

Les grands défis du labo

Arpenter la face sombre de l'univers

50 ans LPNHE - IN2P3

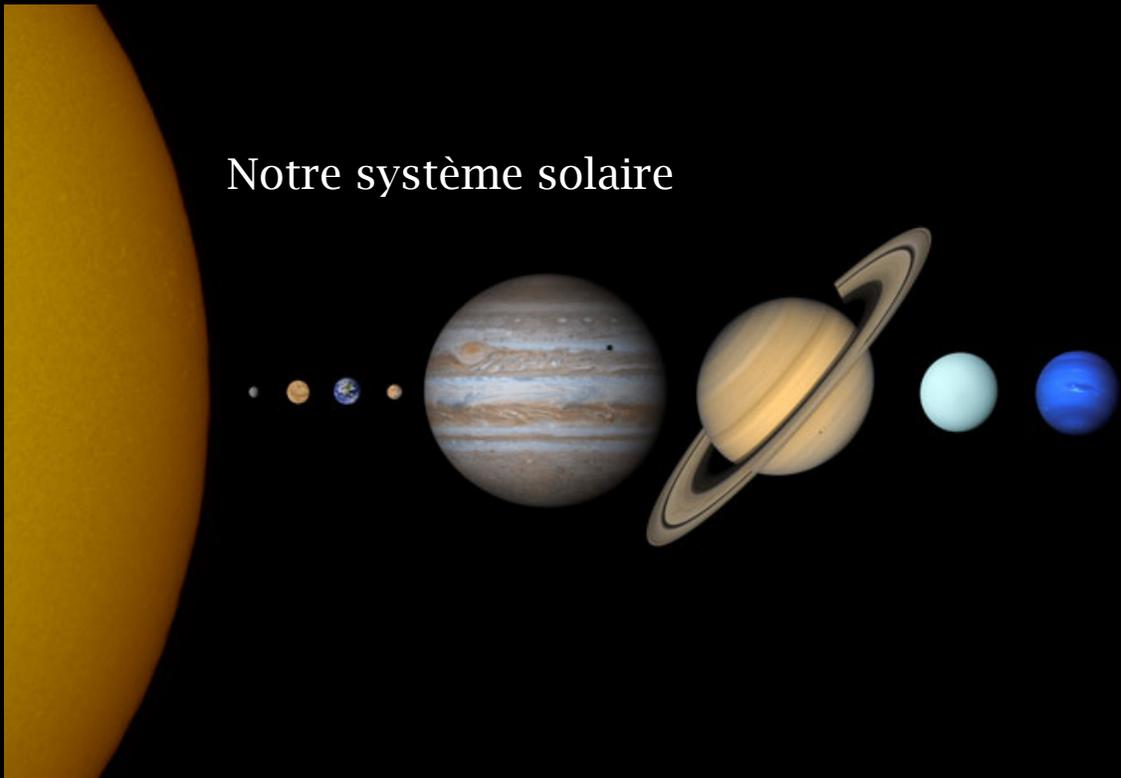
Pauline Zarrouk



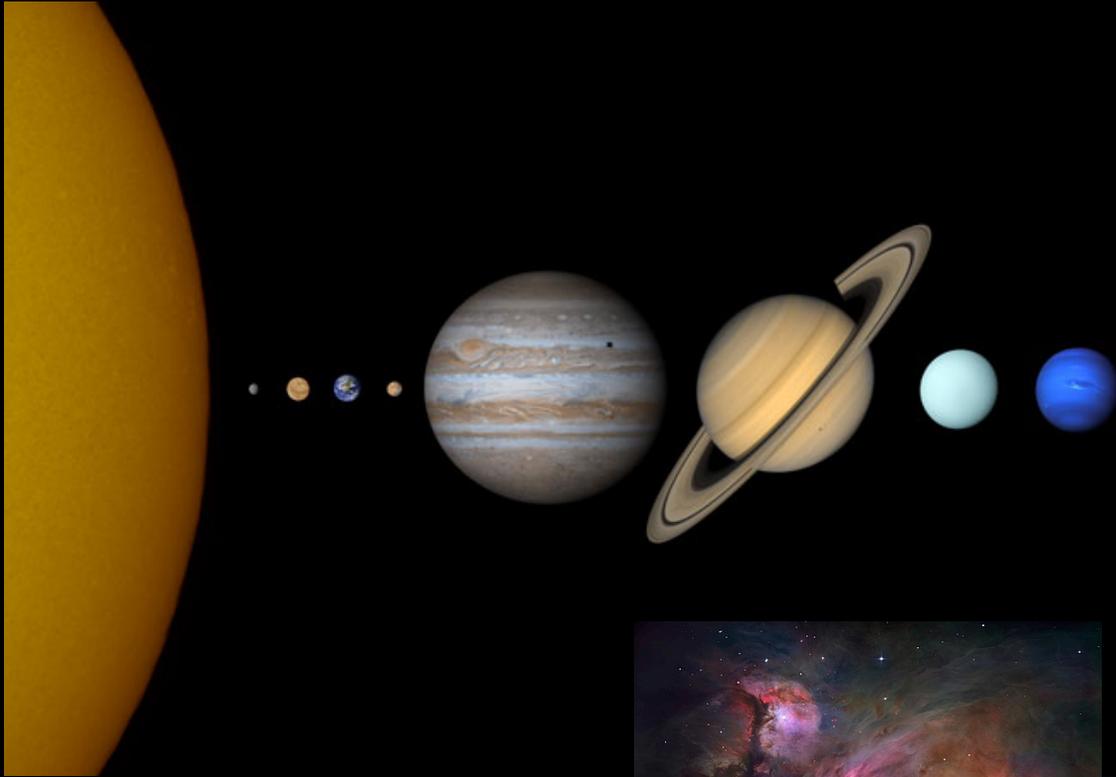
SORBONNE
UNIVERSITÉ

De quoi est constitué l'univers ?

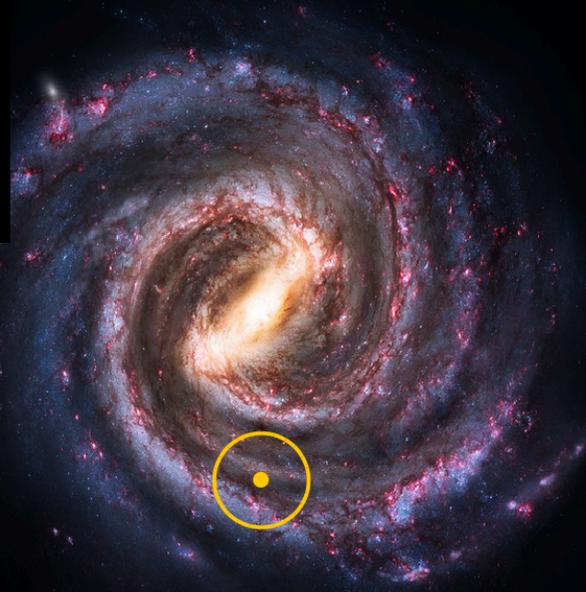
Notre système solaire



De quoi est constitué l'univers ?



