



SOCIÉTÉ
ASTRONOMIQUE
DE FRANCE

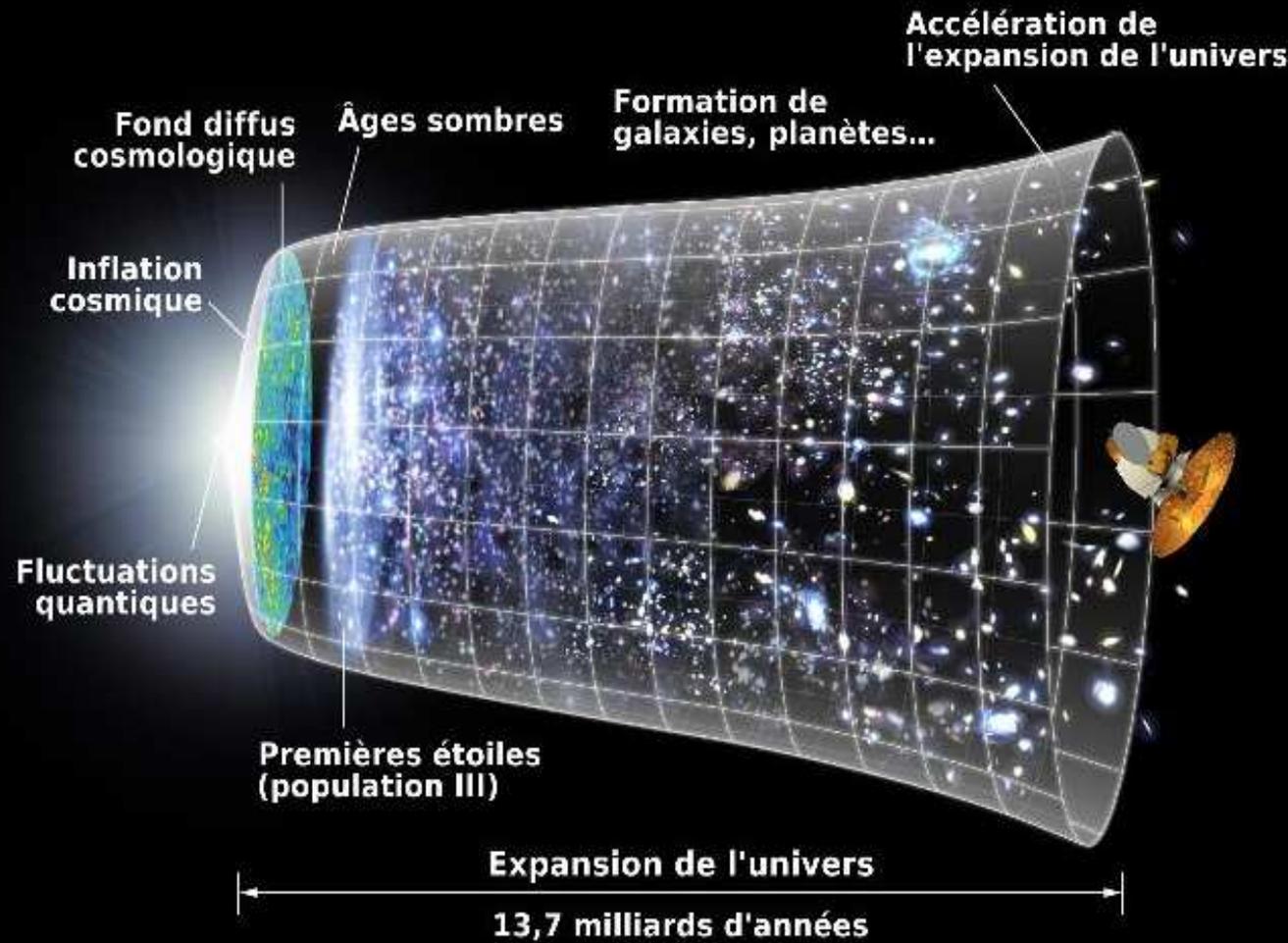
L'EXPANSION DE L'UNIVERS S'ACCÉLÈRE !

Qui appuie sur la
pédale
d'accélérateur ?

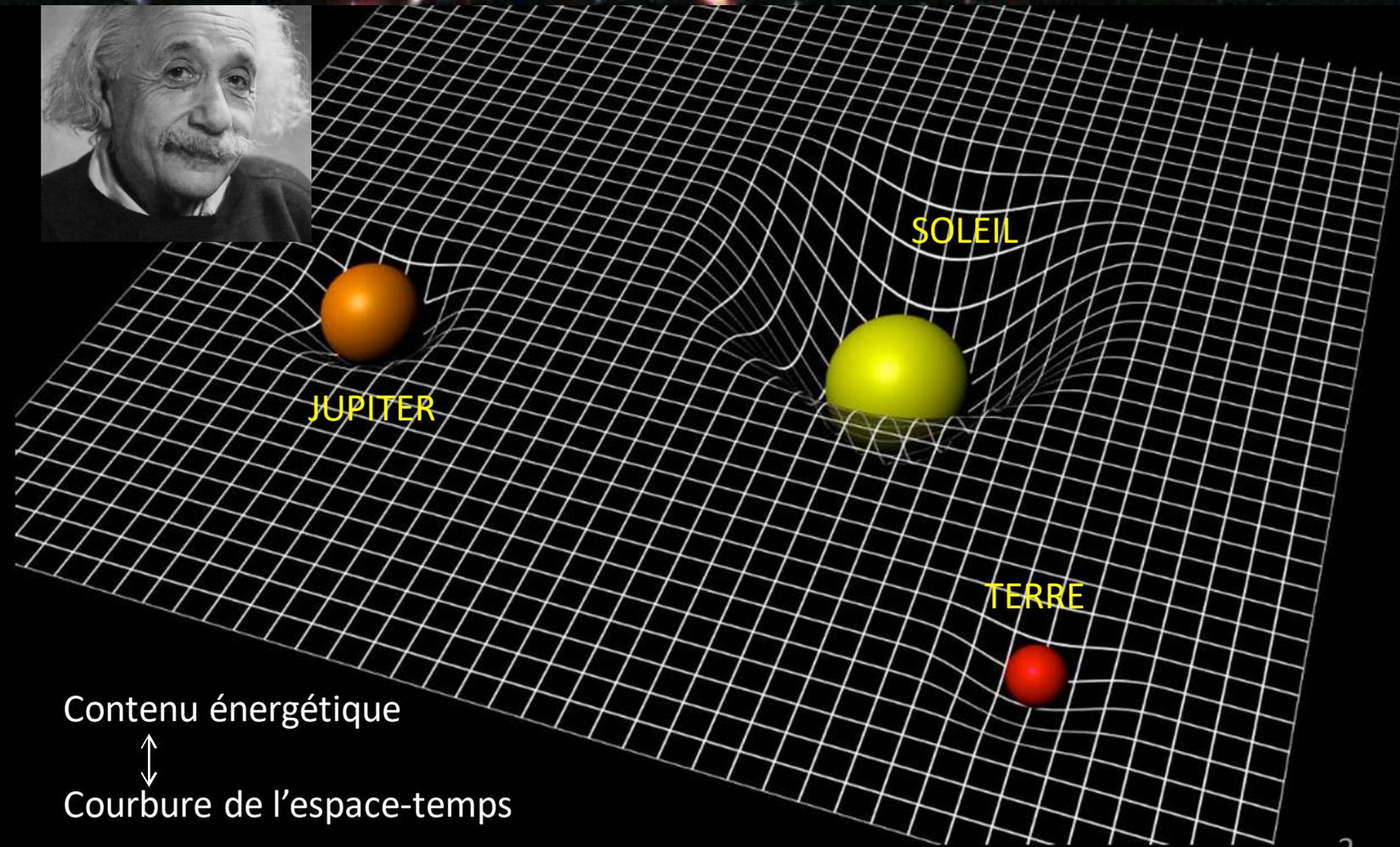
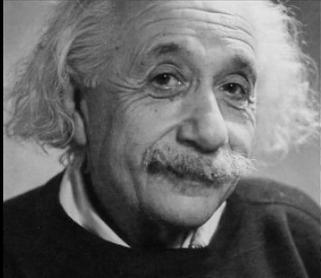
Pauline Zarrouk (LPNHE)

Conférence Société Astronomique de France – Samedi 11 décembre 2021

Notre histoire cosmique : univers en expansion



Cosmologie et Relativité Générale (1915)



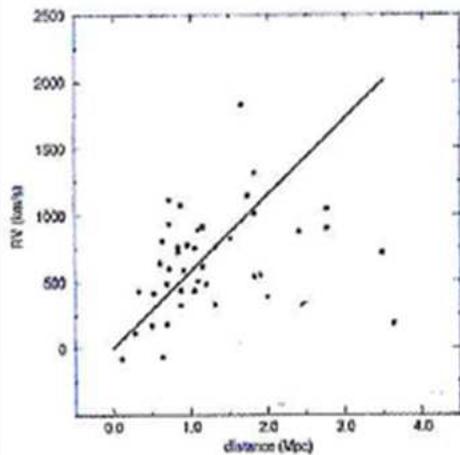
Contenu énergétique
↕
Courbure de l'espace-temps

Preuves de l'expansion de l'univers

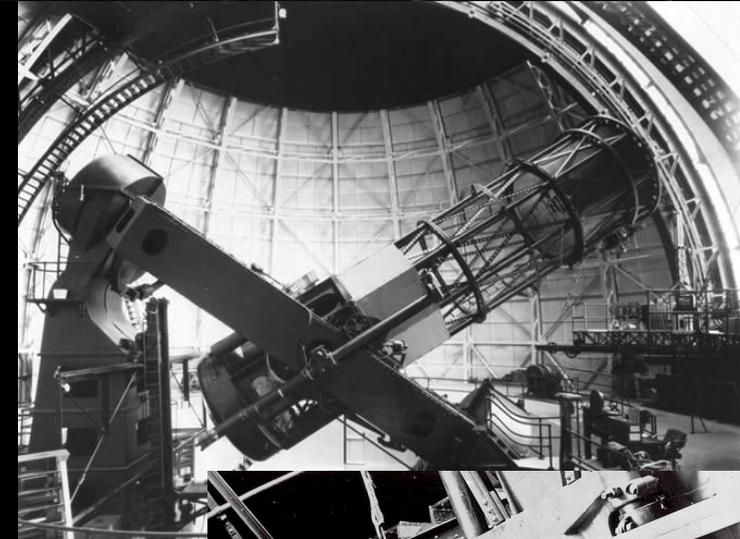
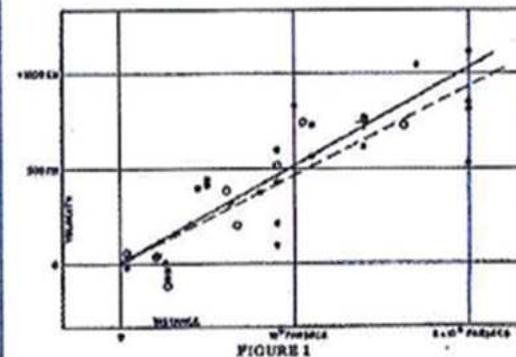
G. Lemaître prouve l'expansion de l'univers à partir de calculs théoriques (1919)



G. Lemaître (théorie)



E. Hubble (observations)



E. Hubble: 1^{ères} mesures de la distance et de la vitesse sur la ligne de visée pour un échantillon d'une vingtaine de galaxies (1929)

→ Plus une galaxie est loin, plus sa vitesse d'éloignement est élevée

Mesures de distance grâce aux Céphéides

Harvard College Observatory (1893)

