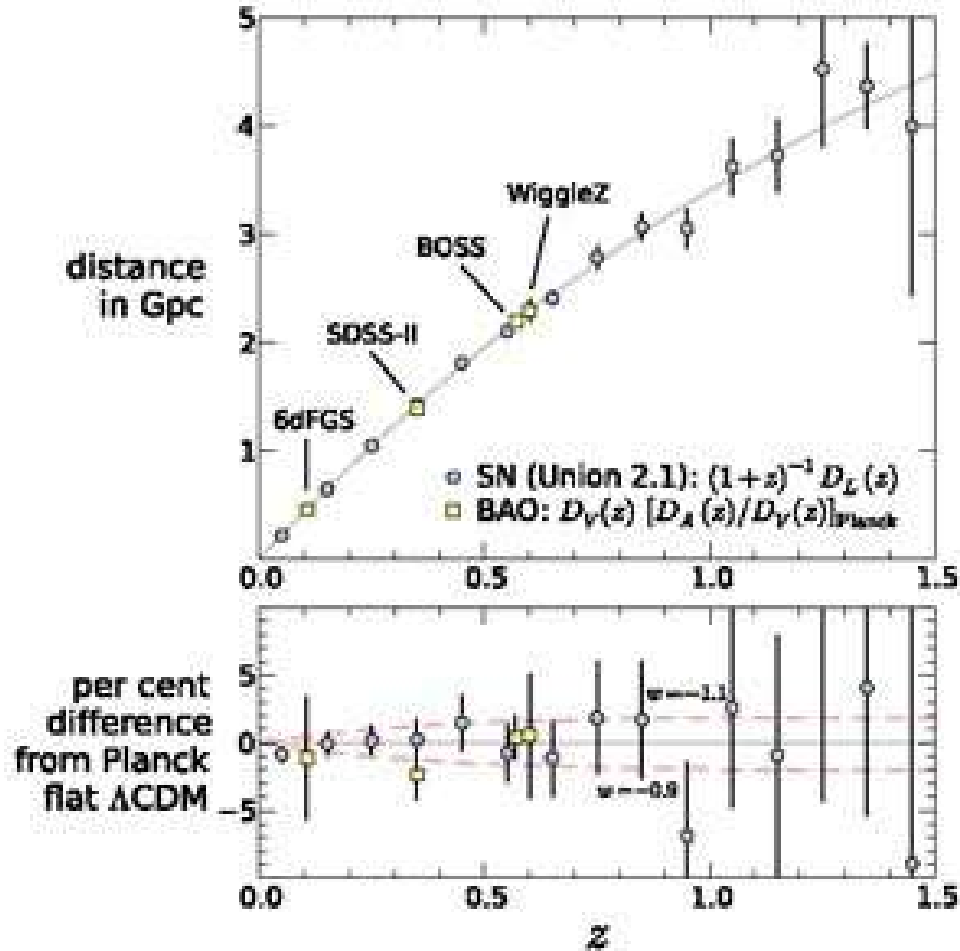
Analogie avec la pluie



Fonction de corrélation

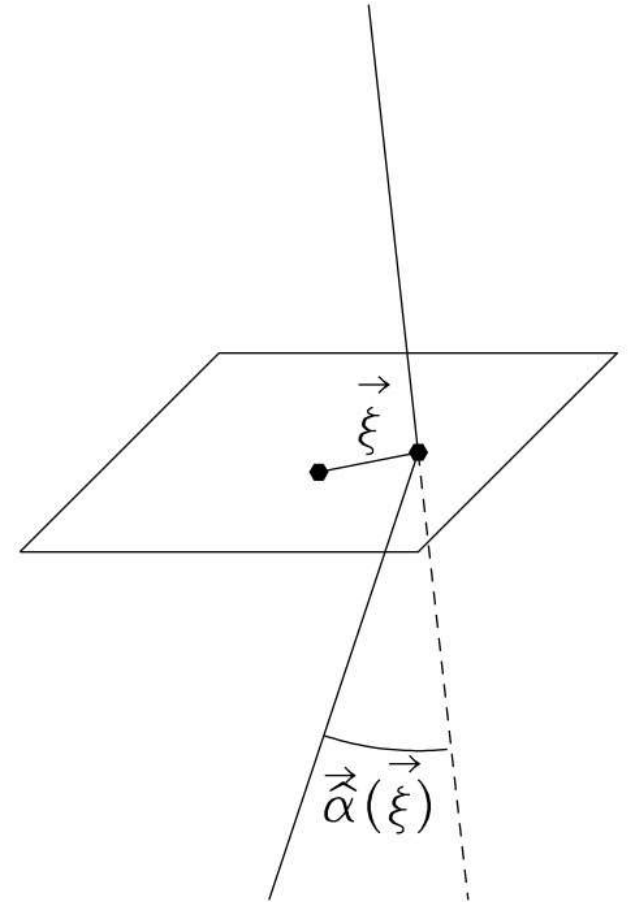


Relation distance – redshift



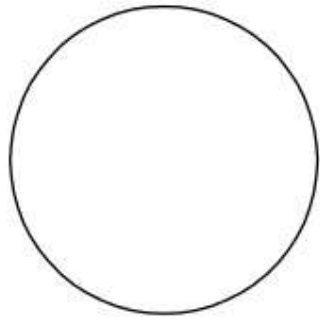
Lentilles gravitationnelles faibles

- La fonction de corrélation des galaxies ne prend en compte qu'une toute petite partie de la masse
 - Même pas toute la masse baryonique
- Toute masse dévie la lumière par effet de lentille gravitationnelle