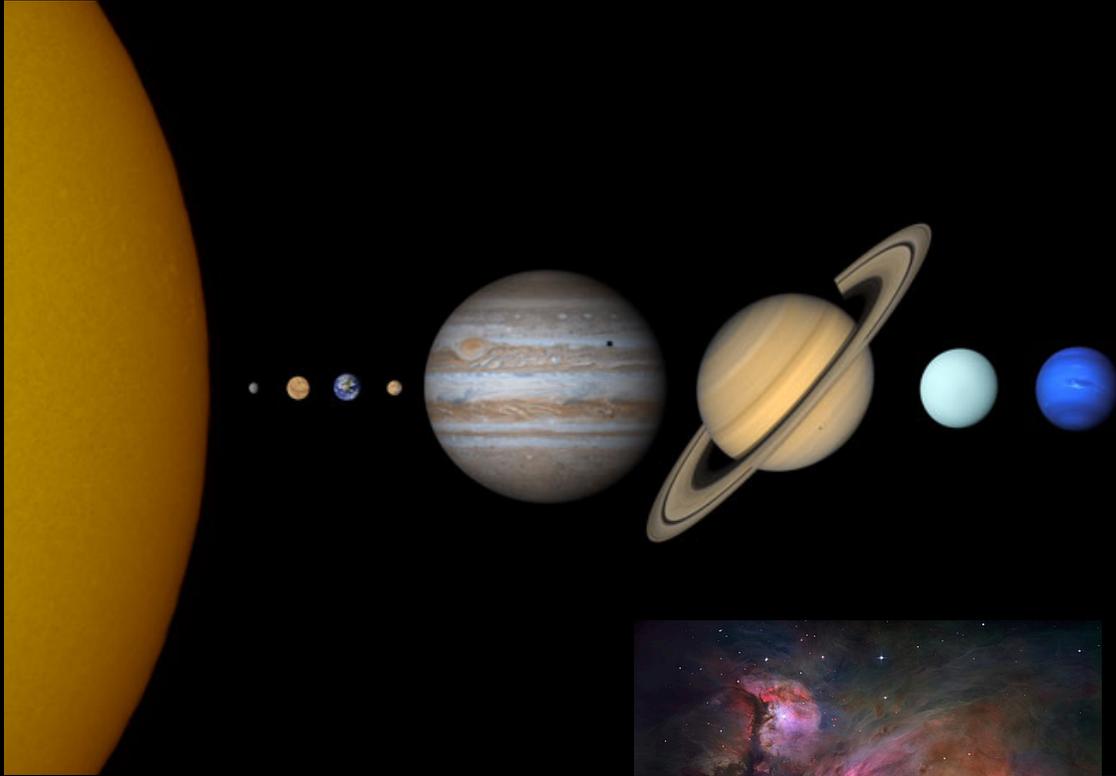
Des étoiles, des amas d'étoiles et des amas globulaires au sein de notre propre galaxie, la Voie Lactée



Au total : ~200 milliards

Nombre max d'étoiles visibles à l'œil nu : 3000

De quoi est constitué l'univers ?



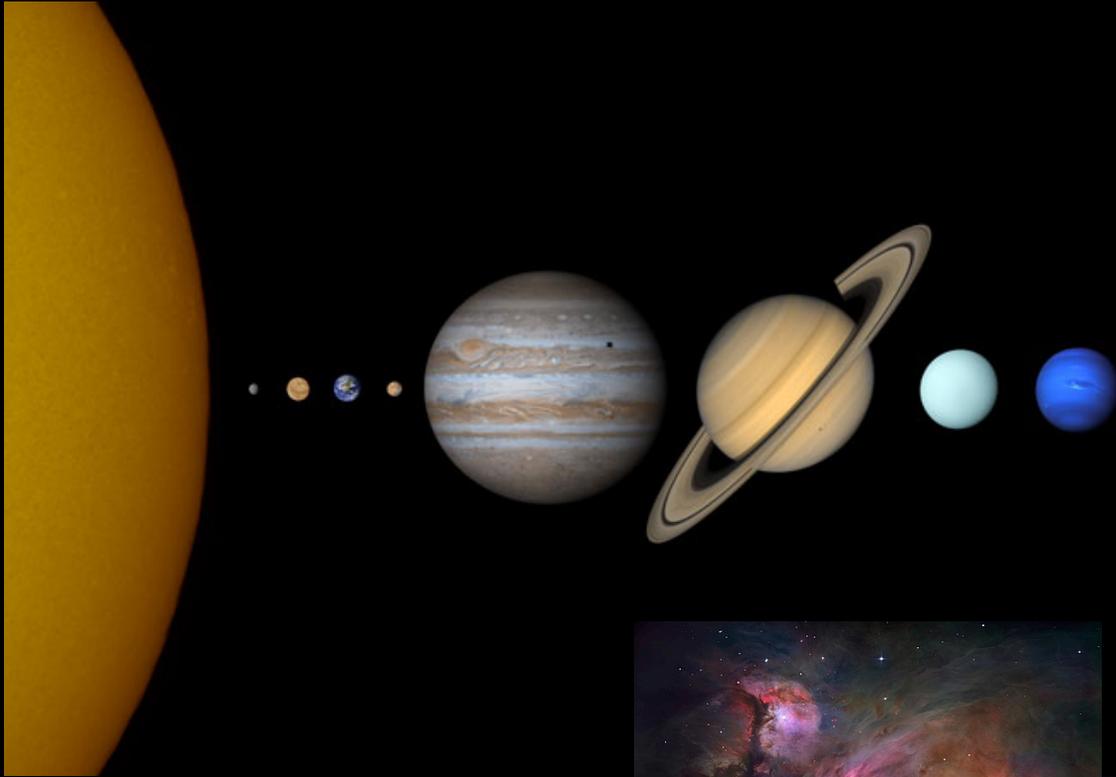
Des étoiles, des amas d'étoiles et des amas globulaires au sein de notre propre galaxie, la Voie Lactée



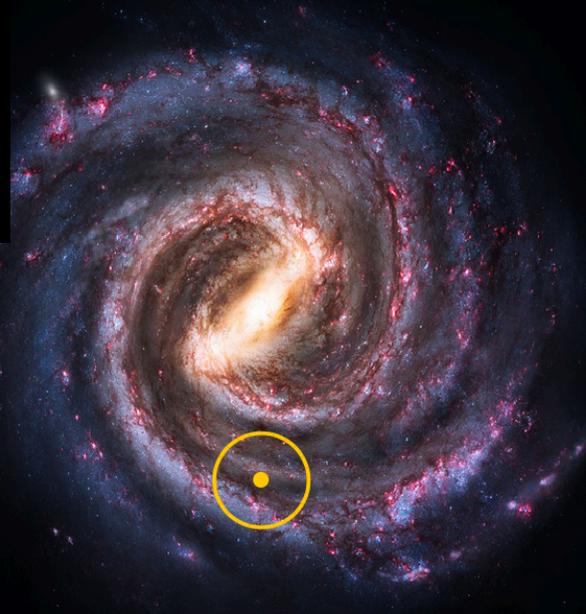
Et au centre de notre propre galaxie ?
Un trou noir !



De quoi est constitué l'univers ?



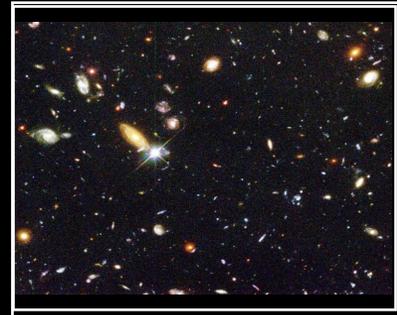
D'autres galaxies (en fait des milliards d'autres galaxies...)



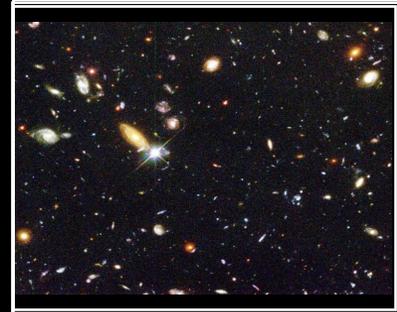
De quoi est constitué l'univers ?