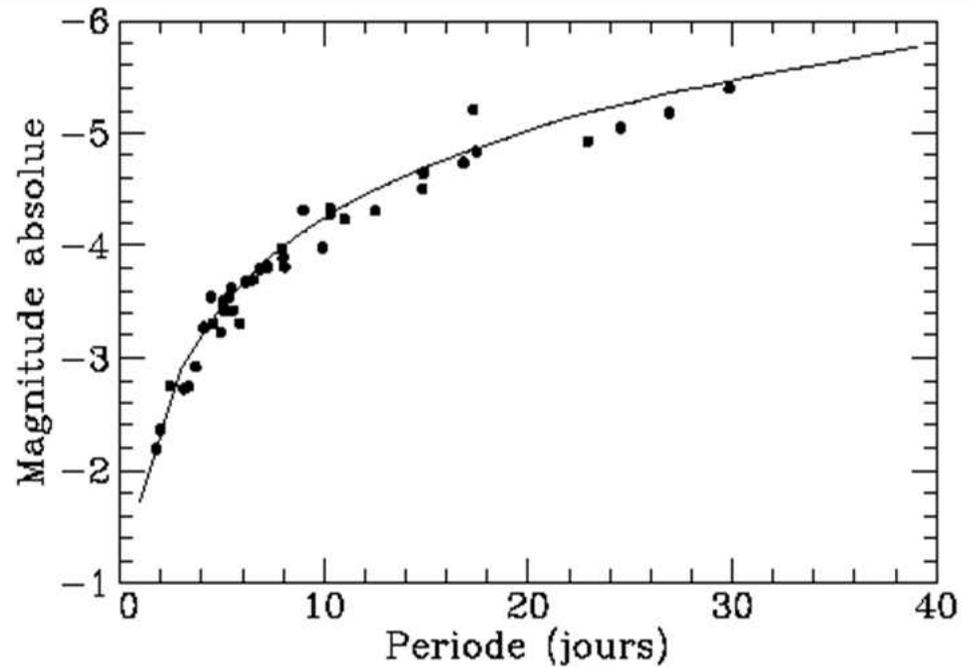


Henrietta Leavitt

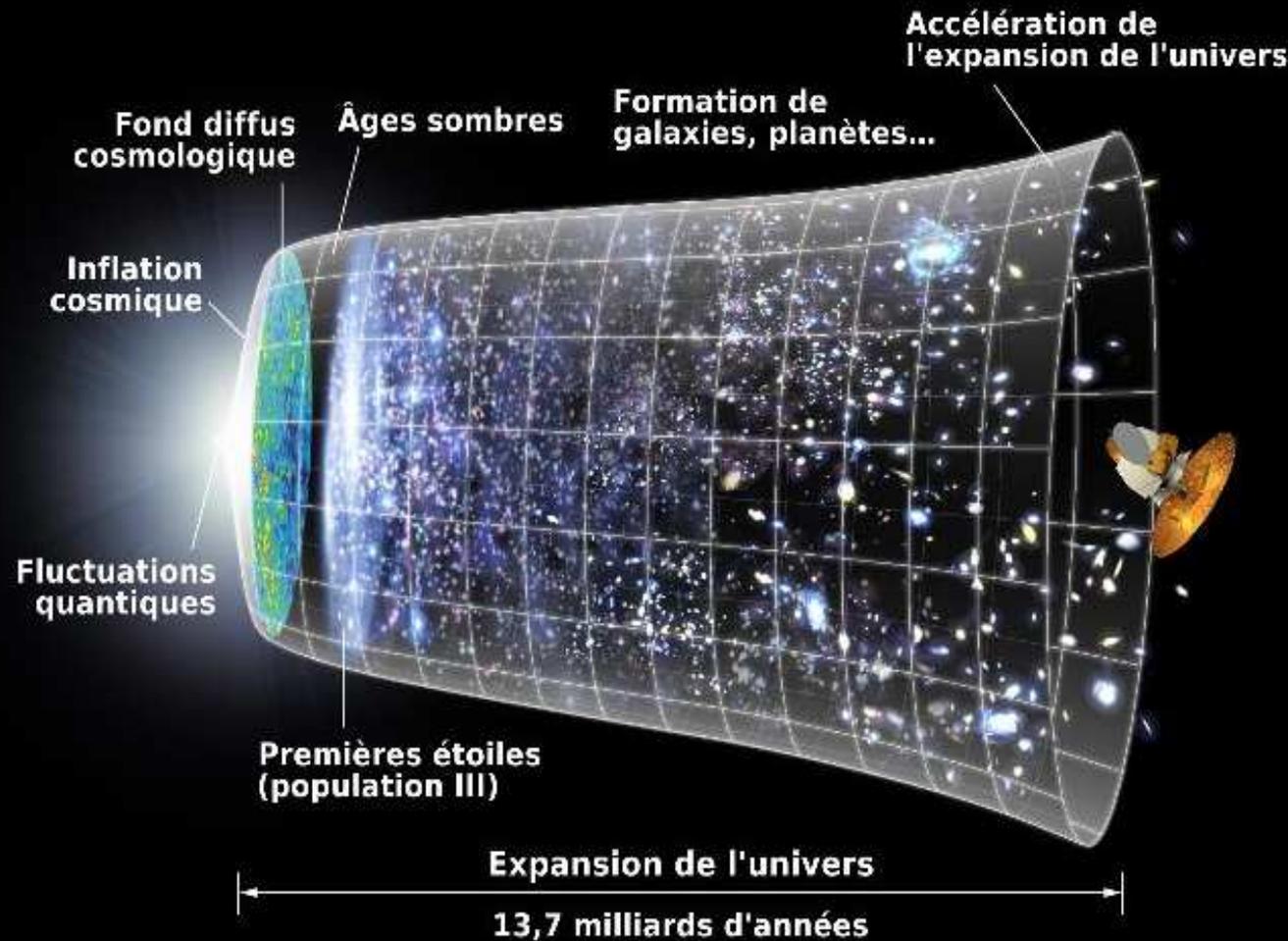


Détermination de la relation entre la luminosité et la période de pulsation des Céphéides (étoiles super-géantes) du grand nuage de Magellan

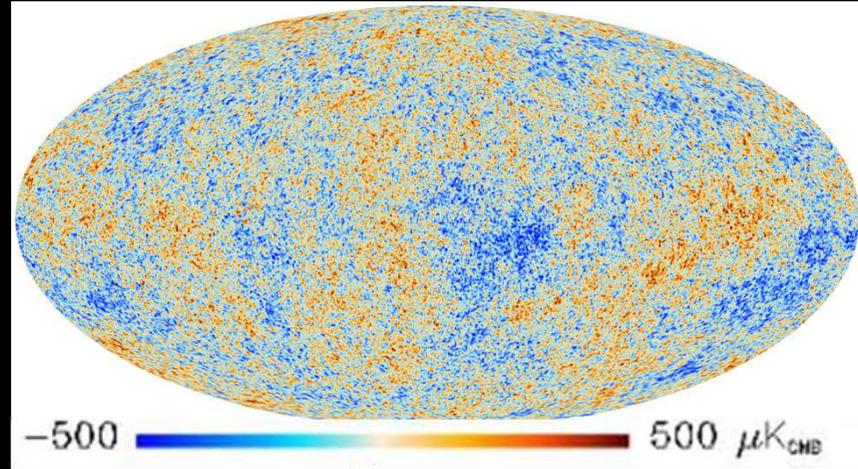
1 Mpc \sim 3 millions d'années-lumière \sim 3×10^{19} km



Notre histoire cosmique : formation des structures



La formation des grandes structures



Crédit : Planck

Univers primordial

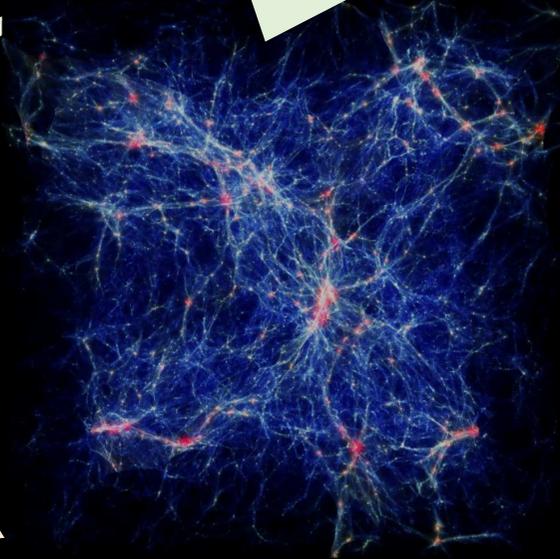
- Plus chaud et plus dense
- Variation de densité par rapport à la densité moyenne de l'ordre de 10^{-3}

La formation des grandes structures



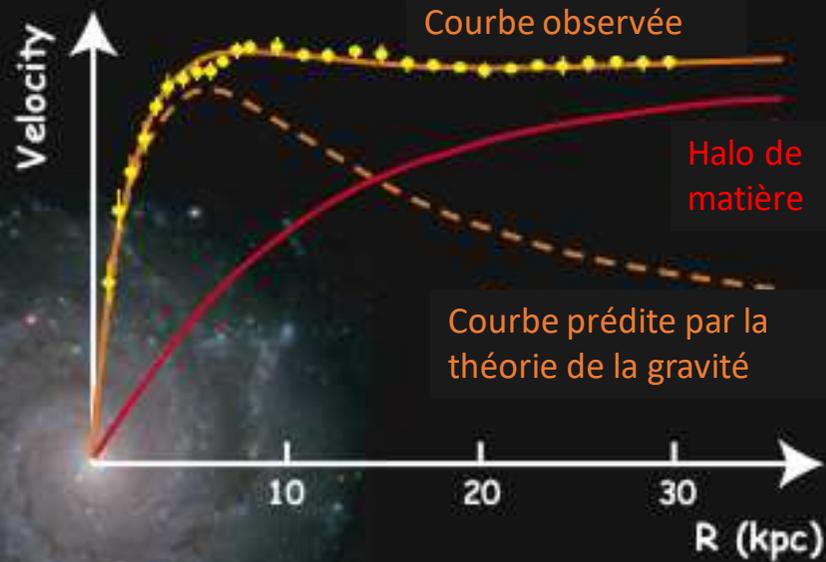
L'univers aujourd'hui

- Très inhomogène
- Hiérarchie de structures liées par interaction gravitationnelle
- Accélération tardive de l'expansion de l'univers ($z < 0.6$)



La matière noire

Etude de la vitesse de rotation des étoiles autour du centre galactique



Voie Lactée:

$$M_{\text{halo}} \sim 10 \times M_{\text{visible}}$$



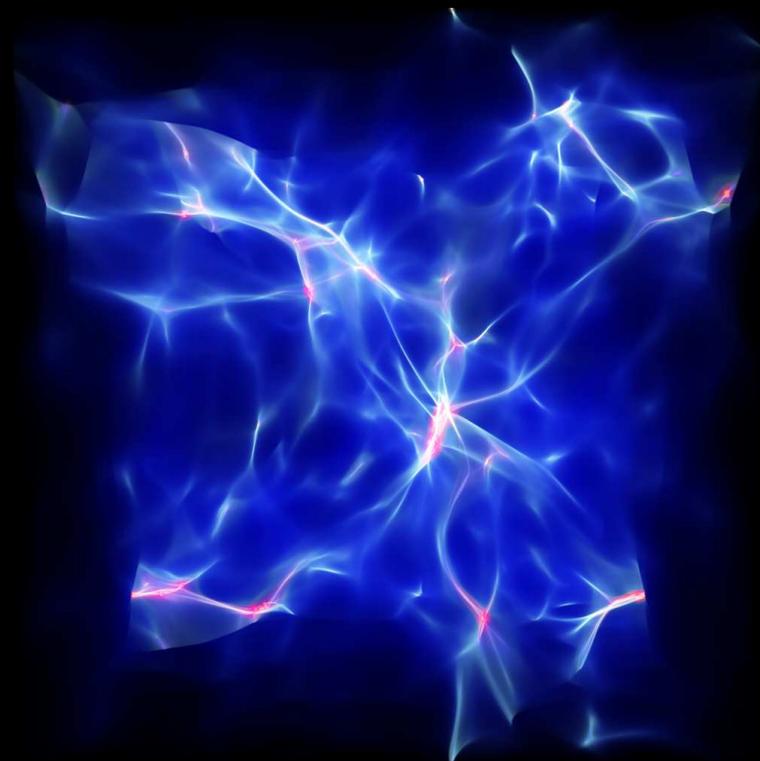
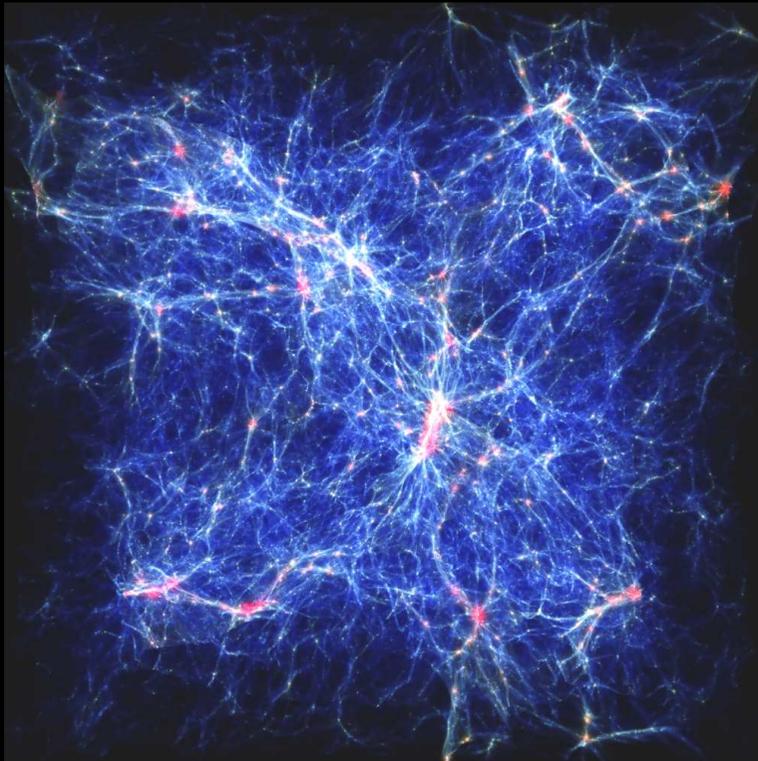
Rotation à
vitesse constante



Halo de
MATIÈRE NOIRE

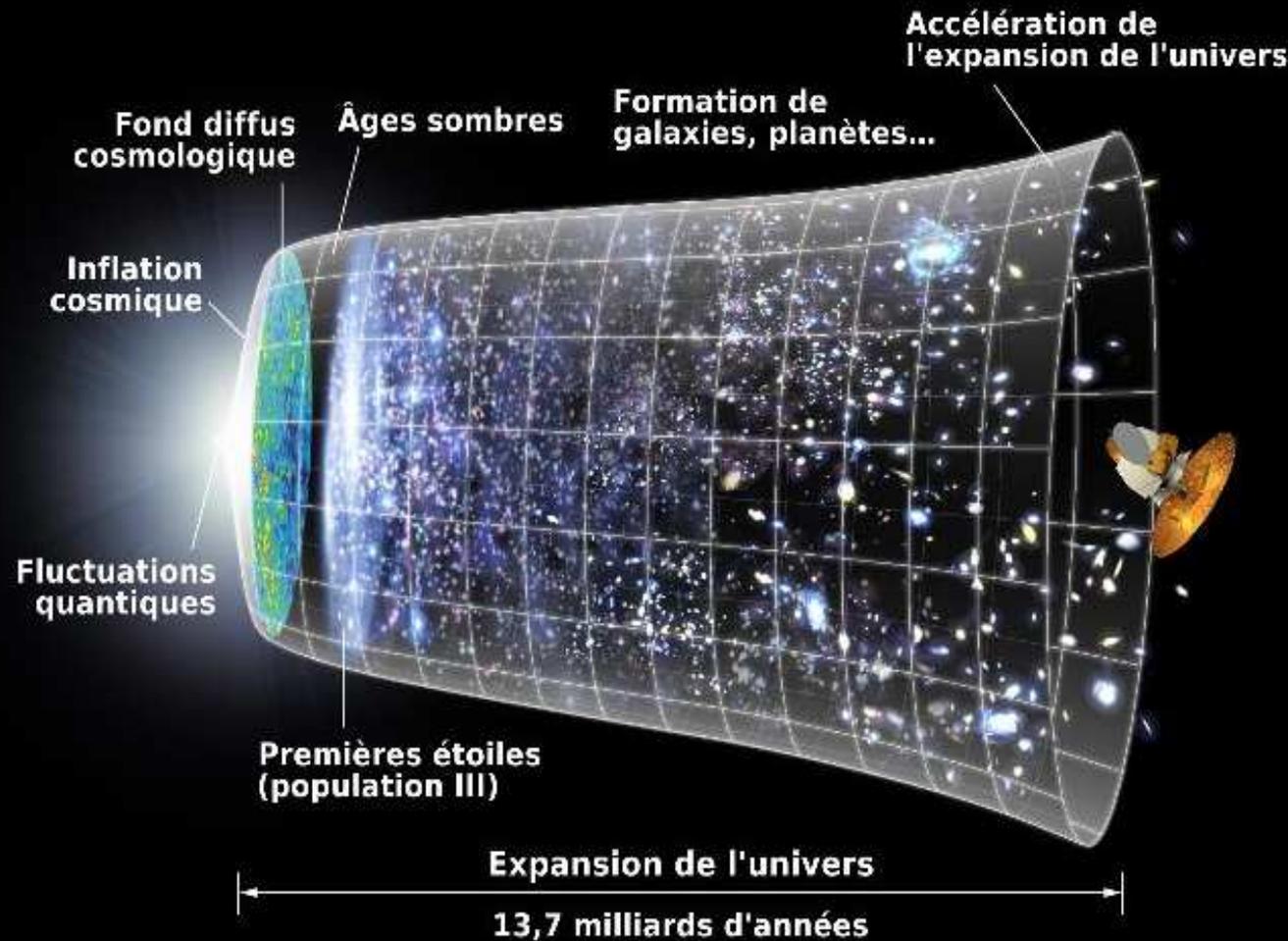
Etudier la matière noire avec les structures de l'univers