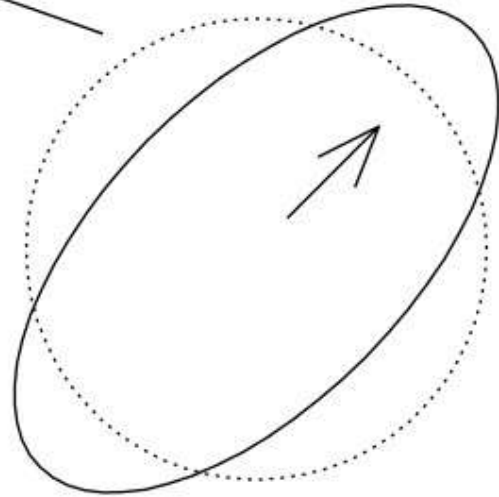


Déformation d'une source circulaire

Convergence uniquement

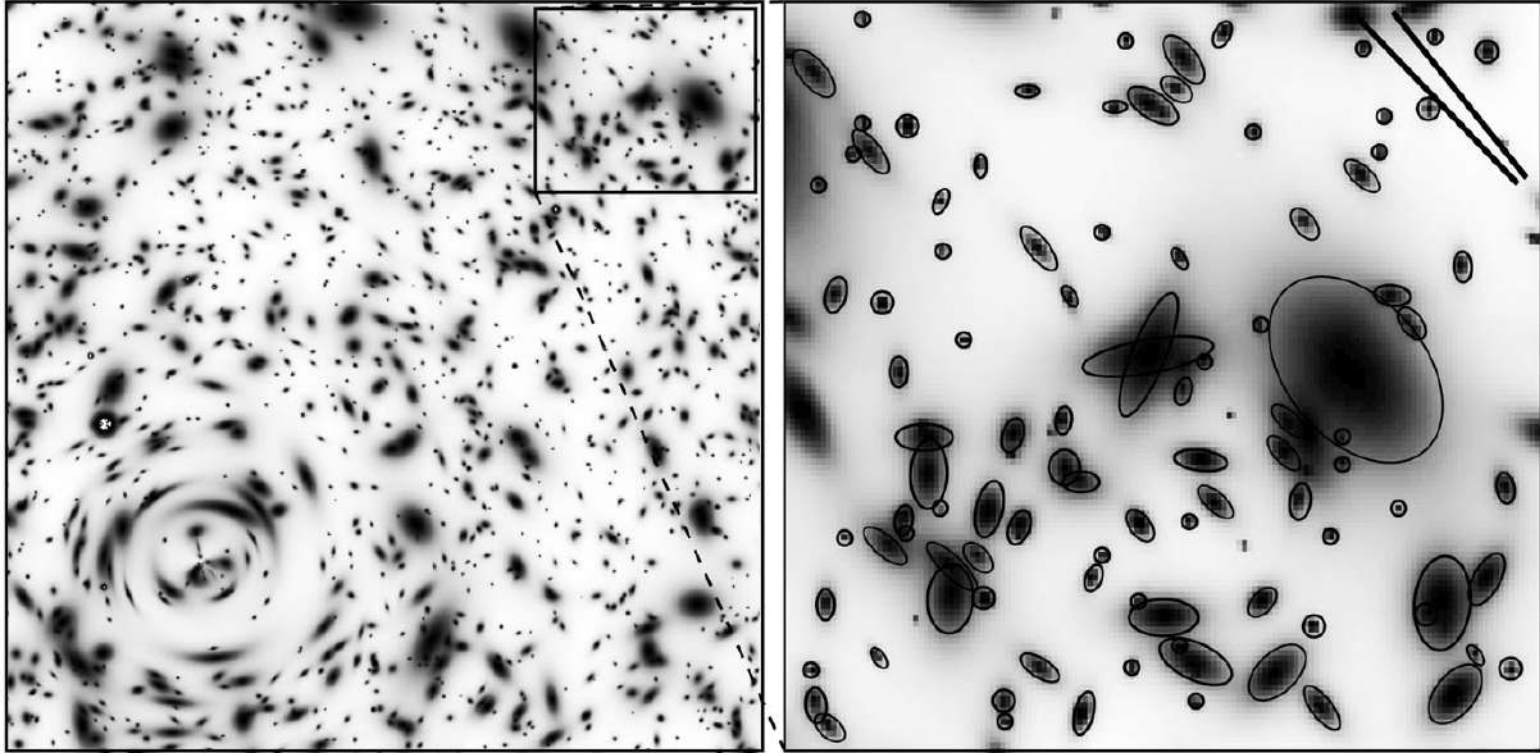


Source



Convergence + **Cisaillement**

Lentilles gravitationnelles faibles



Fonction de corrélation et lentilles

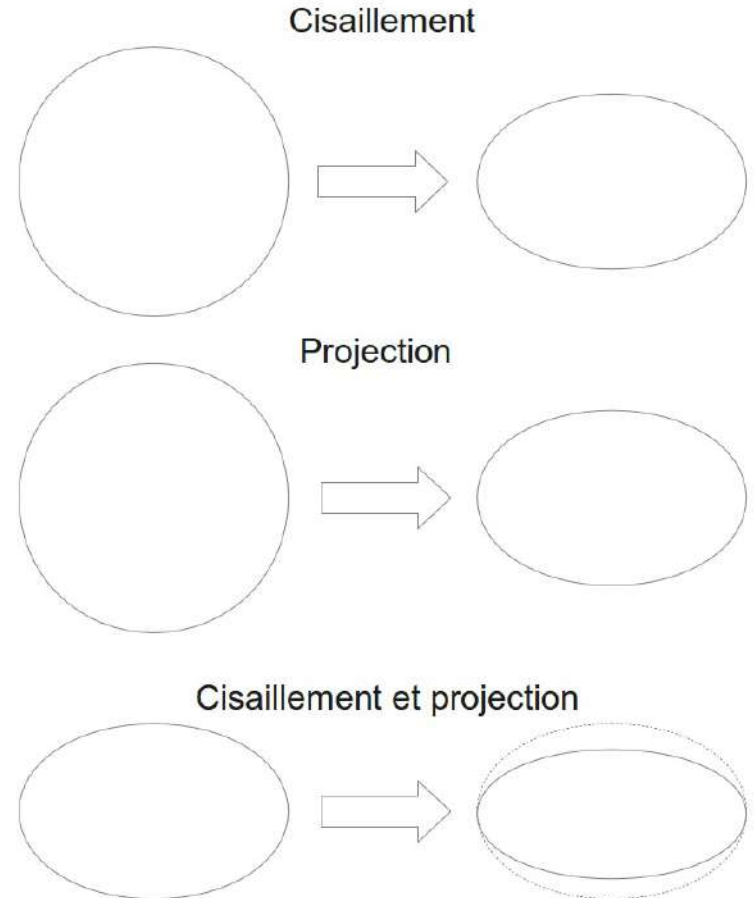
- On aimerait déterminer la fonction de corrélation de la densité
- La convergence est reliée à la densité par:

$$\kappa \sim \Delta\Phi = 4\pi G\rho$$

- Donc si on pouvait faire une carte de convergence, on obtiendrait directement une carte de masse
- Mais la convergence est difficile à estimer car on ne connaît pas la brillance des sources
- On peut cependant montrer que κ et γ ont la même fonction de corrélation
- Calculer la fonction de corrélation de γ nous donne donc la fonction de corrélation (et le spectre de puissance) de ρ