Et donc forcément d'autres planètes
qui tournent autour d'étoiles



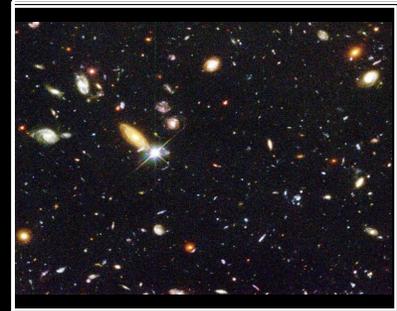


Matière ordinaire $\sim 5\%$



Matière ordinaire ~5%

Matière noire ~25%



Matière ordinaire ~5%

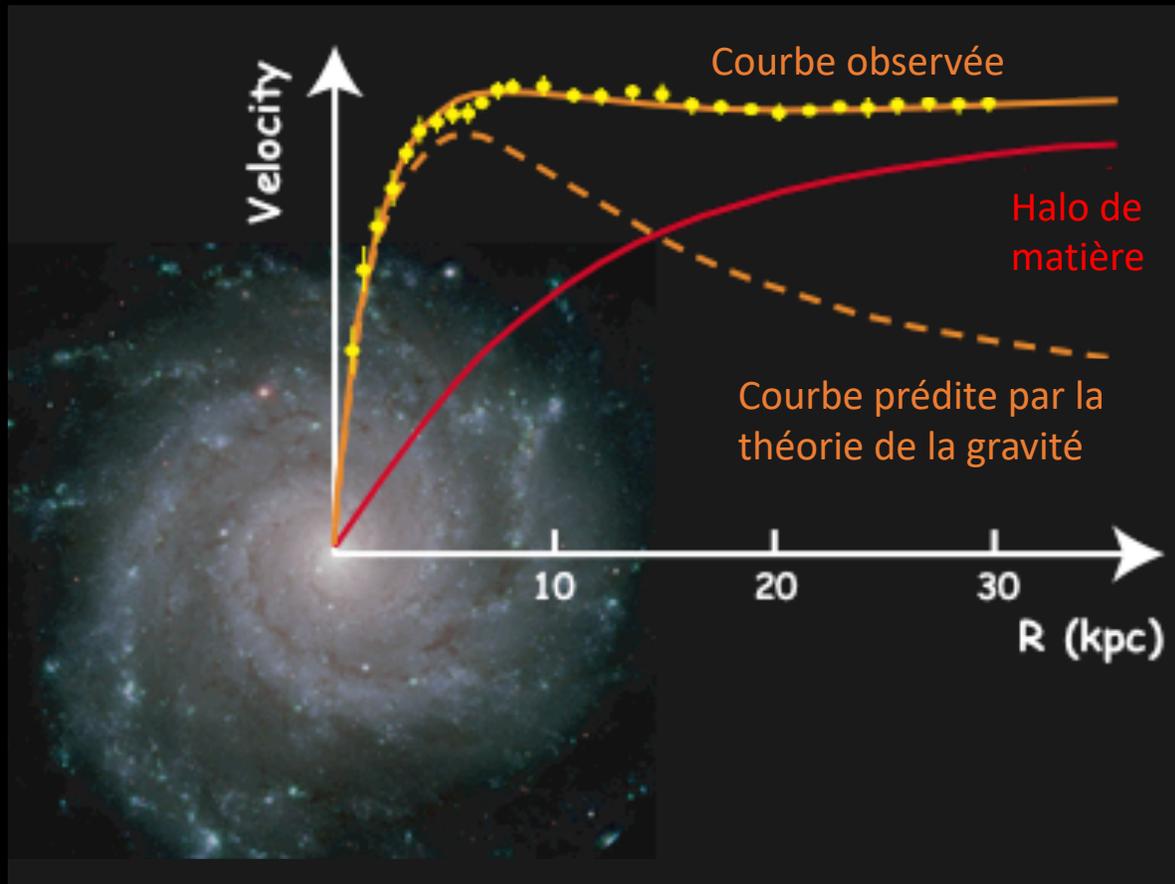
Matière noire ~25%

Energie noire ~70%

Quelle est la nature de la matière noire ?