Effet de de la **matière noire froide (gauche)** et **chaude (droite)** sur les structures de l'univers
(obtenu à partir de simulations cosmologiques)



→ Scénario de la matière noire froide en accord avec les données

Notre histoire cosmique : accélération de l'expansion



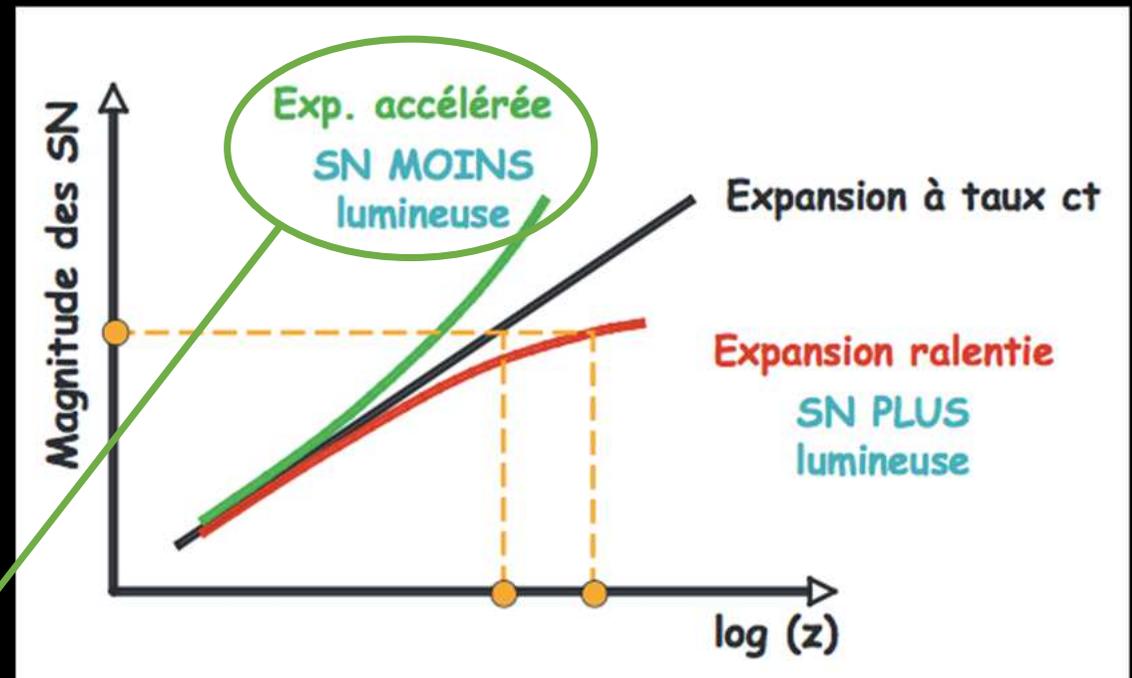
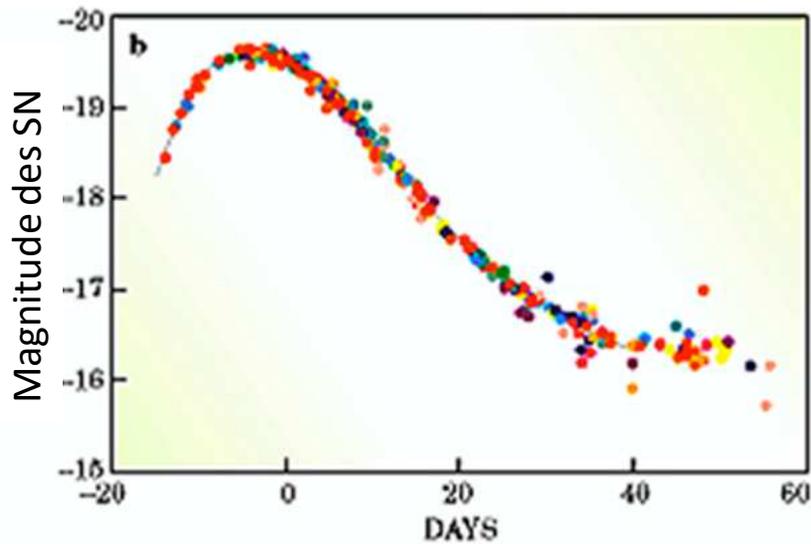
Accélération de l'expansion de l'univers

Supernovae de Type Ia (SN Ia) : explosion d'une naine blanche dans un système binaire

→ Chandelles standard : même conditions d'explosion, même *courbe de lumière*

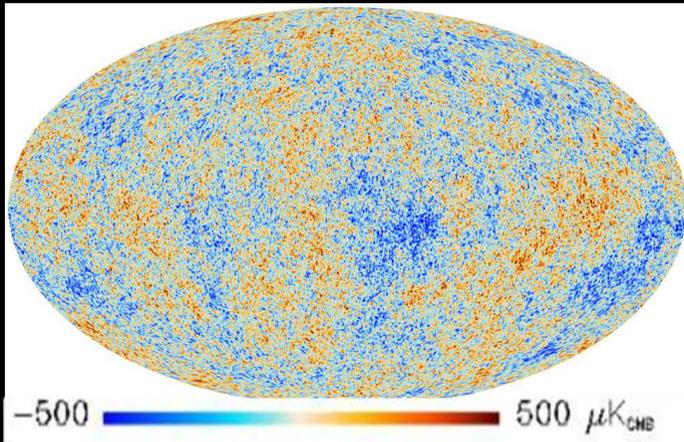
→ Mesurer la vitesse d'expansion de l'univers à partir de la luminosité des SN Ia en fonction du *redshift*

Courbes de lumière des SN



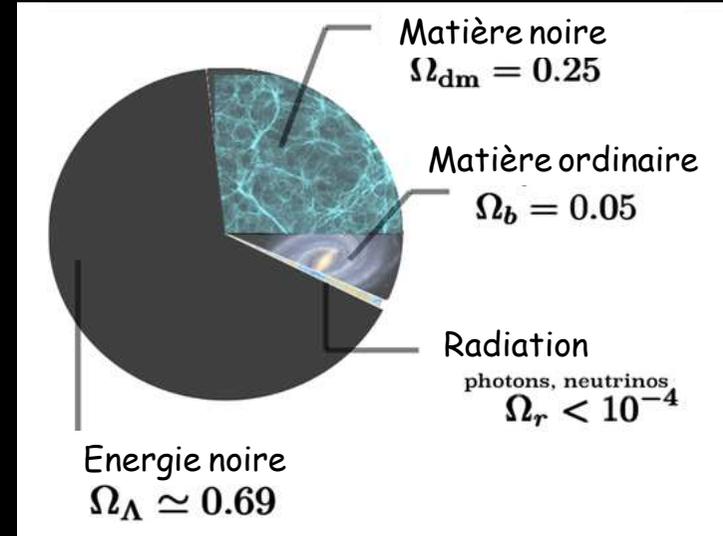
Découverte de l'accélération de l'expansion de l'univers en 1998

Le modèle actuel de la cosmologie



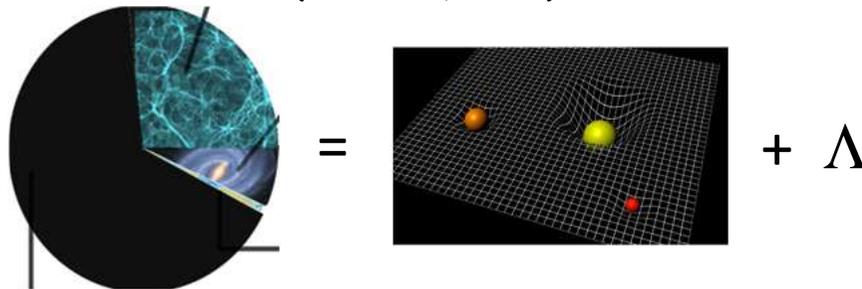
Conditions initiales à partir du fond diffus cosmologique + inflation

Contenu énergétique actuel



Relativité Générale avec constante cosmologique

Théorie de la gravitation : relativité générale (Einstein, 1915)



Contenu énergétique = géométrie de l'espace-temps + constante

Qui appuie sur la pédale d'accélérateur ?

Approche 'Energie noire'

Quelles sont les propriétés de l'énergie noire ?

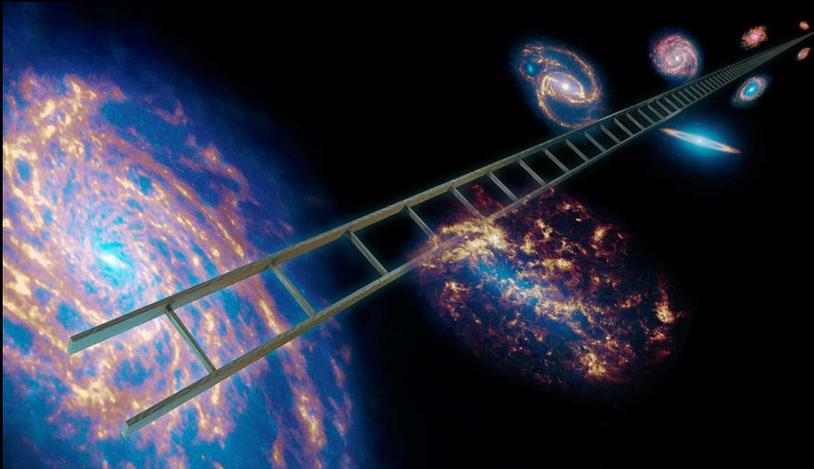
→ Mesurer l'évolution des distances au cours du temps

Constante cosmologique

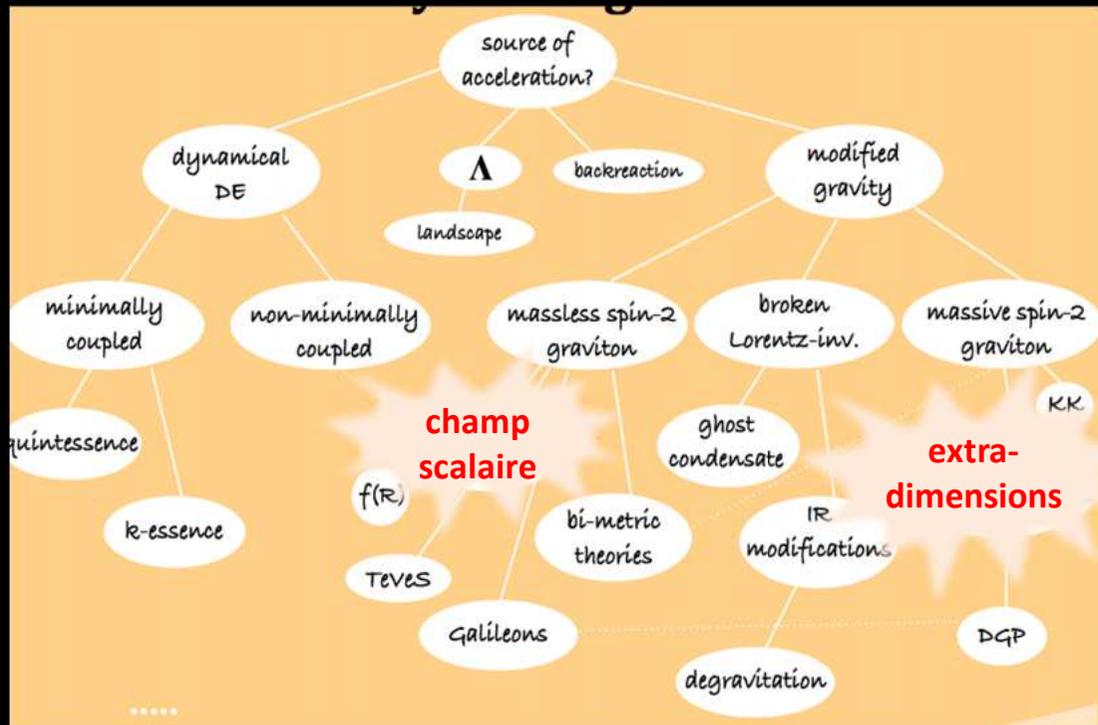
$$w_{\Lambda} = \frac{p_{DE}}{\rho_{DE}} = -1$$

Energie noire

$$w = w_0 + w_a (1 - a(t))$$



Qui appuie sur la pédale d'accélérateur ?

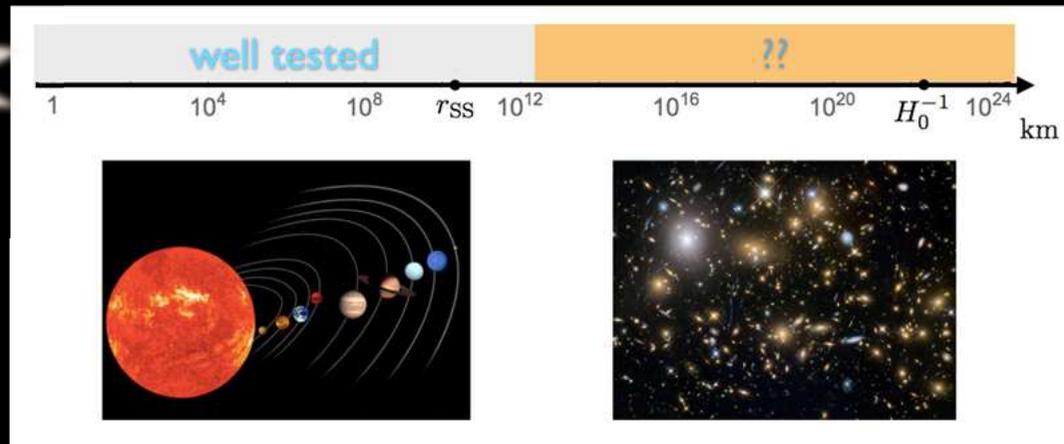


Approche 'Gravité modifiée'

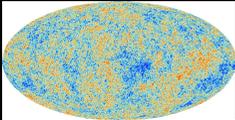
(uniquement les modèles sans Λ)

La relativité générale est-elle valable aux échelles cosmologiques ?