Cisaillement et projection

- On suppose que les galaxies sont raisonnablement circulaires
- On peut mesurer le cisaillement en mesurant l'ellipticité des galaxies
- Mais la projection sur le ciel transforme un cercle en ellipse de la même manière
- Mais la projection est statistiquement déterministe
- Il suffit donc de mesurer l'ellipticité de plusieurs galaxies proches (~ 30) et de les moyenner
- Difficile: l'ellipticité est de l'ordre de 0.1-1%
 - Mais pas impossible!



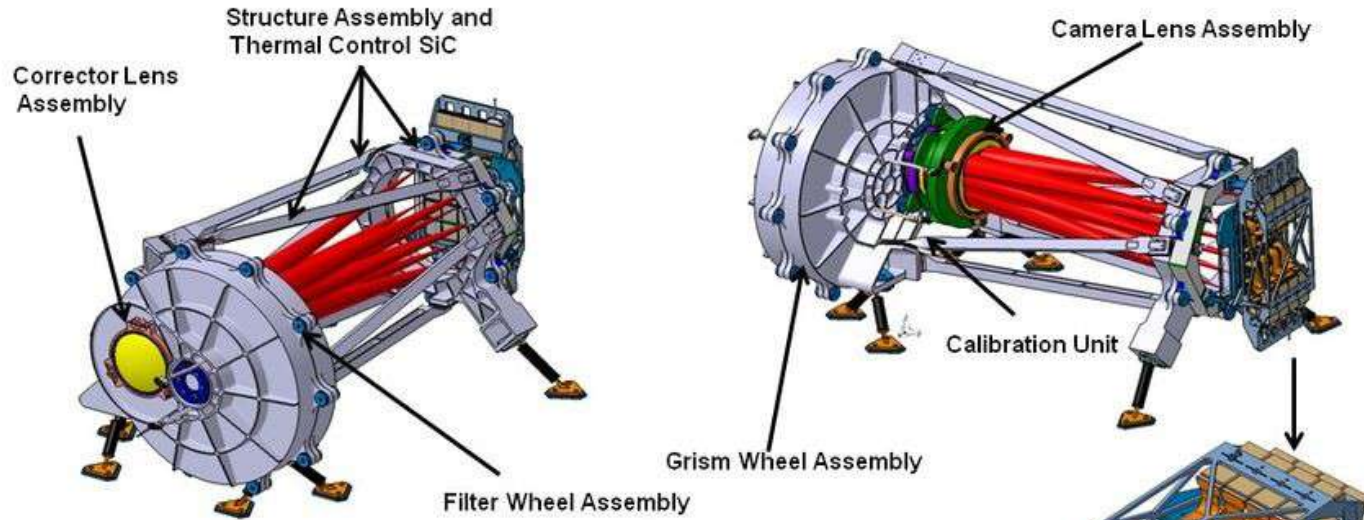


Euclid

- Mission européenne (ESA), lancée le 1er juillet 2023
- Actuellement en orbite autour du point L2
- Télescope de 1.2m
- Images de qualité «Hubble» sur 40% du ciel
- Forte implication de l'UNIGE



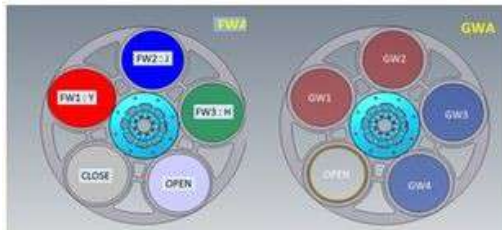
NISP: Near-Infrared Photometer and Spectrometer