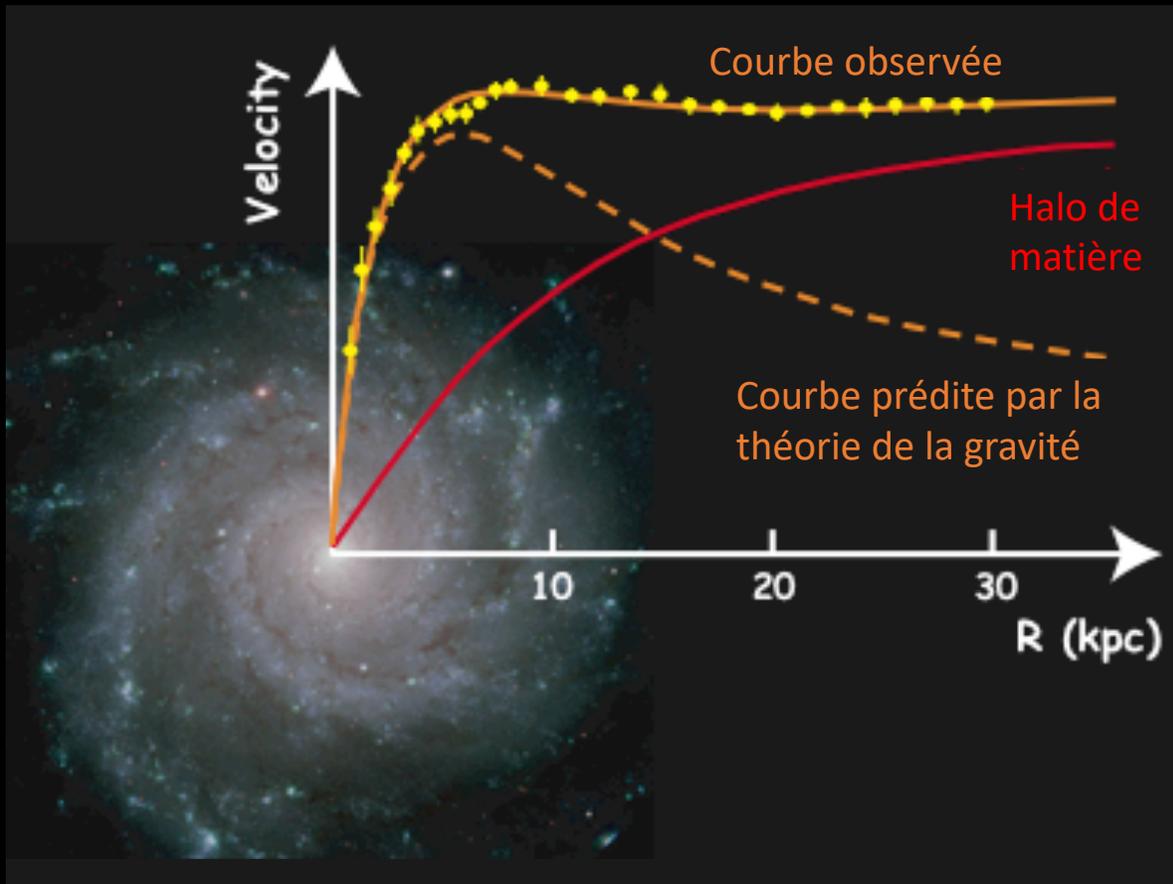
La matière noire

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



La matière noire

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



Rotation à
vitesse constante



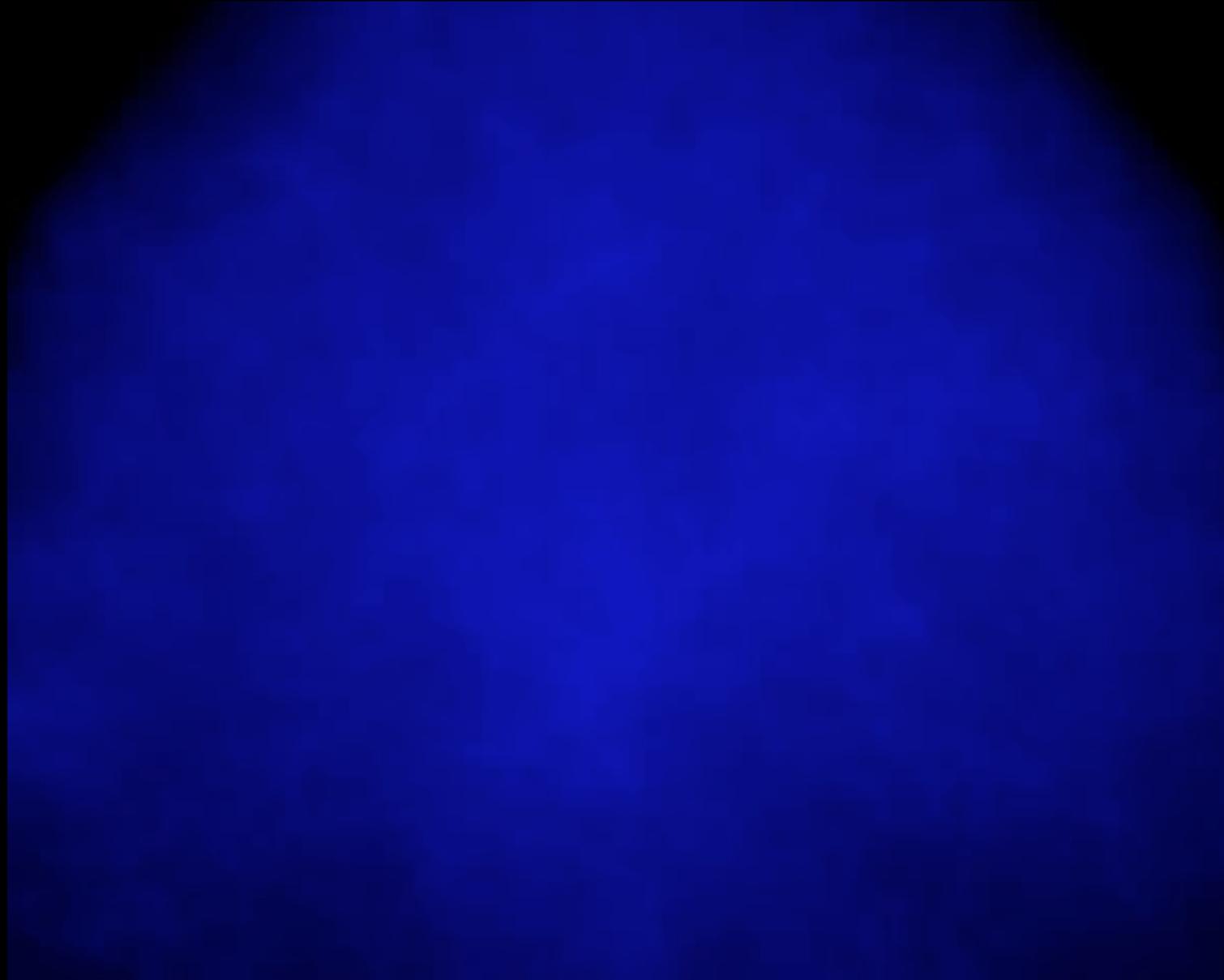
Halo de
MATIÈRE NOIRE

Voie Lactée:
 $M_{\text{halo}} \sim 10 \times M_{\text{visible}}$



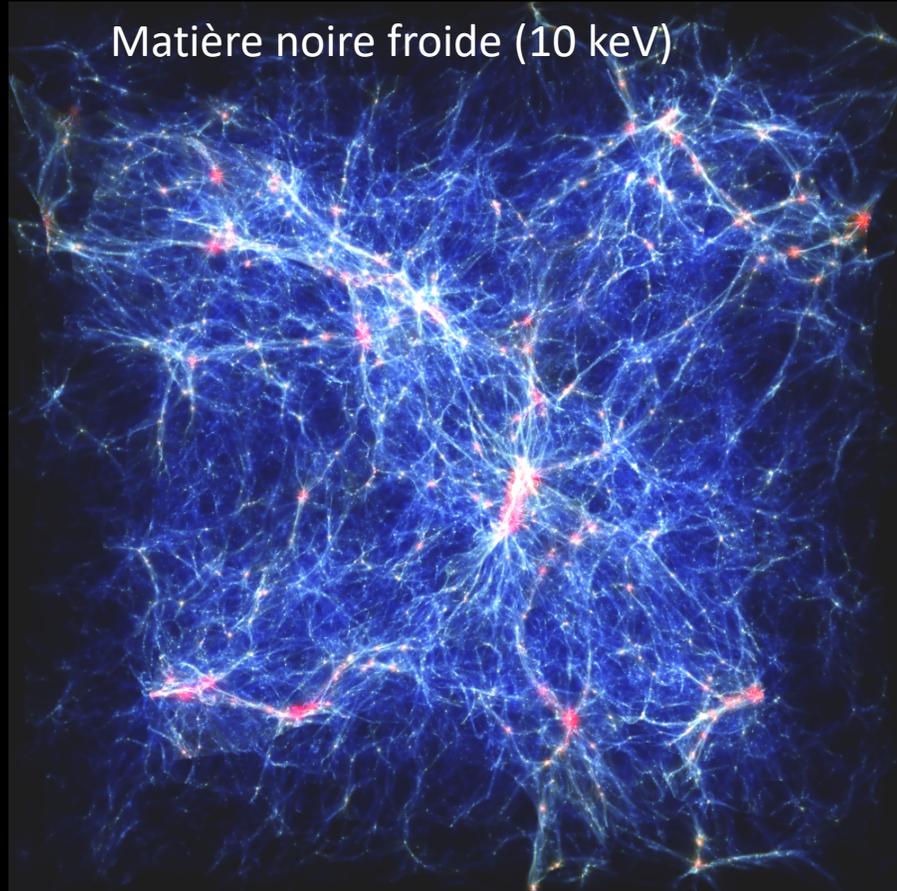
Simuler la formation de la toile cosmique

Défi scientifique et technologique !