→ Tester la croissance des structures



Les sondes cosmologiques



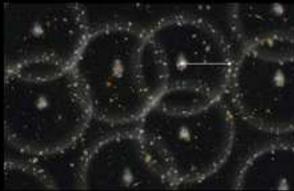
Fond diffus cosmologique

→ Mesure des **conditions initiales**



Supernovae de type Ia

→ Mesure du **taux d'expansion actuel/local** : H_0



Structuration des galaxies

→ **Evolution du taux d'expansion $H(z)$, croissance des structures**



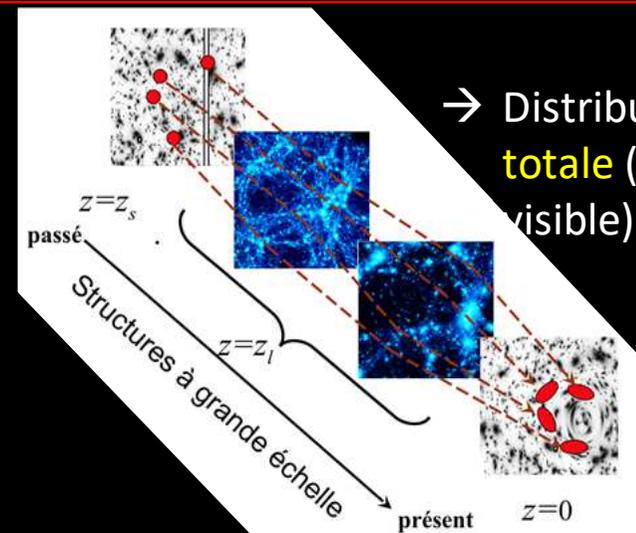
Effet de lentille gravitationnelle faible



Effet de lentille gravitationnelle fort

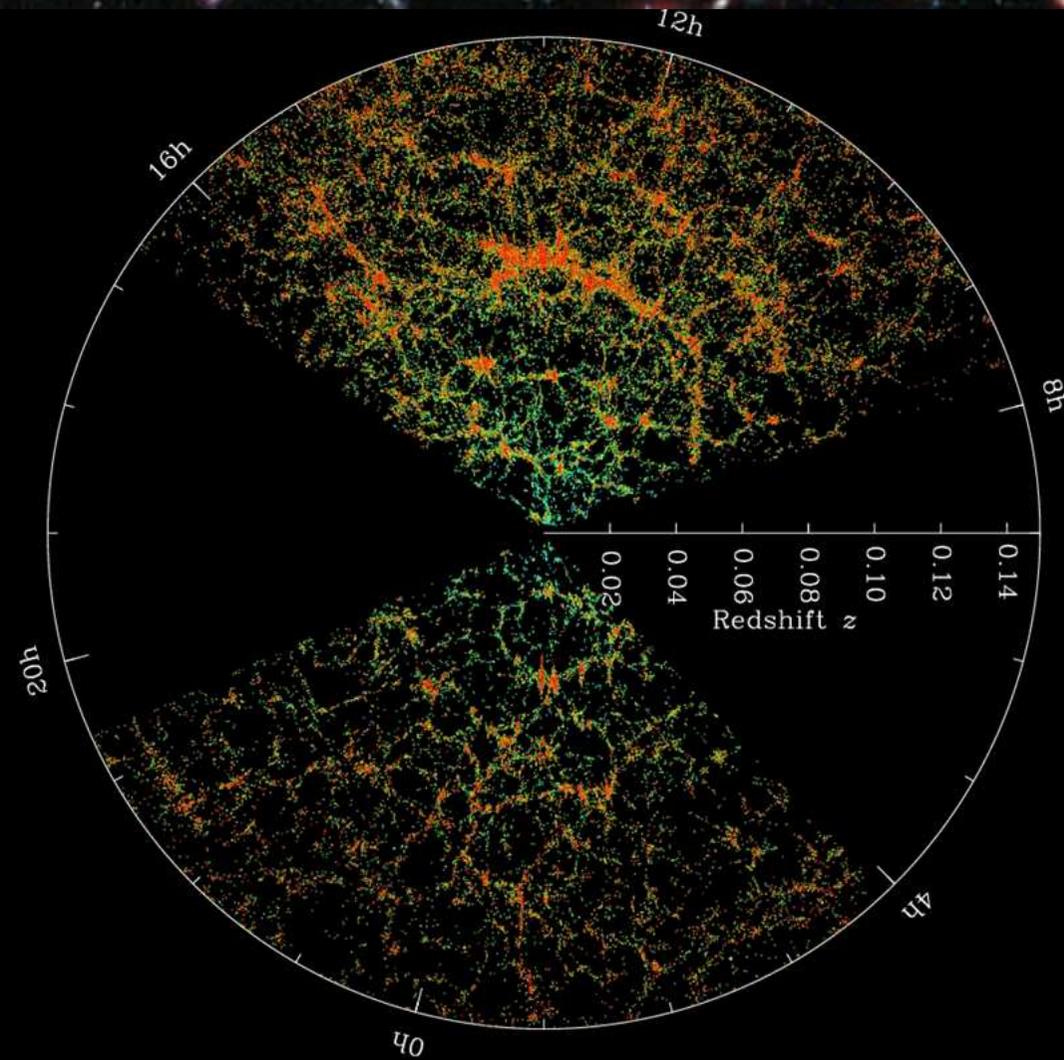


Amas de galaxies



→ Distribution de la **matière totale** (pas uniquement visible)

La structuration des galaxies (clustering)



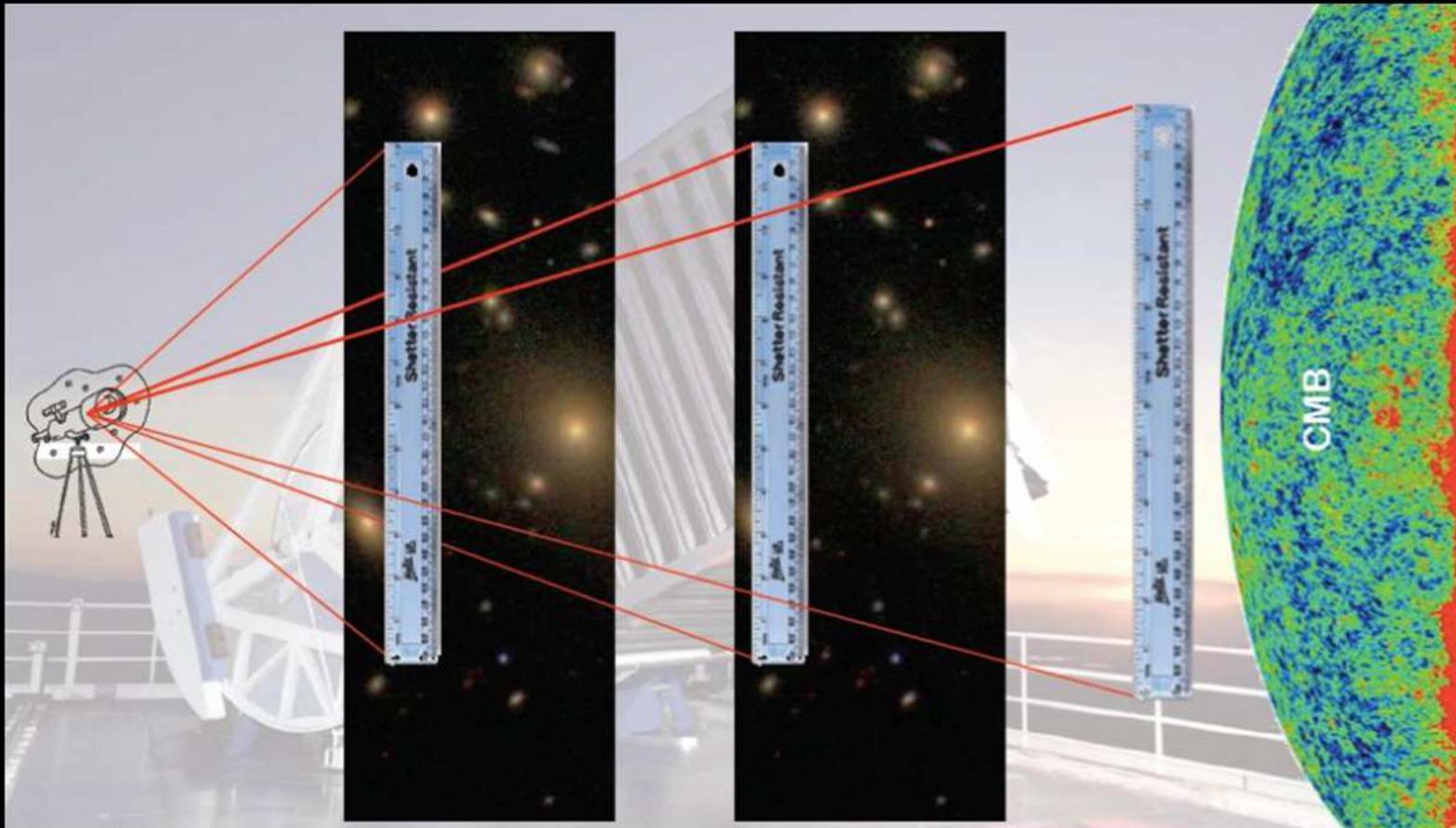
Grands relevés de galaxies → **cartographie 3D**

- Deux coordonnées angulaires
- Une coordonnée de distance le long de la ligne d'observation (redshift)

Distribution spatiale des galaxies non uniforme :

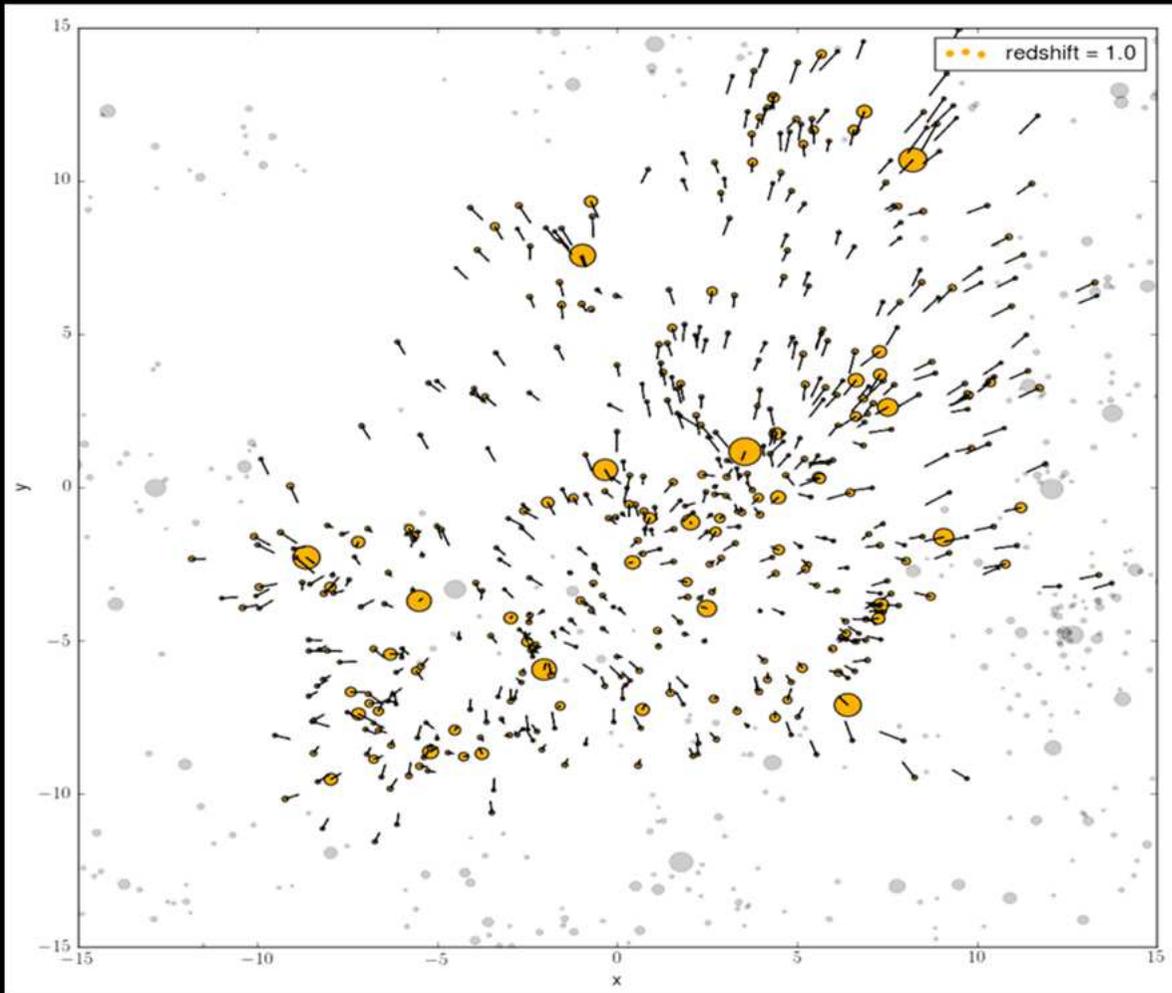
- régions avec beaucoup de galaxies → « clusters »
 - régions avec peu de galaxies → vides
- Contraste de densité

La structuration des galaxies (clustering)