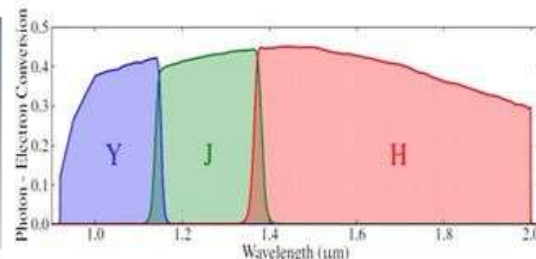
Matrice 4x4 de détecteurs HgCdTe 2kx2k

Imagerie et photométrie en trois bandes Y, J, H

Spectroscopie basse résolution 1.25-1.85 μm (+0.9-1.25 μm)



Filters and grisms positions in wheels

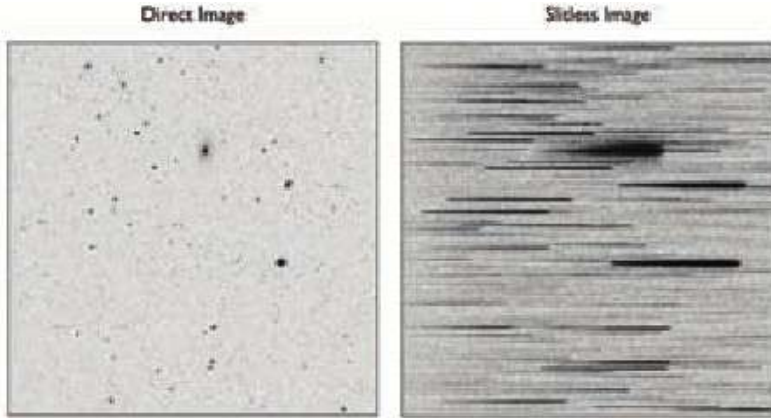


NISP throughputs through the Y, J and H filters



16 H2GR detectors

Spectroscopie sans fente

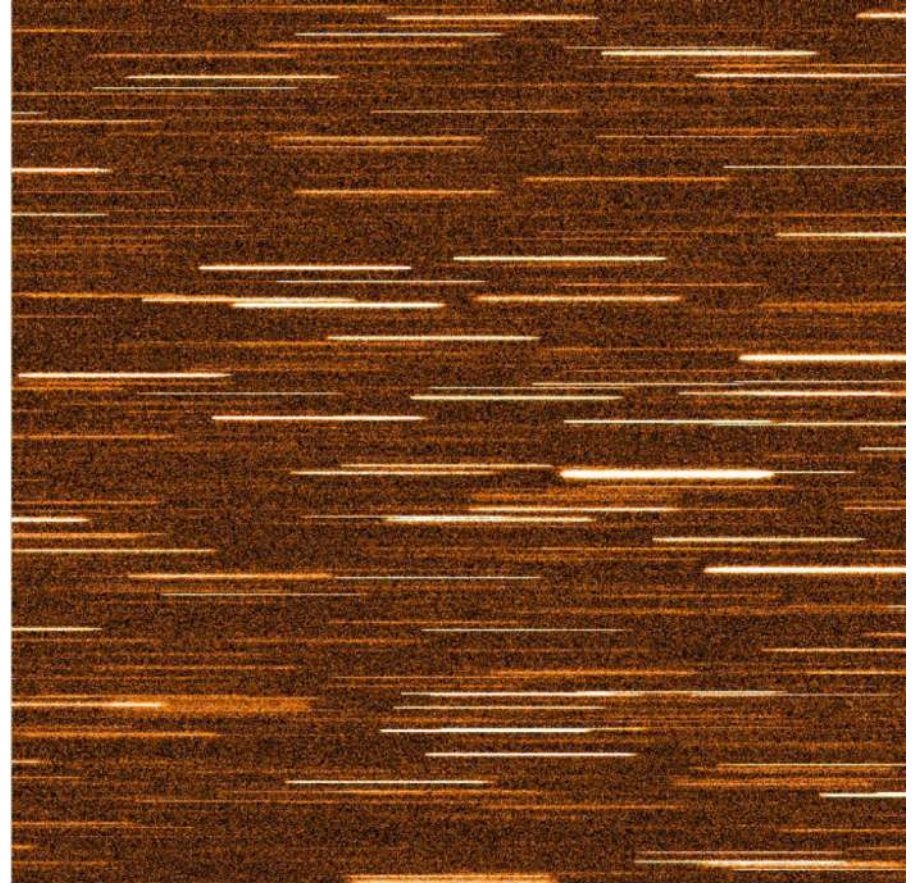


Avantages:

- Simplicité
- Pas de préselection de sources

Désavantages:

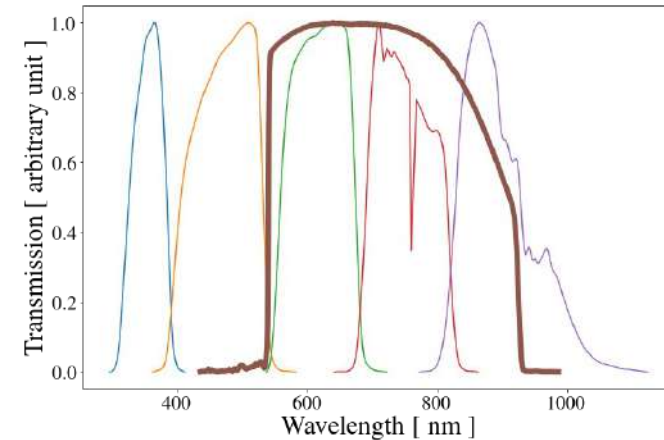
- Perte de spectres par superposition
- Bruit de fonds complexe à déterminer



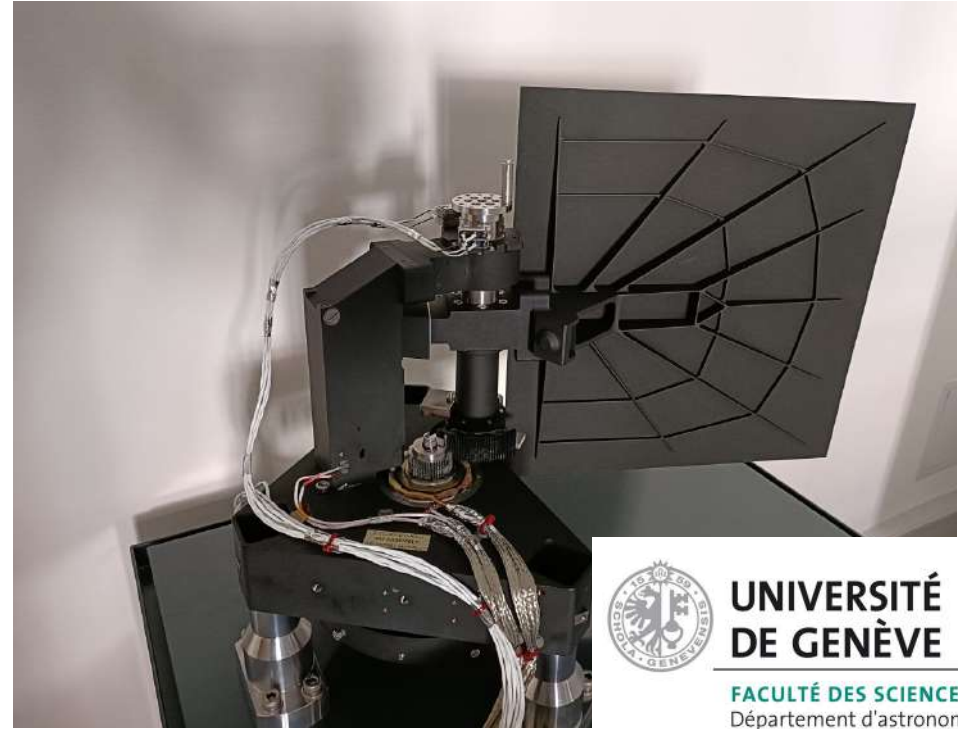
L'imageur VIS



- Matrice de 6x6 CCD 4kx4k
- Un seul filtre à large bande
- Résolution de 0.15 arcsec



Le Readout Shutter Unit de VIS



- Froid (170 K) – 14 kg – Haute fiabilité (500'000 opérations)
- Pas de moment ni couple exportés – Pas de microvibrations