La matière noire : recherche en cosmologie

Effet de de la matière noire sur la formation des structures (avec des simulations cosmologiques)

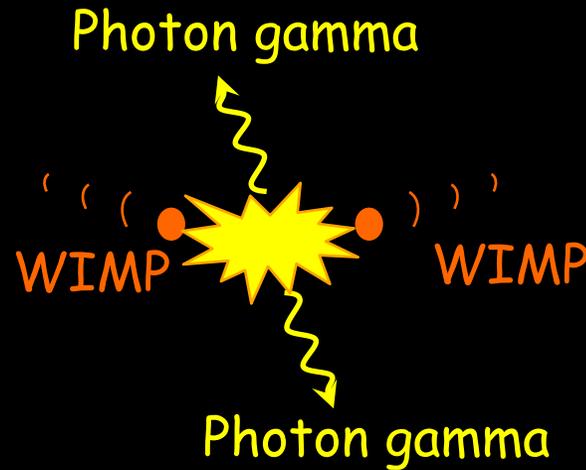


Plus la matière noire est froide, plus elle est massive
→ mesurer la masse des particules de matière noire

La matière noire : recherches de particules

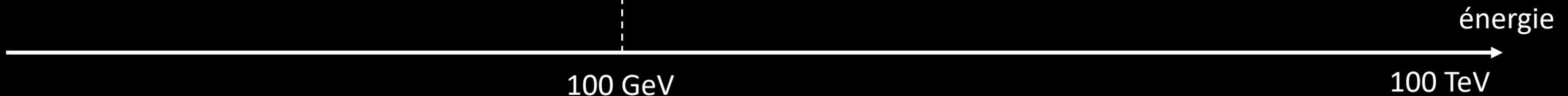
WIMP: Particules massives interagissant faiblement avec la matière ordinaire

Quelle est la masse des particules de matière noire ?



Recherche directe → interaction WIMP

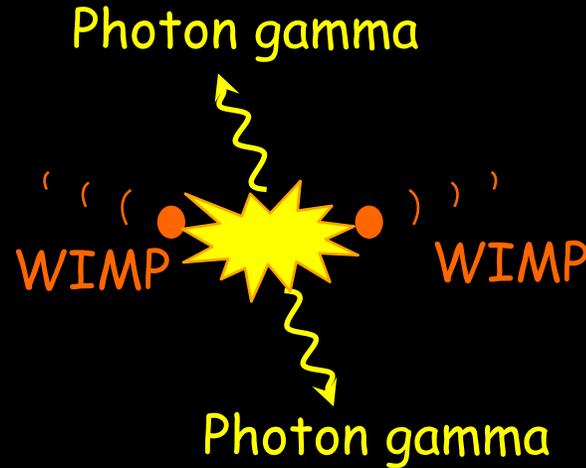
Recherche indirecte → photon gamma produit par les WIMP



La matière noire : recherches de particules

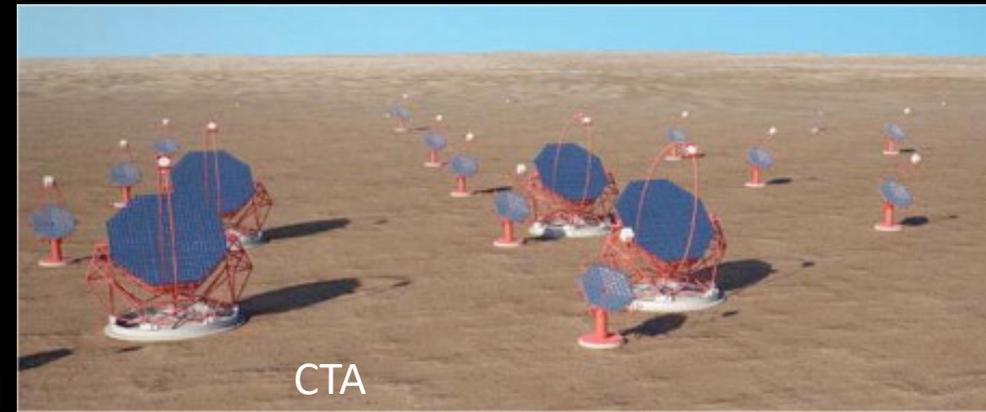
WIMP: Particules massives interagissant faiblement avec la matière ordinaire

Quelle est la masse des particules de matière noire ?



Recherche directe → interaction WIMP

Recherche indirecte → photon gamma produit par les WIMP



100 GeV

1 TeV

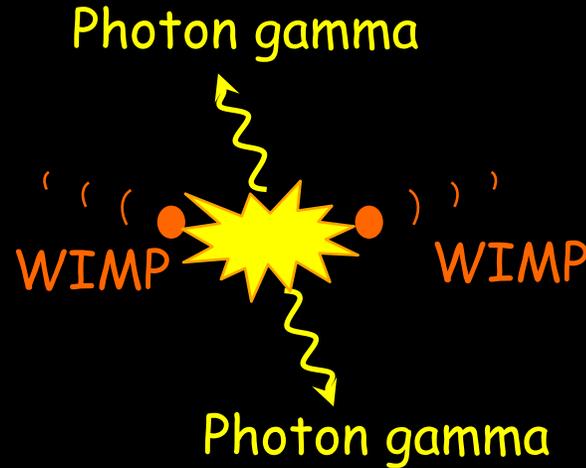
énergie

La matière noire : recherches de particules



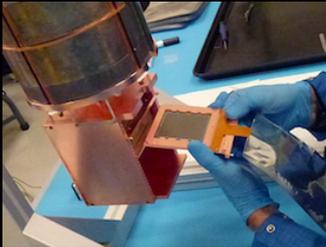
WIMP: Particules massives interagissant faiblement avec la matière ordinaire

Quelle est la masse des particules de matière noire ?



Recherche directe → interaction WIMP

DAMIC
(CCD)



DarkSide-50kg → 20 T (Argon)



XENON1T → XENONnT

Recherche indirecte → photon gamma produit par les WIMP

100 GeV

1 TeV

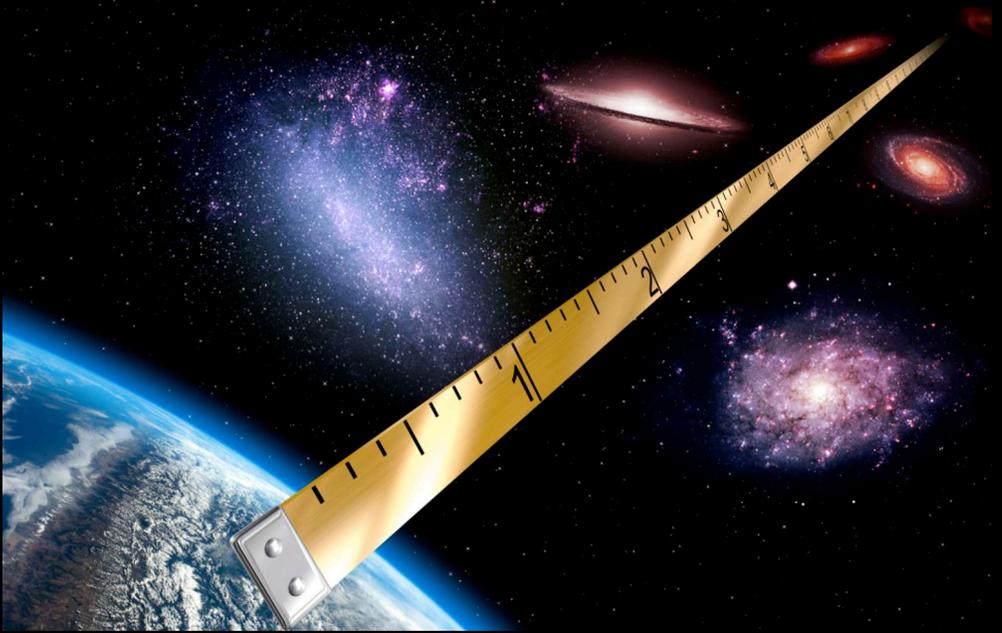
énergie

Qui appuie sur la pédale d'accélérateur de
l'expansion de l'univers ?

Qui appuie sur la pédale d'accélérateur de l'expansion de l'univers ?

Qu'est-ce que l'énergie noire ?