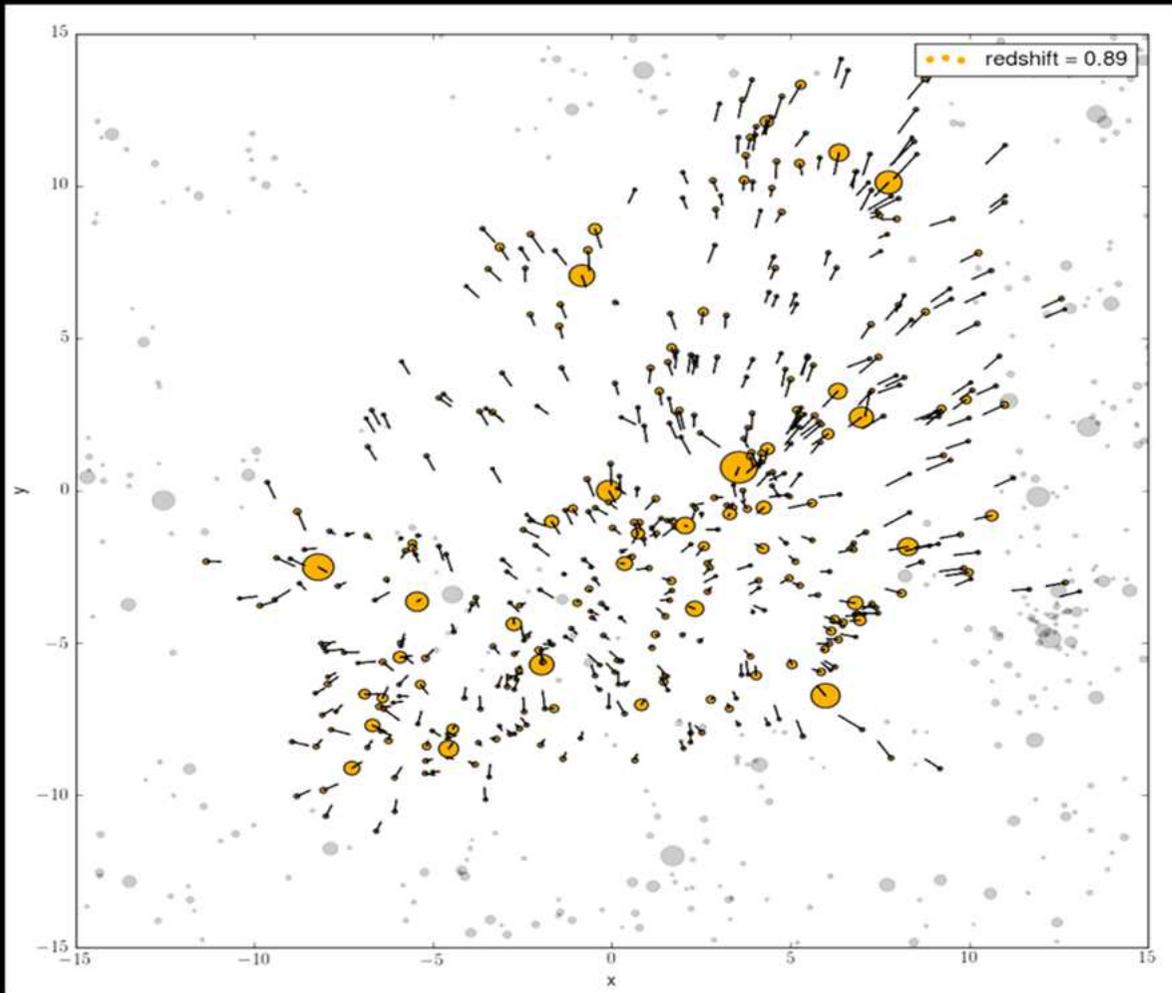
→ Distance caractéristique entre deux galaxies comme une règle standard pour mesurer l'évolution des distances entre les galaxies au cours du temps et pour retracer l'histoire de l'expansion de l'univers

La structuration des galaxies (clustering)



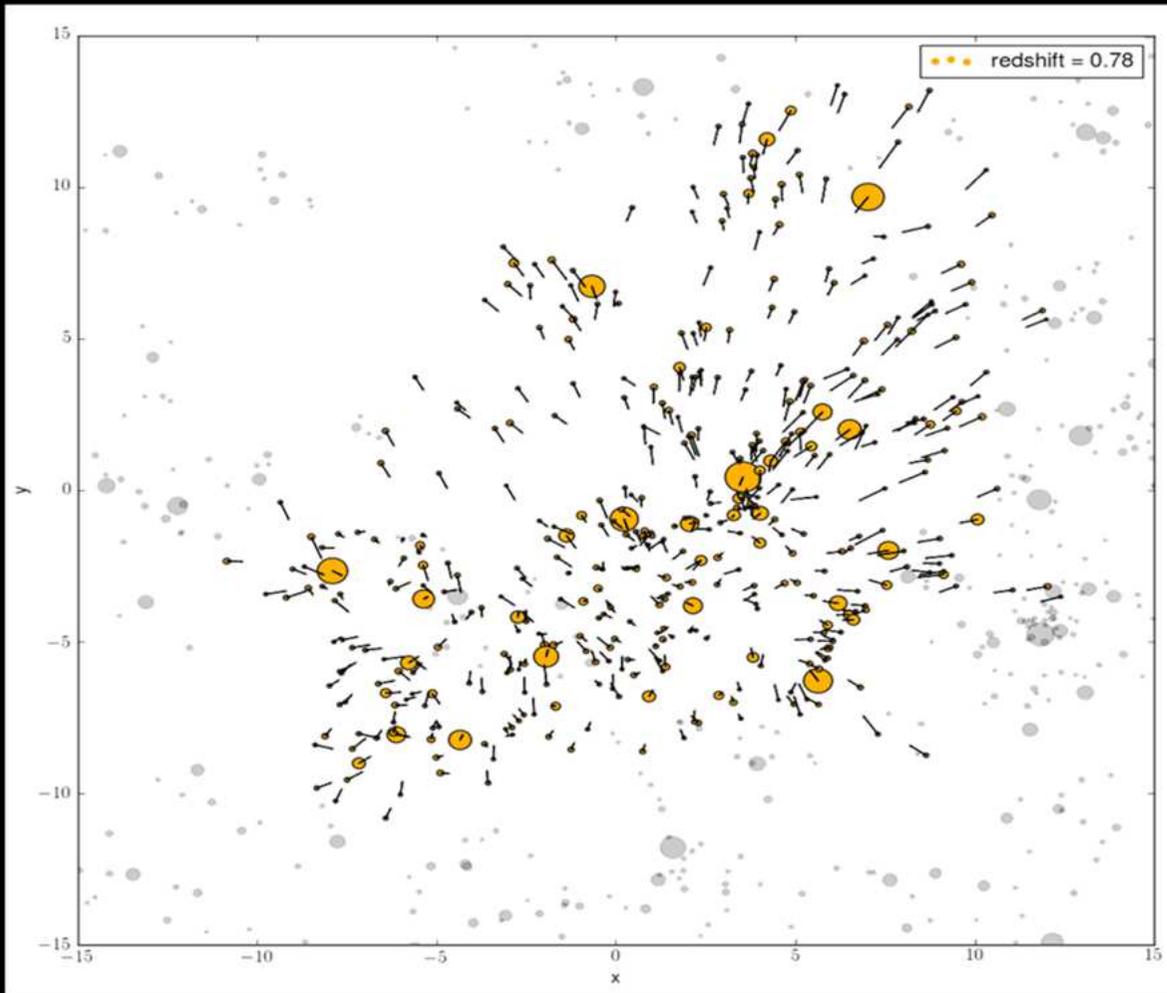
Chaque point représente une galaxie simulée et chaque point a une flèche qui représente la **vitesse propre de la galaxie**

La structuration des galaxies (clustering)



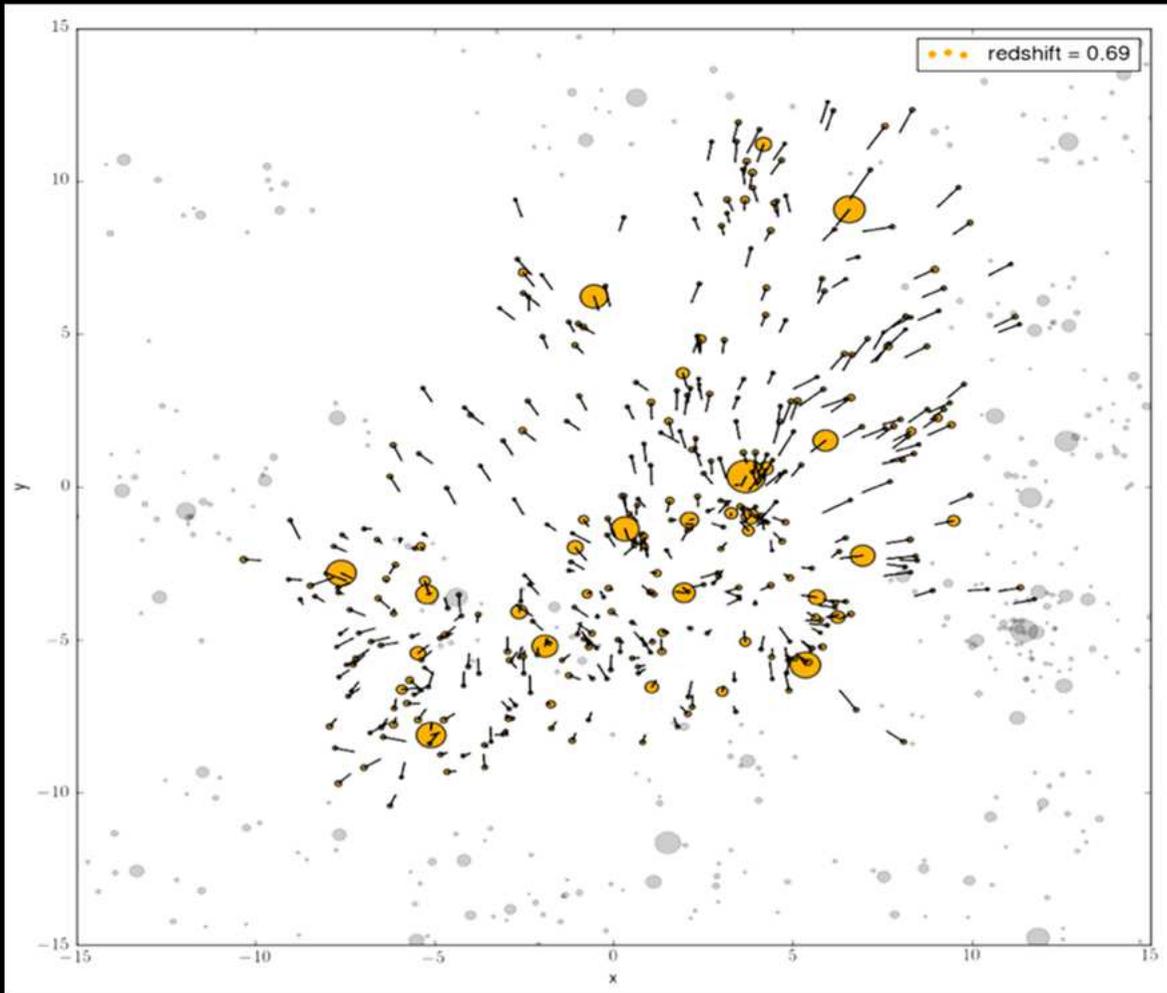
Chaque point représente une galaxie simulée
et chaque point a une flèche qui représente la
vitesse propre de la galaxie

La structuration des galaxies (clustering)



Chaque point représente une galaxie simulée
et chaque point a une flèche qui représente la
vitesse propre de la galaxie

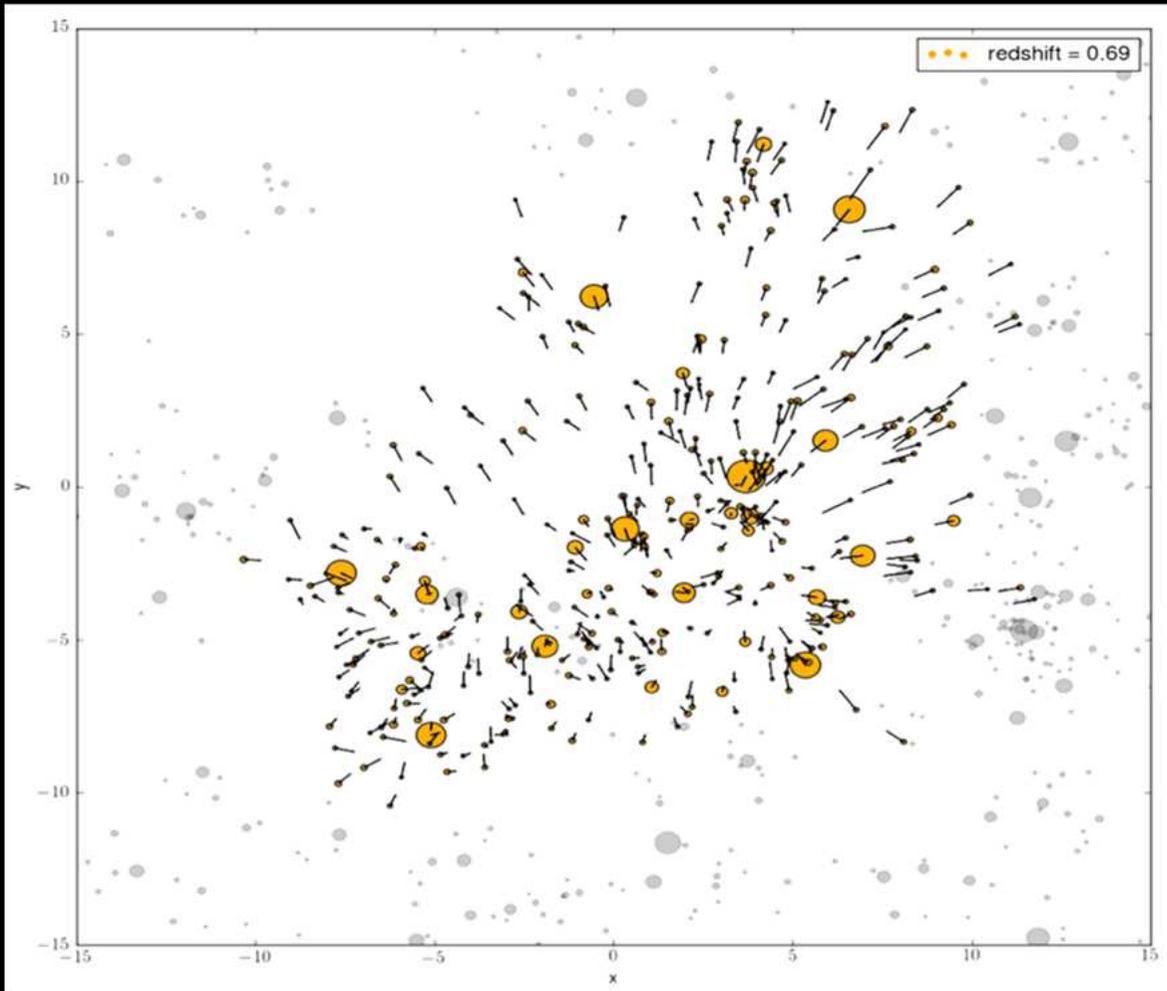
La structuration des galaxies (clustering)