UNIVERSITÉ
DE GENÈVE

FACULTÉ DES SCIENCES
Département d'astronomie

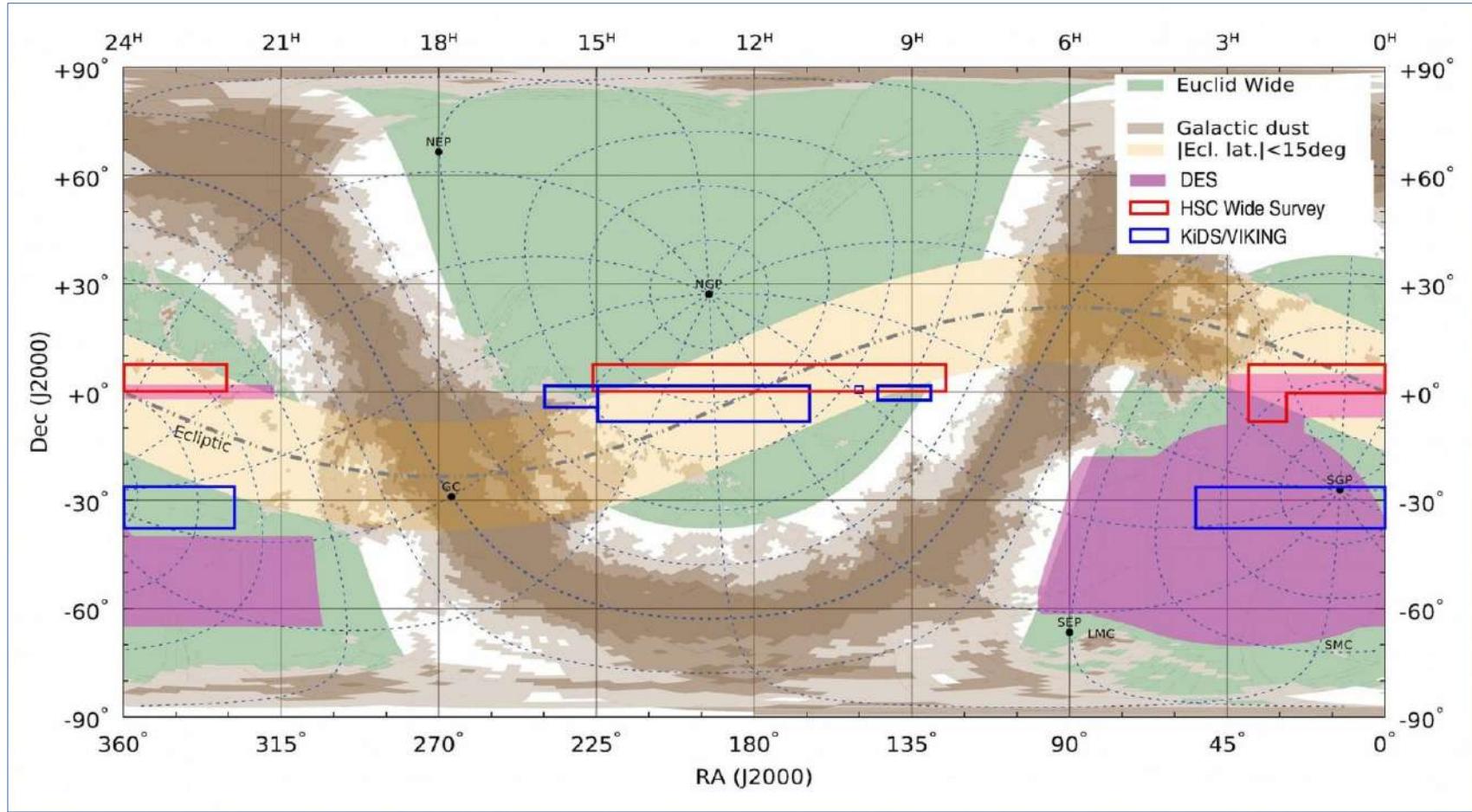
APCO
TECHNOLOGIES

Images Euclid





Le sondage Euclid Wide



La mission Euclid

- Mission de 7 ans
- Observation de $15'000 \text{ deg}^2$, par “tranche” de 3 “lunes”, avec une qualité “Hubble”
- Photométrie de ~ 10 milliards de galaxie
 - Quelques milliards pour le cisaillement
 - Trop nombreuses pour la spectroscopie: redshifts photométriques
- Redshifts spectroscopiques de quelques dizaines de millions
 - Fonction de corrélation, BAO