- Une constante dans les équations qui décrivent la dynamique de l'univers (la Relativité Générale)
- Un composant de l'univers plus complexe

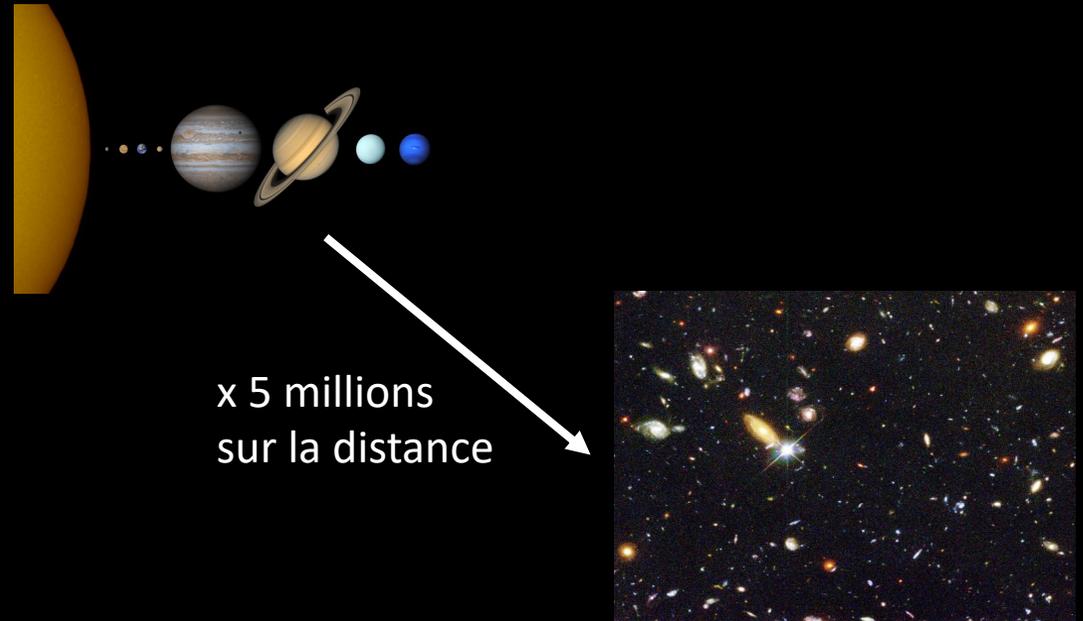


Notre axe de recherche : mesurer la vitesse à laquelle l'univers s'étend → **distances des objets extragalactiques**

Qui appuie sur la pédale d'accélérateur de l'expansion de l'univers ?

Quelle est la nature de la gravité ?

Est-ce que notre théorie actuelle de la gravitation, la Relativité Générale est valable aux échelles de distance entre les galaxies ? Ou faut-il la modifier ?

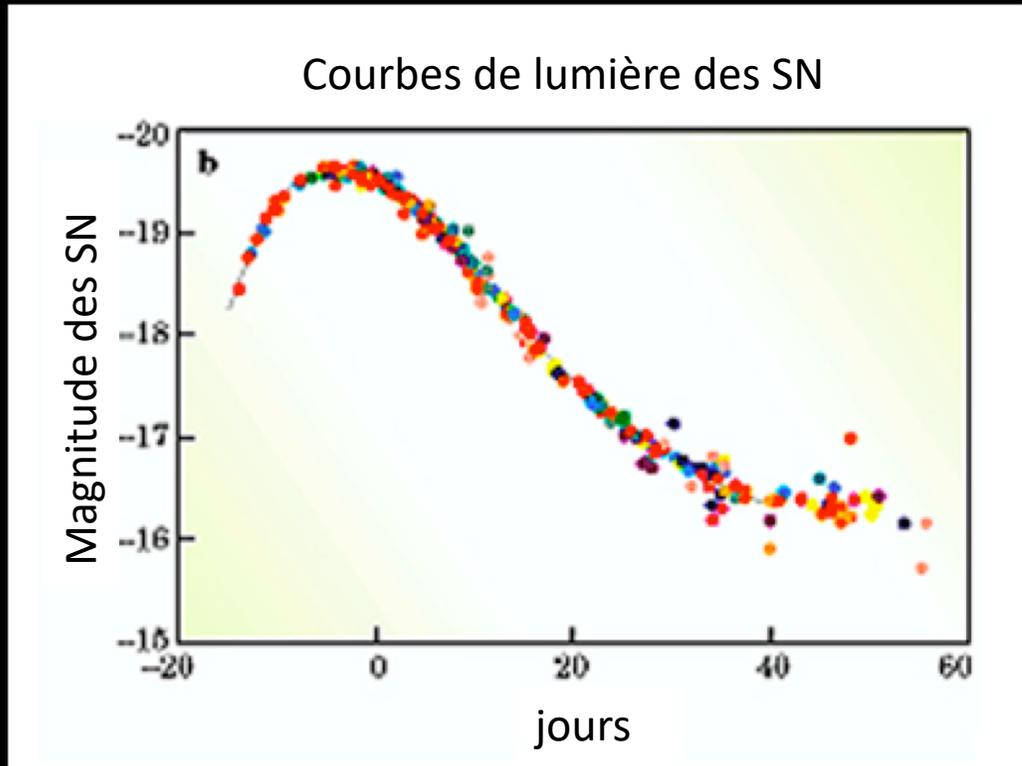


Notre axe de recherche : mesurer la vitesse à laquelle la matière s'agglomère pour former des galaxies
→ **croissance des structures de l'univers**

Piste historique : SN Ia

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

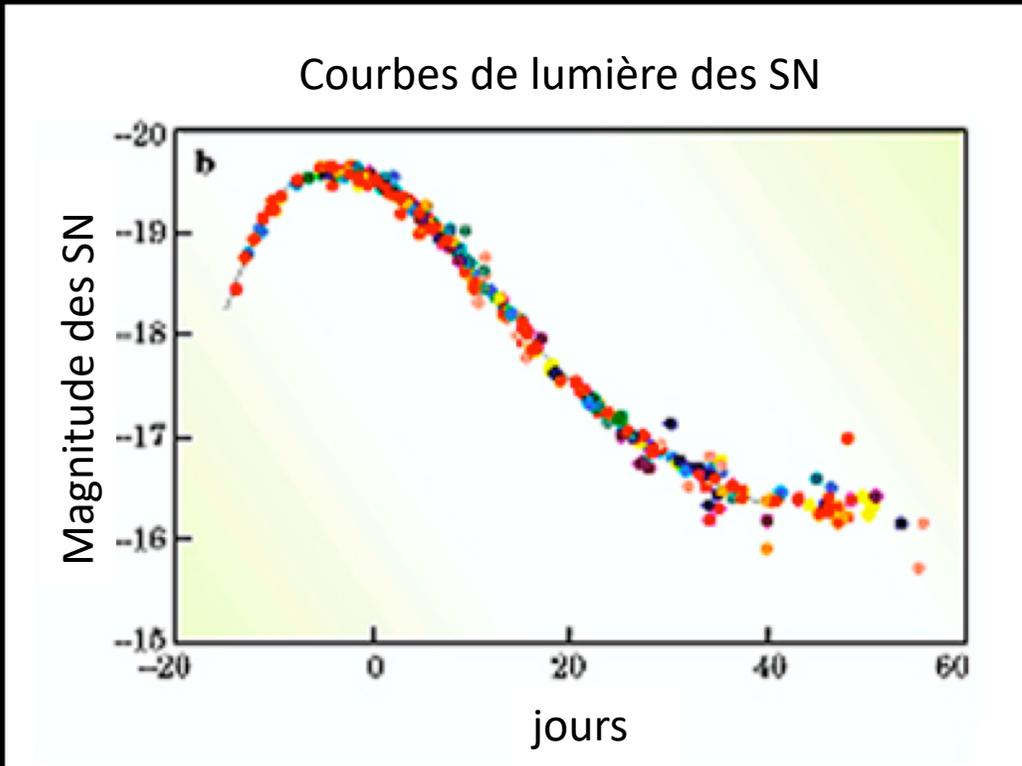
→ Chandelles standard : même conditions d'explosion, même *courbe de lumière*