Chaque point représente une galaxie simulée et chaque point a une flèche qui représente la **vitesse propre de la galaxie**

Les galaxies s'attirent les unes entre elles pour former des structures plus grandes
→ **effondrement dû à la force de gravité**

La structuration des galaxies (clustering)

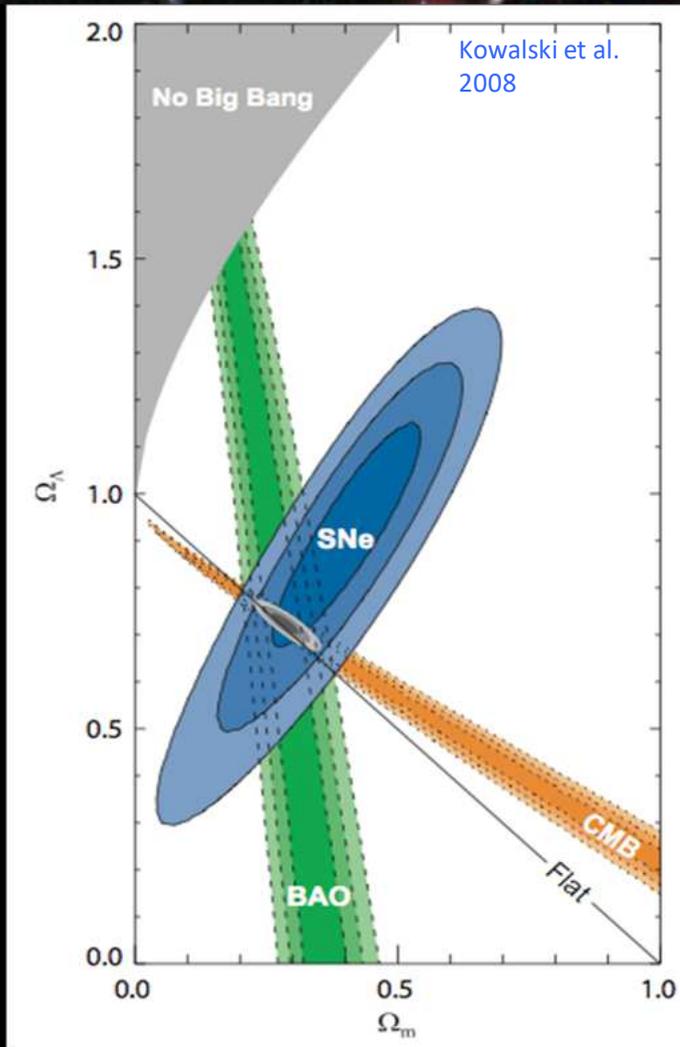


Chaque point représente une galaxie simulée et chaque point a une flèche qui représente la **vitesse propre de la galaxie**

Les galaxies s'attirent les unes entre elles pour former des structures plus grandes
→ **effondrement dû à la force de gravité**

→ Information dans les vitesses propres pour **retracer l'histoire de la croissance des structures**
Et donc pour **tester la gravité**

Bilan en ~2008



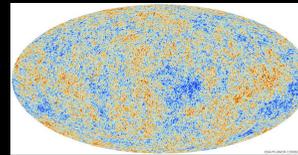
Supernovae type Ia

→ $z \sim 0.04-1.2$



Galaxies rouges lumineuses

→ $z \sim 0.2-0.6$



Fond diffus cosmologique

→ $z \sim 3000$

→ Même conclusion à partir de données indépendantes : **modèle concordant de la cosmologie, Λ CDM**

$$w_{DE} = -1 \pm 0.1 (10\%)$$

Programmes d'observation dédiés à l'énergie noire

Décennie 2010-2020



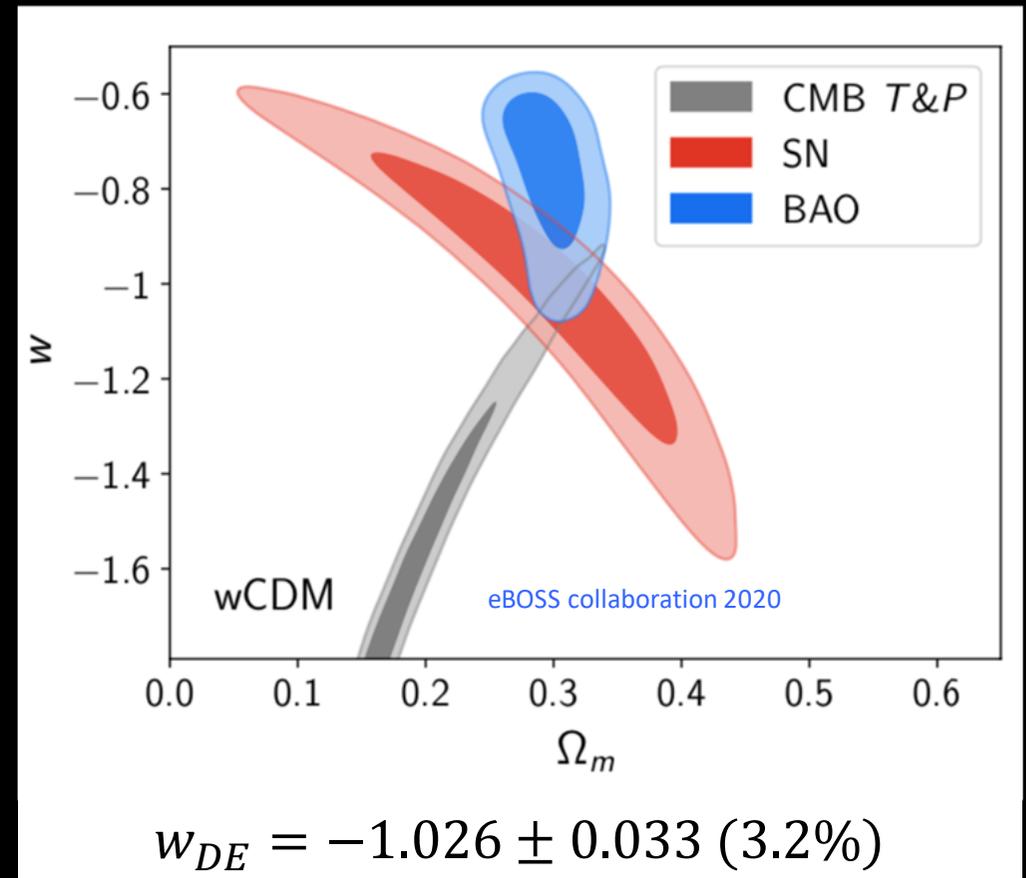
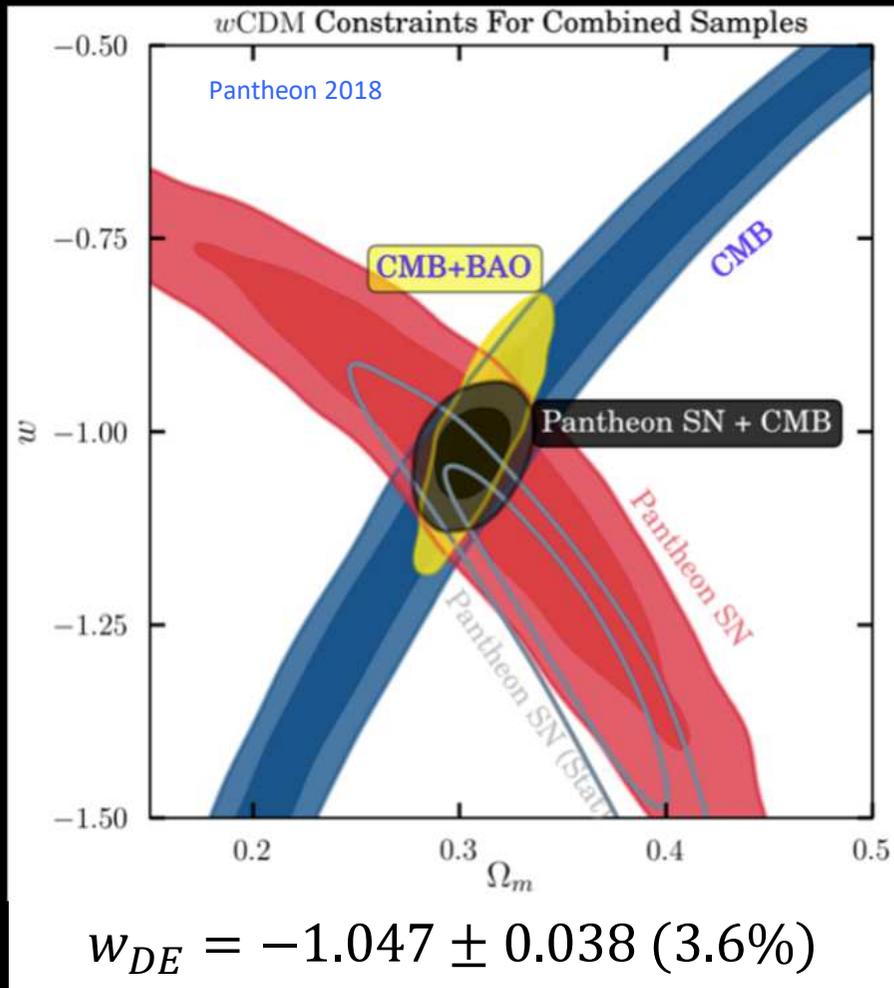
Stage II 2008

Stage III

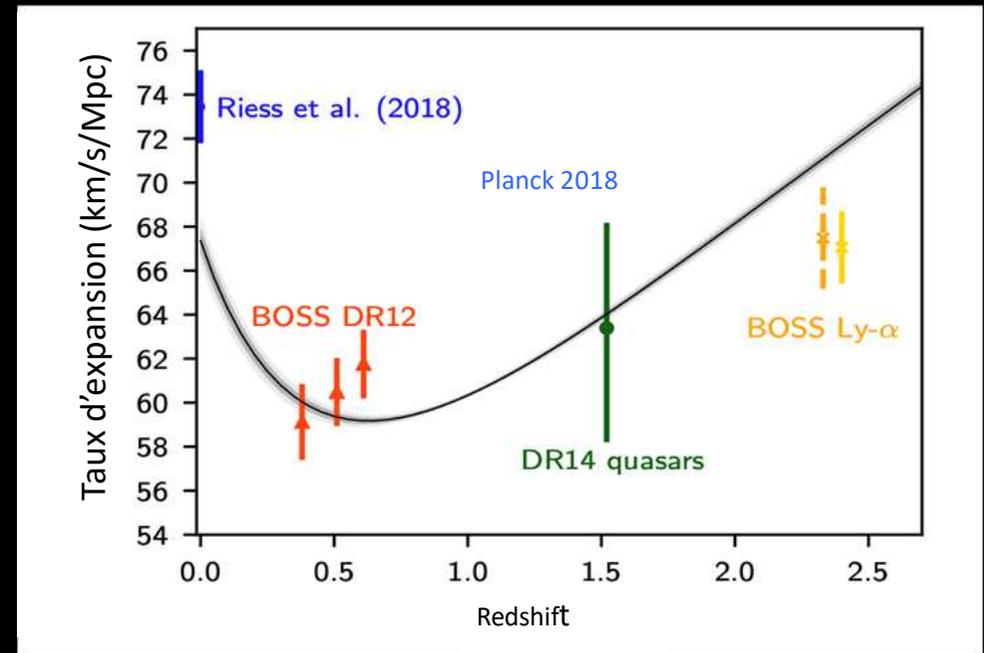
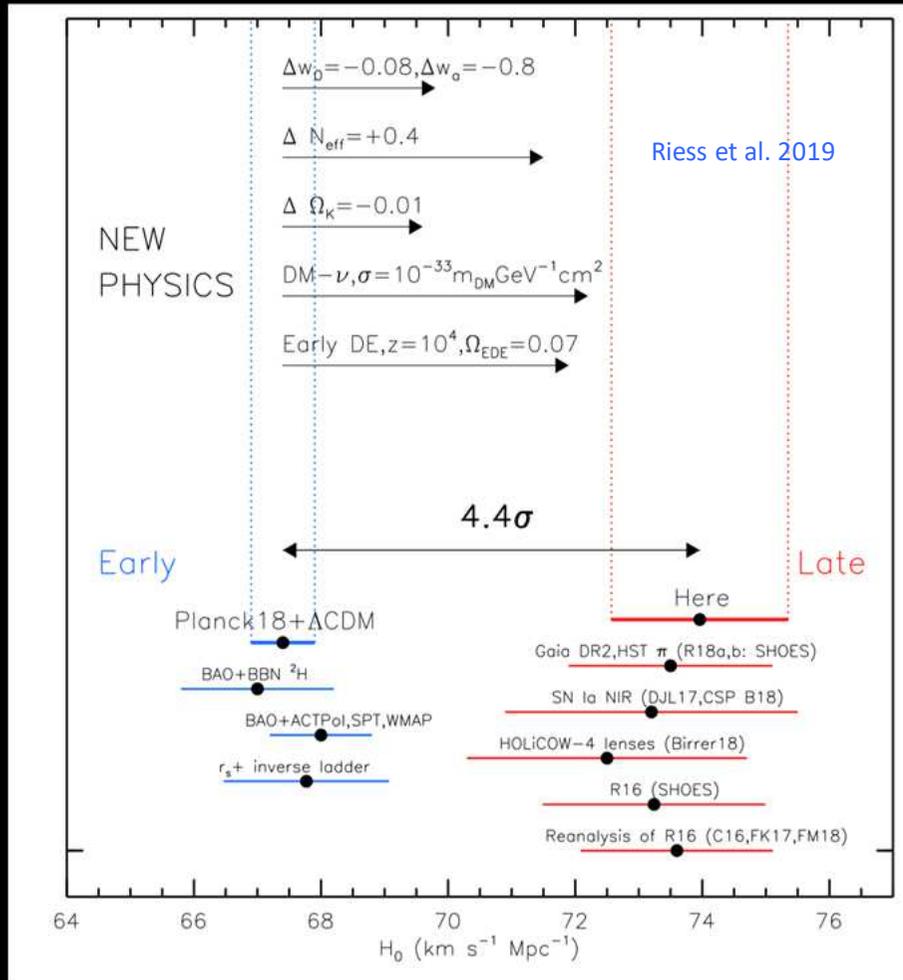
2019

Stage IV

Le modèle Λ CDM en 2020



Le modèle Λ CDM : entre robustesse et tension



→ Déviation de 3-4 fois la précision sur la mesure

Programmes d'observation dédiés à l'énergie noire

Décennie 2020-2030

AAO
2dF GRS, 6dF GRS,
WiggleZ, GAMA

SDSS
Main, BOSS., eBOSS

Subaru
FastSound, HSC

CFHT
SNLS, VVDS
VIPERS

DESI
2020-2025

Euclid
2022-2028

4MOST
2022

Subaru PSF
2023

LSST
2023-2033

Stage II 2008

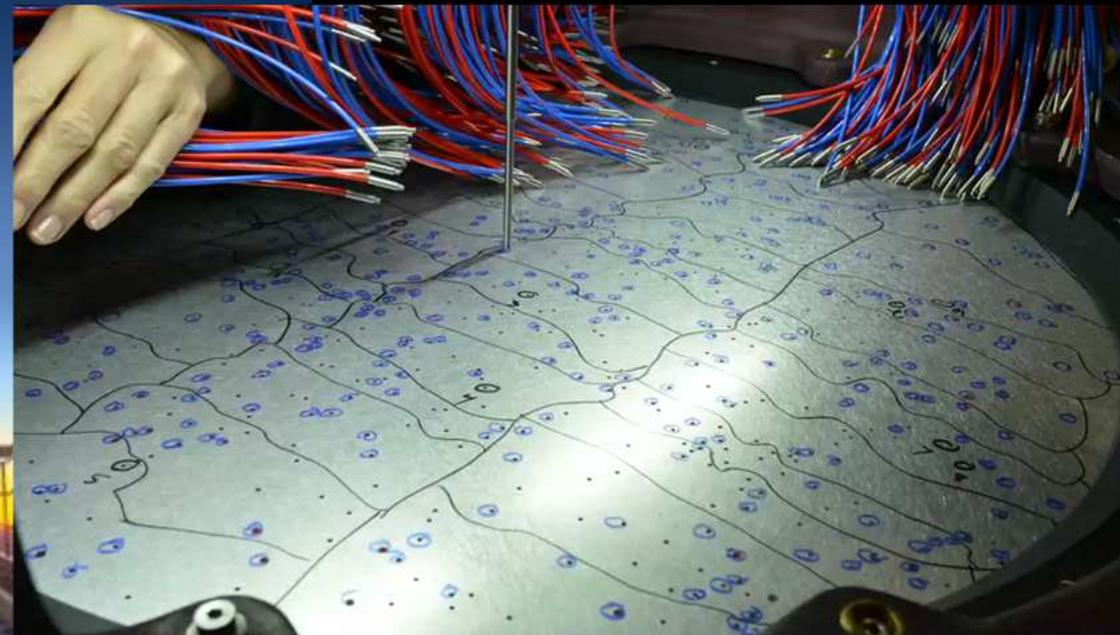
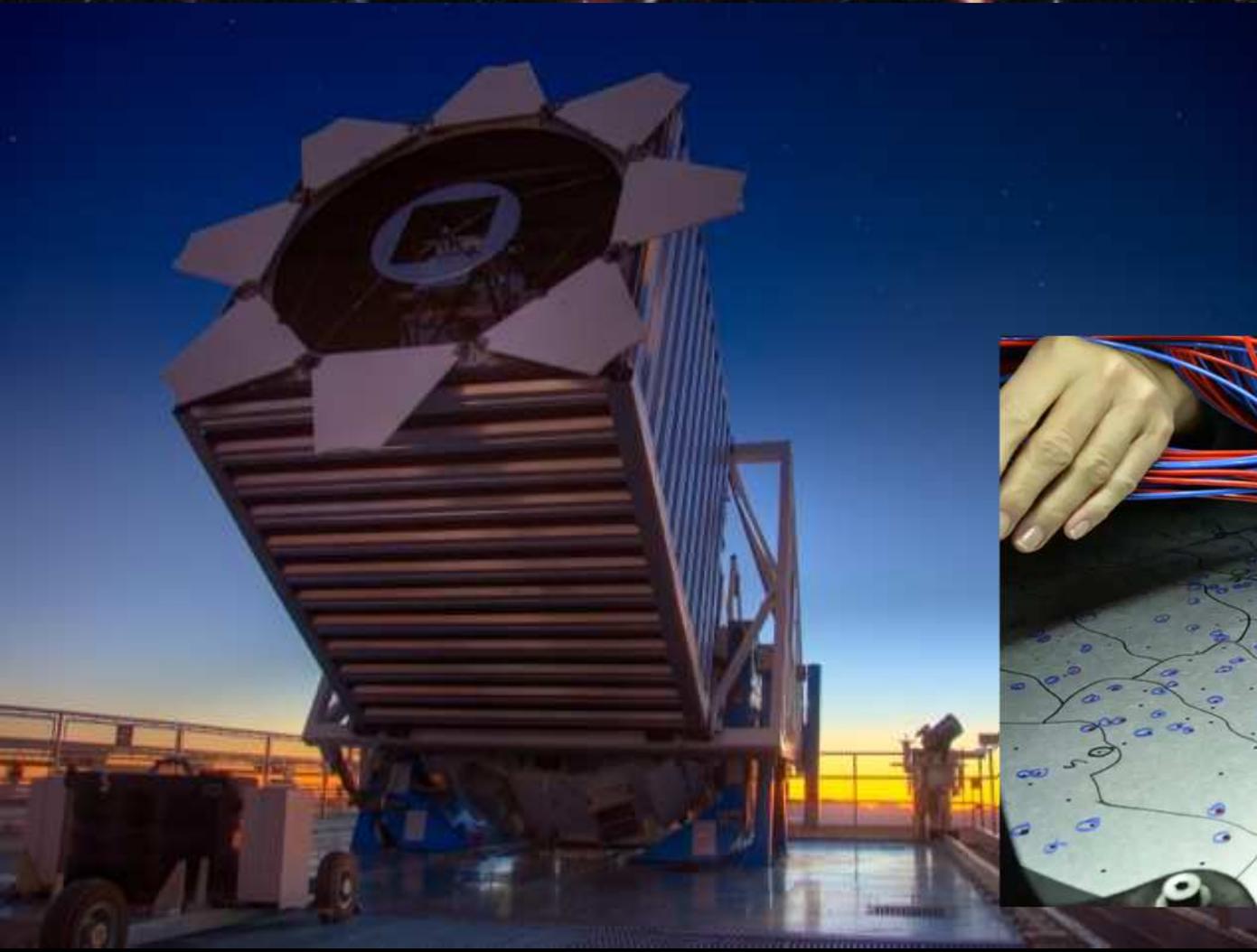
Stage III

2019

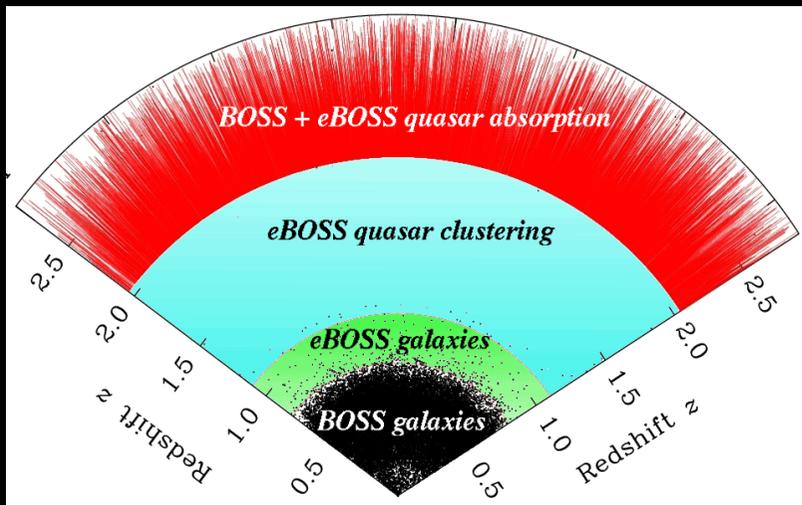
Stage IV

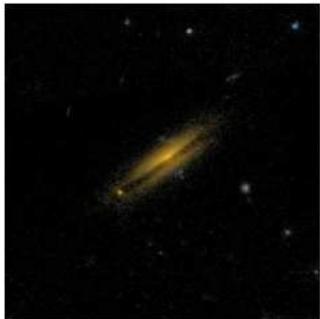
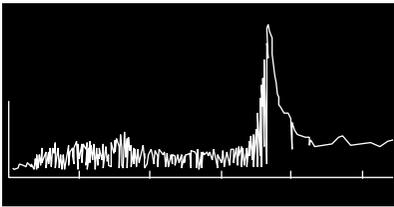
Les grands relevés du ciel : SDSS (2000-2020)

Sloan Foundation Telescope
Apache Point Observatory
Nouveau-Mexique, USA
Miroir de 2.5 m de diamètre
Prise des données 2000-2020

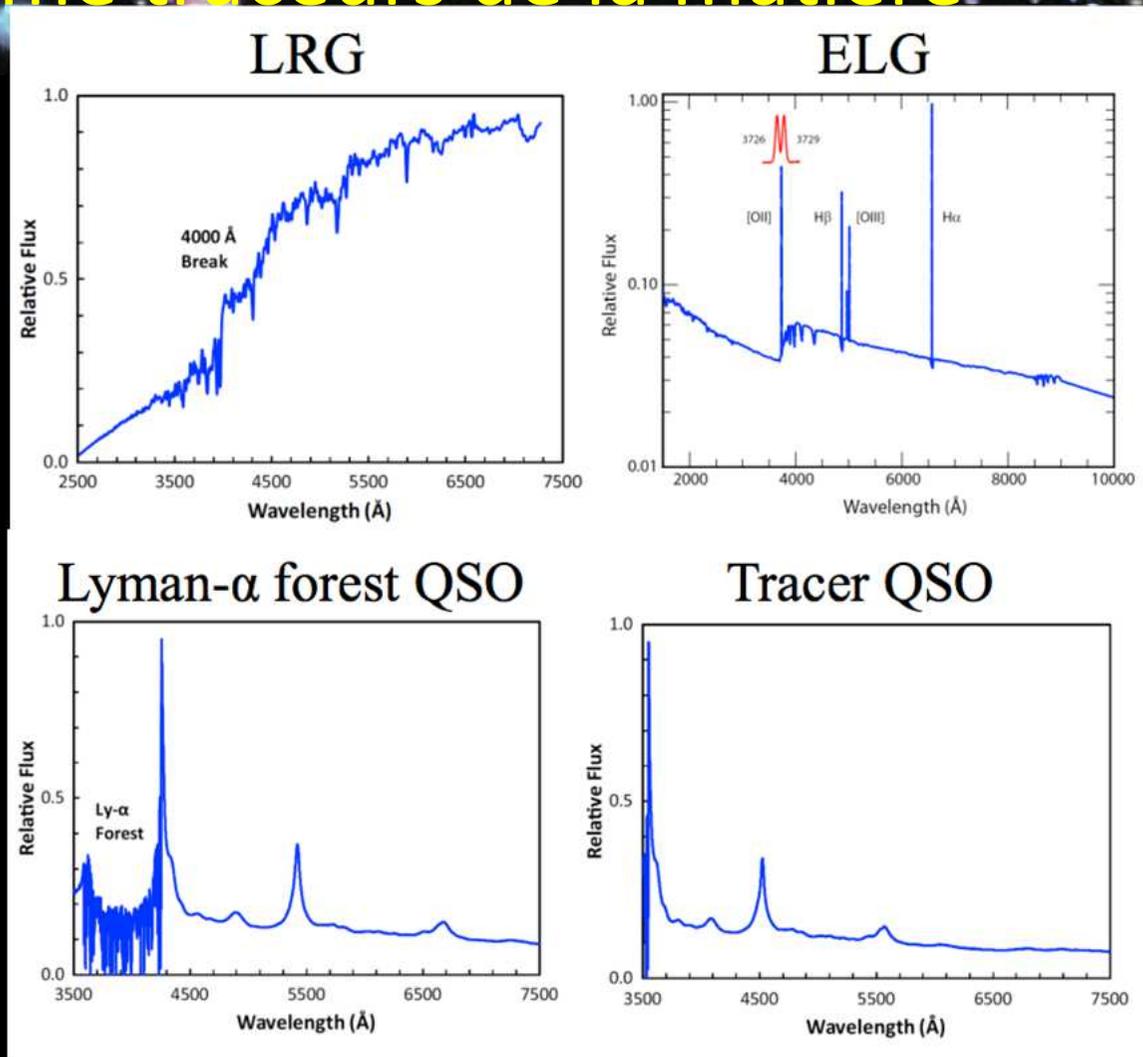
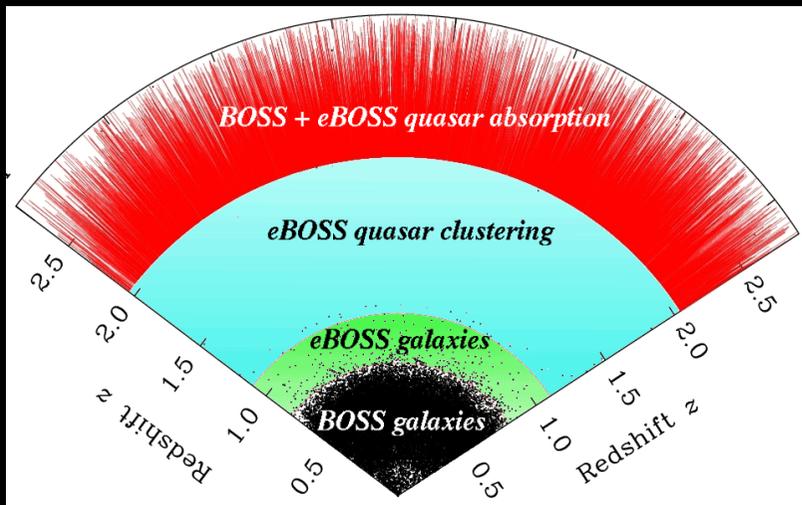