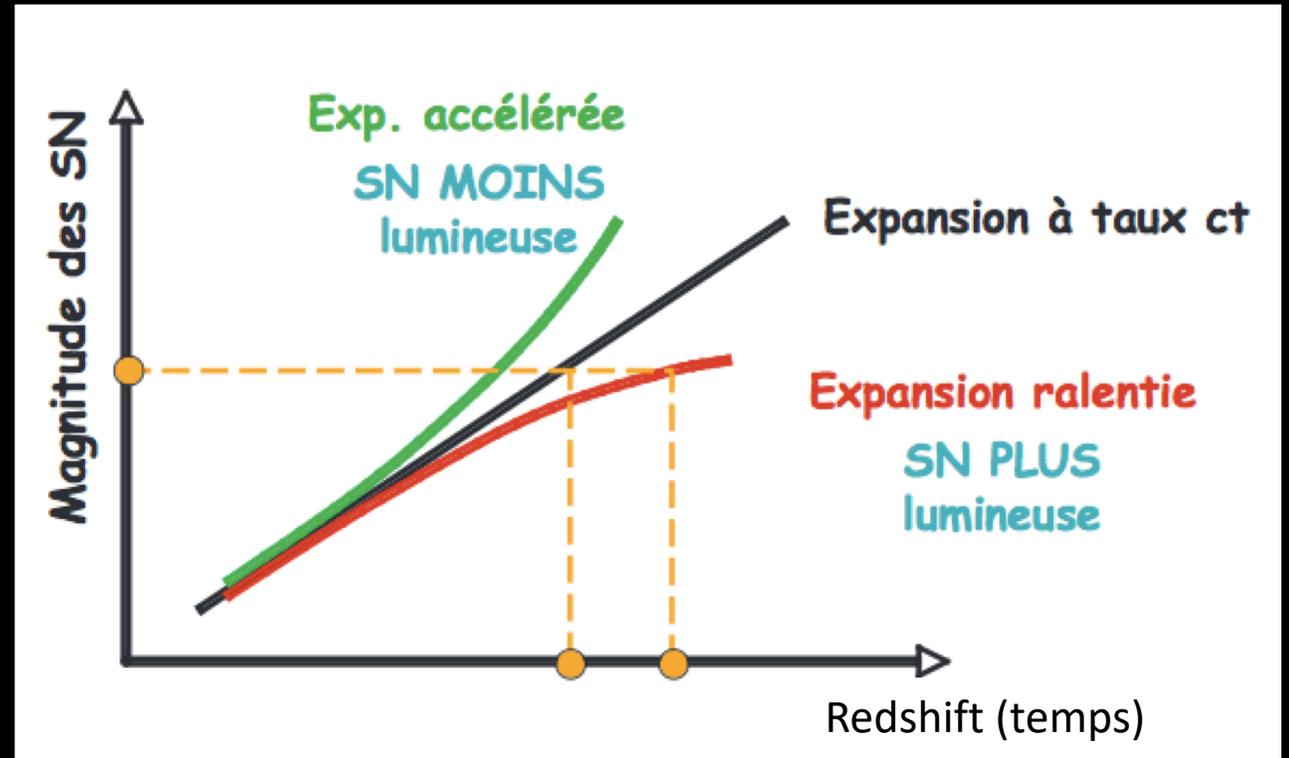
Piste historique : SN Ia

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*



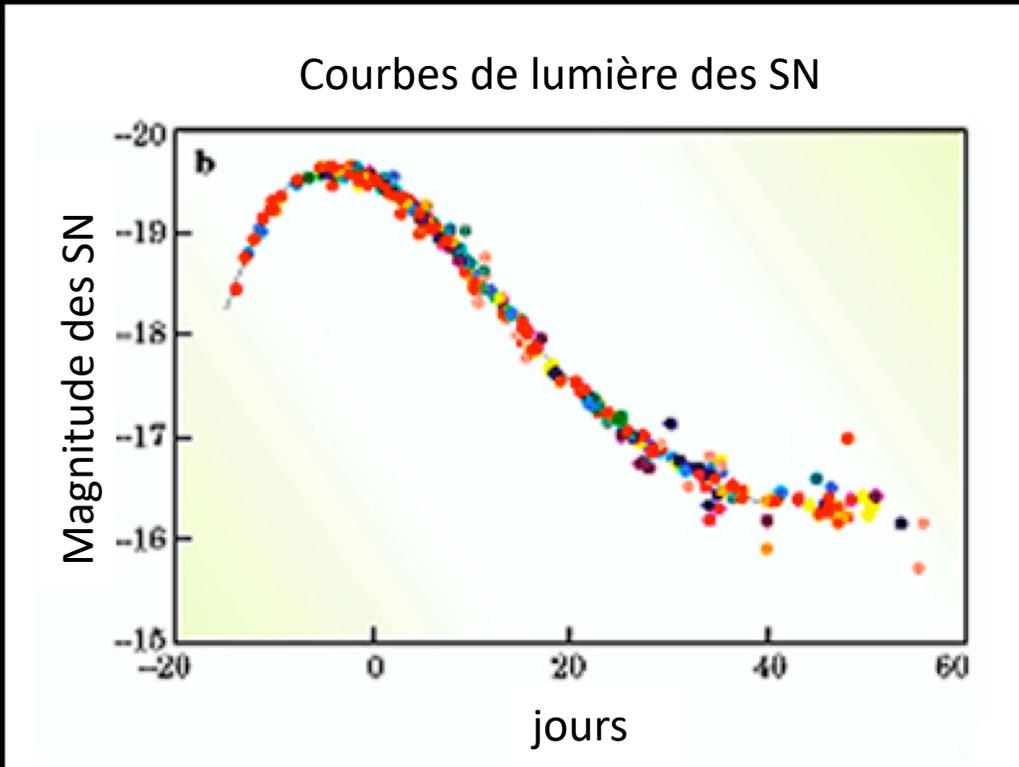
→ Mesurer la vitesse d'expansion de l'univers à partir de la luminosité des SN Ia en fonction du *redshift*