Galaxies comme traceurs de la matière



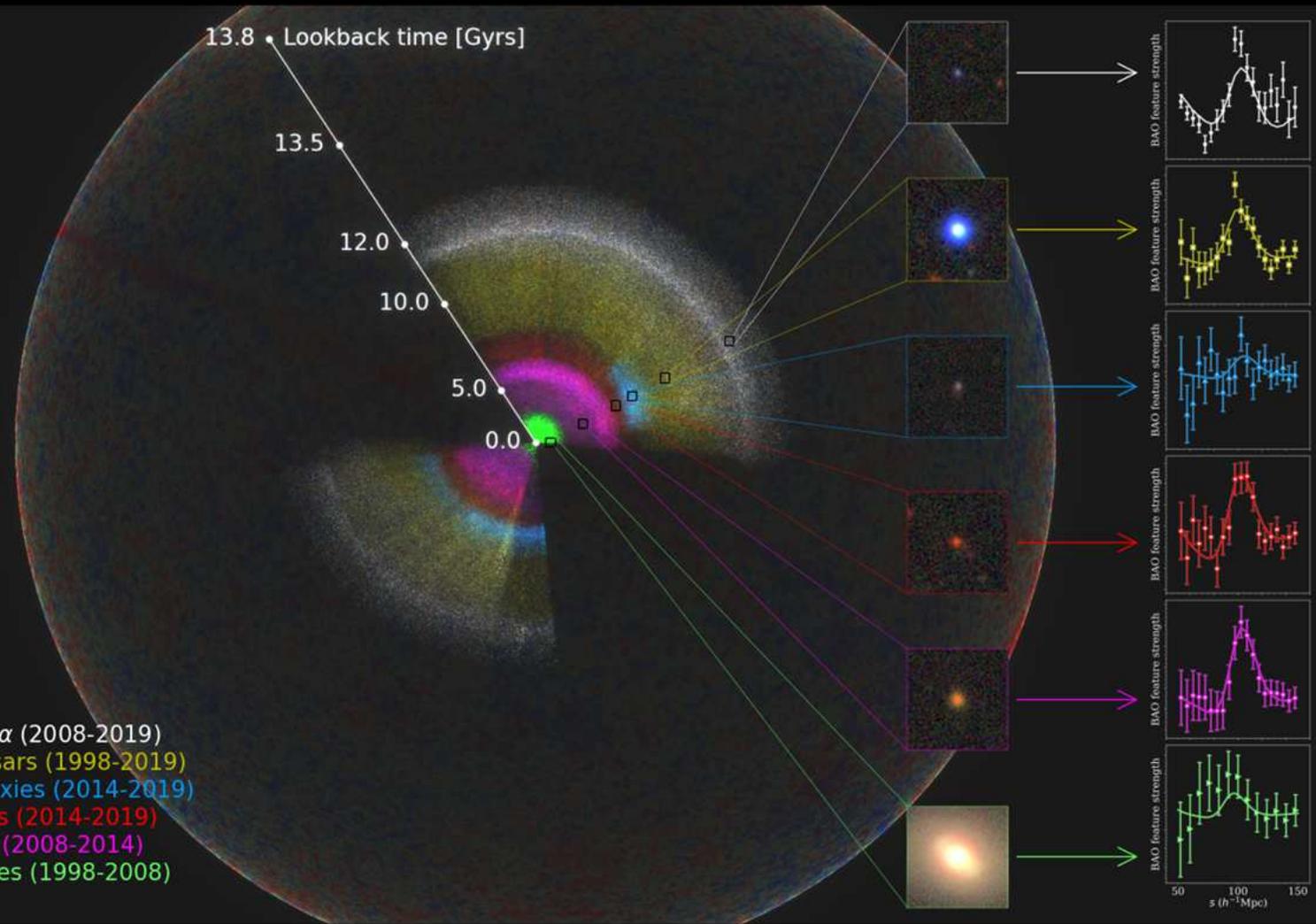
LRG	ELG
<p>Galaxie rouge lumineuse → Galaxie elliptique, vieille</p> <p>$z < 0.8$</p> 	<p>Galaxie à raies d'émission → Galaxie spirale avec formation d'étoiles</p> <p>$0.2 < z < 0.8$</p> 
Lyman- α forest QSO	Tracer QSO
<p>Zone du spectre d'un QSO → absorption du H neutre intergalactique</p> <p>$z > 2.2$</p> 	<p>Quasars Trou noir supermassif au centre des galaxies</p> <p>$0.8 < z < 2.2$</p> 

Galaxies comme traceurs de la matière



<https://www.youtube.com/watch?v=UTYUxucEZA>

Les grands relevés du ciel : SDSS (2000-2020)



Les grands relevés du ciel : DESI (2021-2026)

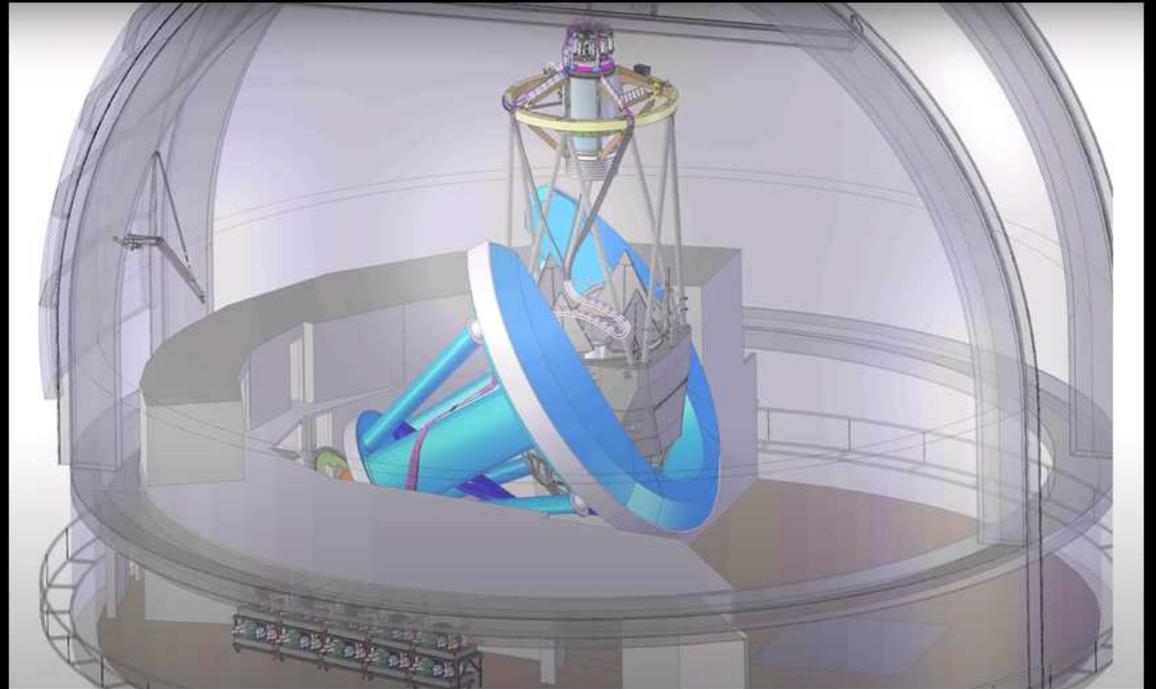
Observatoire de Kiit Peak

Télescope Mayall avec
miroir de 4m de diamètre



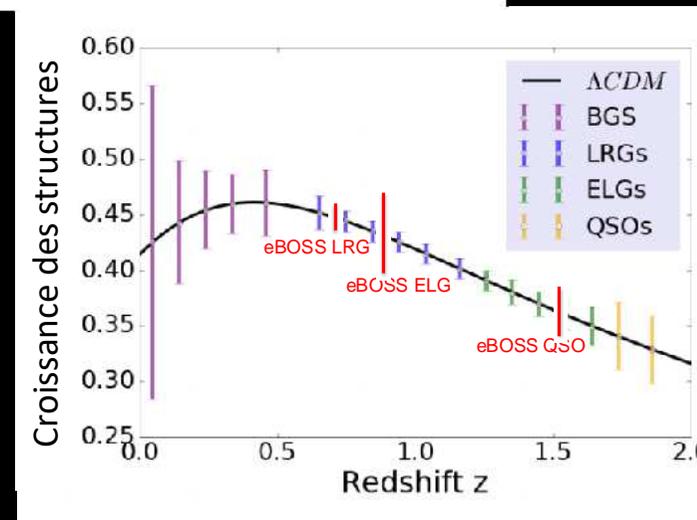
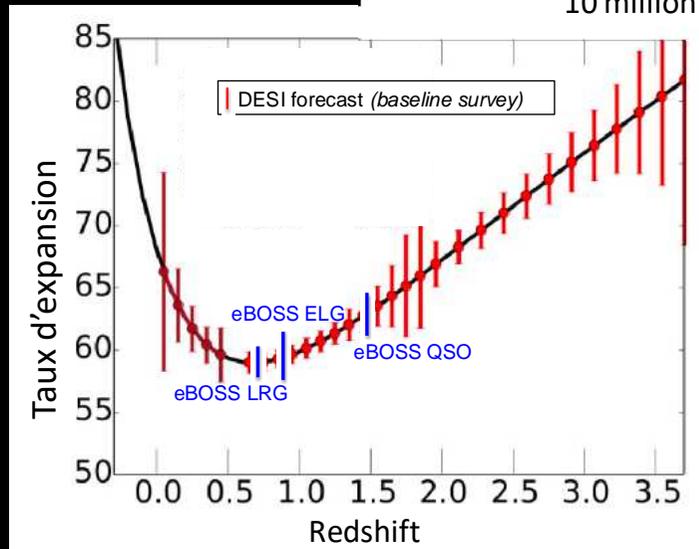
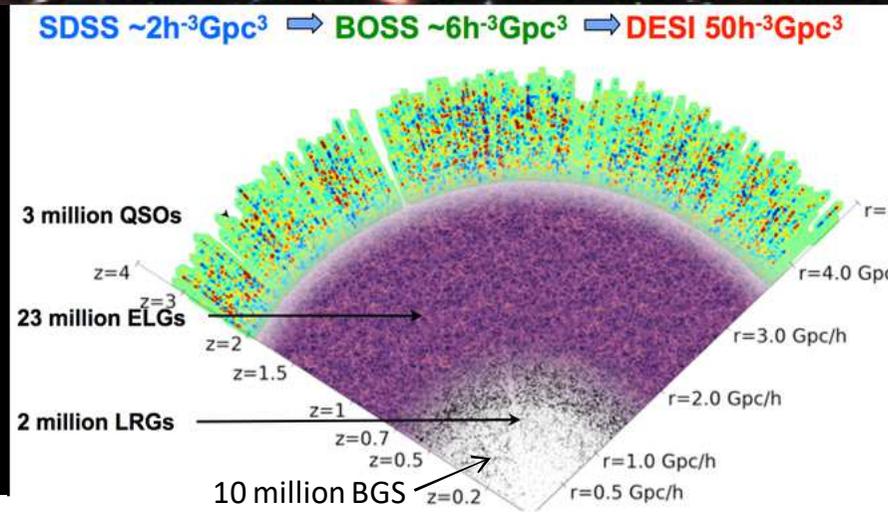
10 spectrographes pour analyser le
spectre de 35 millions de galaxies
galaxies

Plan focal avec 5 000
fibres robotisées

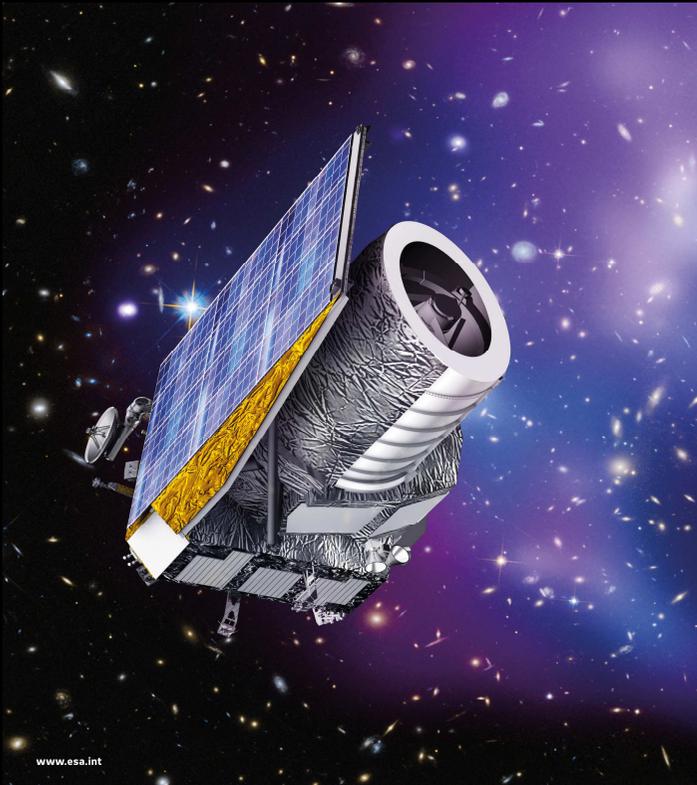


Correcteur (lentilles) :
champ de vue de 8 deg²

Les grands relevés du ciel : DESI (2021-2026)



Les grands relevés du ciel : *Euclid* (2022-2026)



- Miroir de 1,2m
- Caméra grand champ pour le visible avec 600 millions de pixels
- Spectro-imageur pour le proche IR
- 15 000 deg²
- Lancement prévu pour 2023
- Début du relevé scientifique en 2024

→ 100 millions de spectres de galaxies !

→ Mesures de forme pour 2 milliards !!

Les grands relevés du ciel : LSST (2023-2033)

- 3 miroirs (8.4, 3,42 et 5 mètres)
- Caméra avec 3,2 milliards de pixels
- 6 bandes photométriques
- 18 000 deg²
- 1ère lumière en 2023
- Début du relevé scientifique en 2024

→ Observe la moitié du ciel en 3 nuits !

→ 40 milliards d'étoiles et de galaxies !!

→ 15 téraoctets de données par nuit !!!





Merci pour votre attention !

« Estimer correctement son ignorance est une étape saine et nécessaire. » **Hubert Reeves**