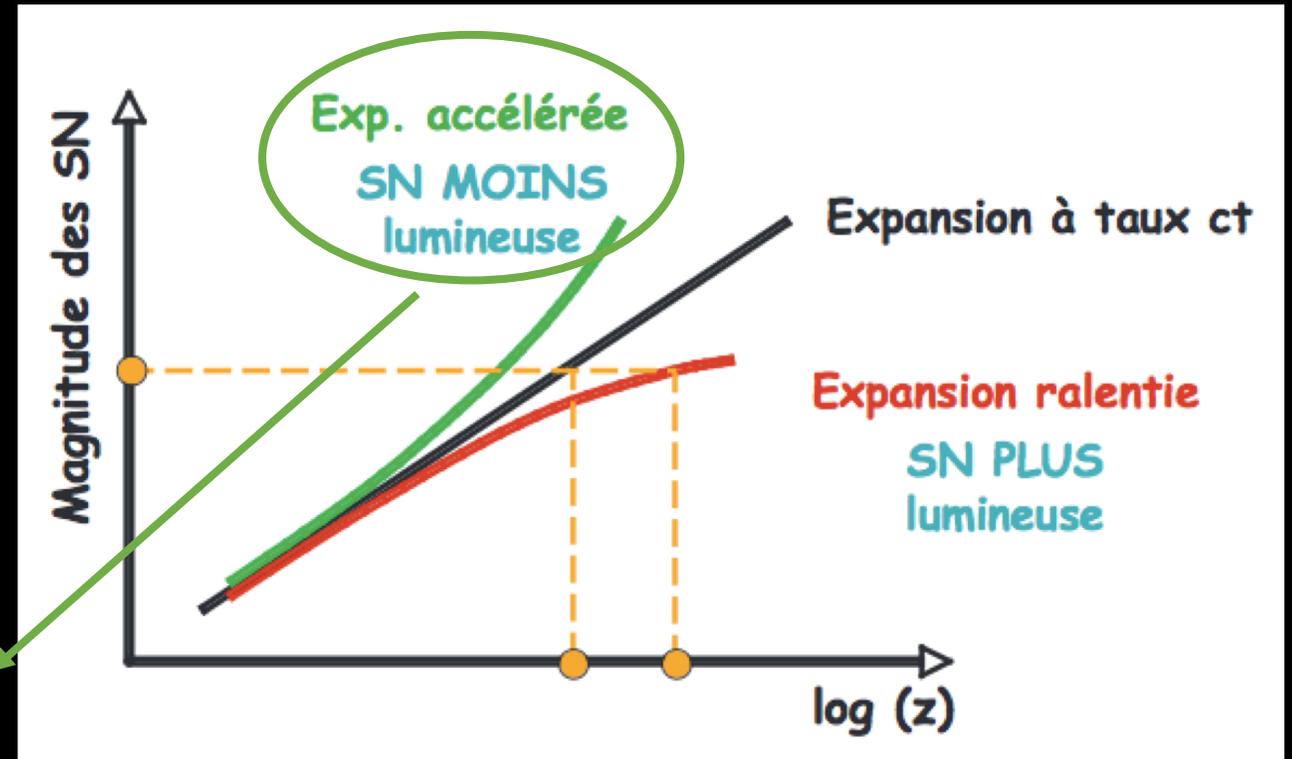
Piste historique : SN Ia

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*



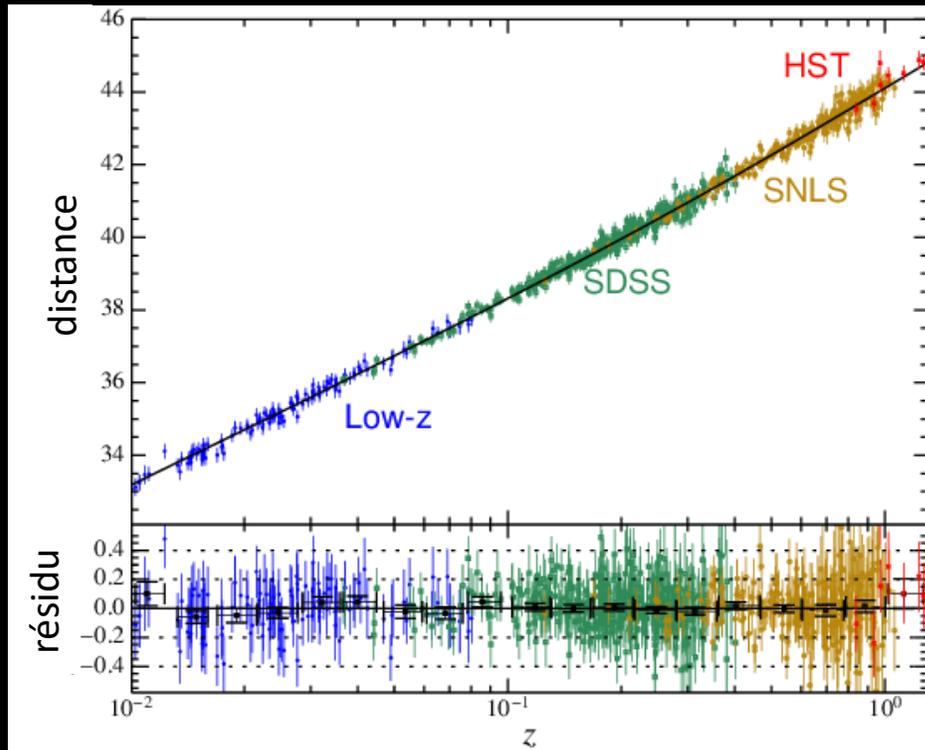
→ Mesurer la vitesse d'expansion de l'univers à partir de la luminosité des SN Ia en fonction du *redshift*



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

Piste historique : SN Ia

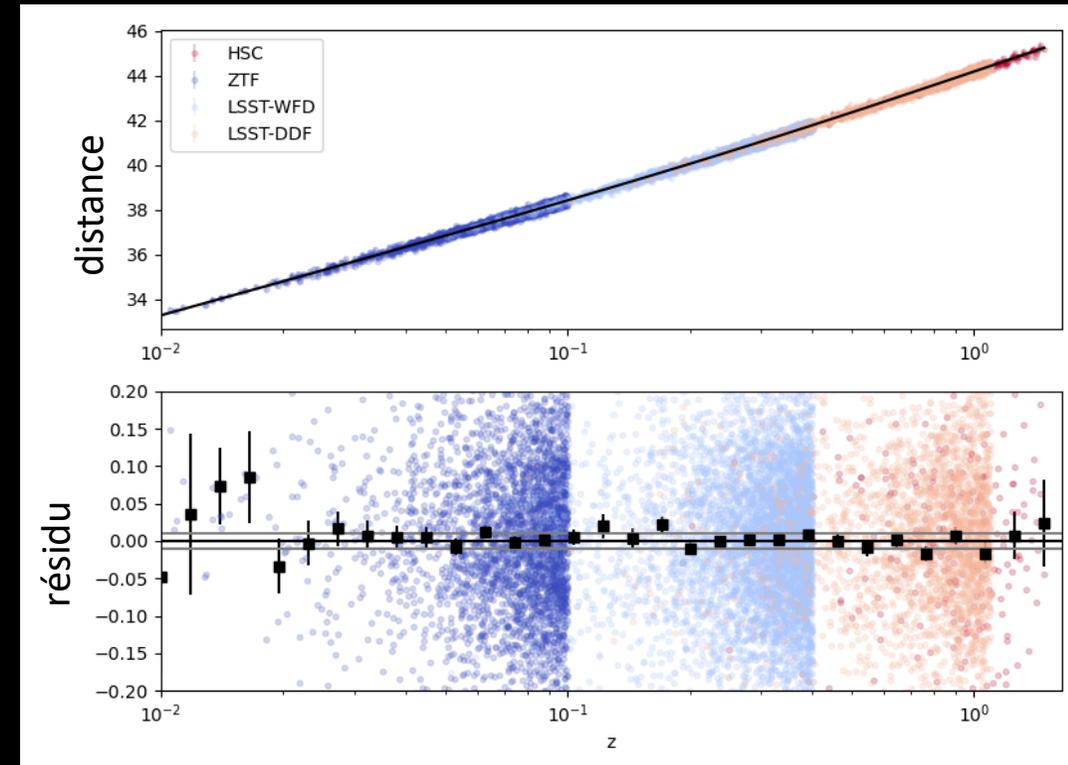
Un défi majeur : la calibration du flux lumineux des SN Ia



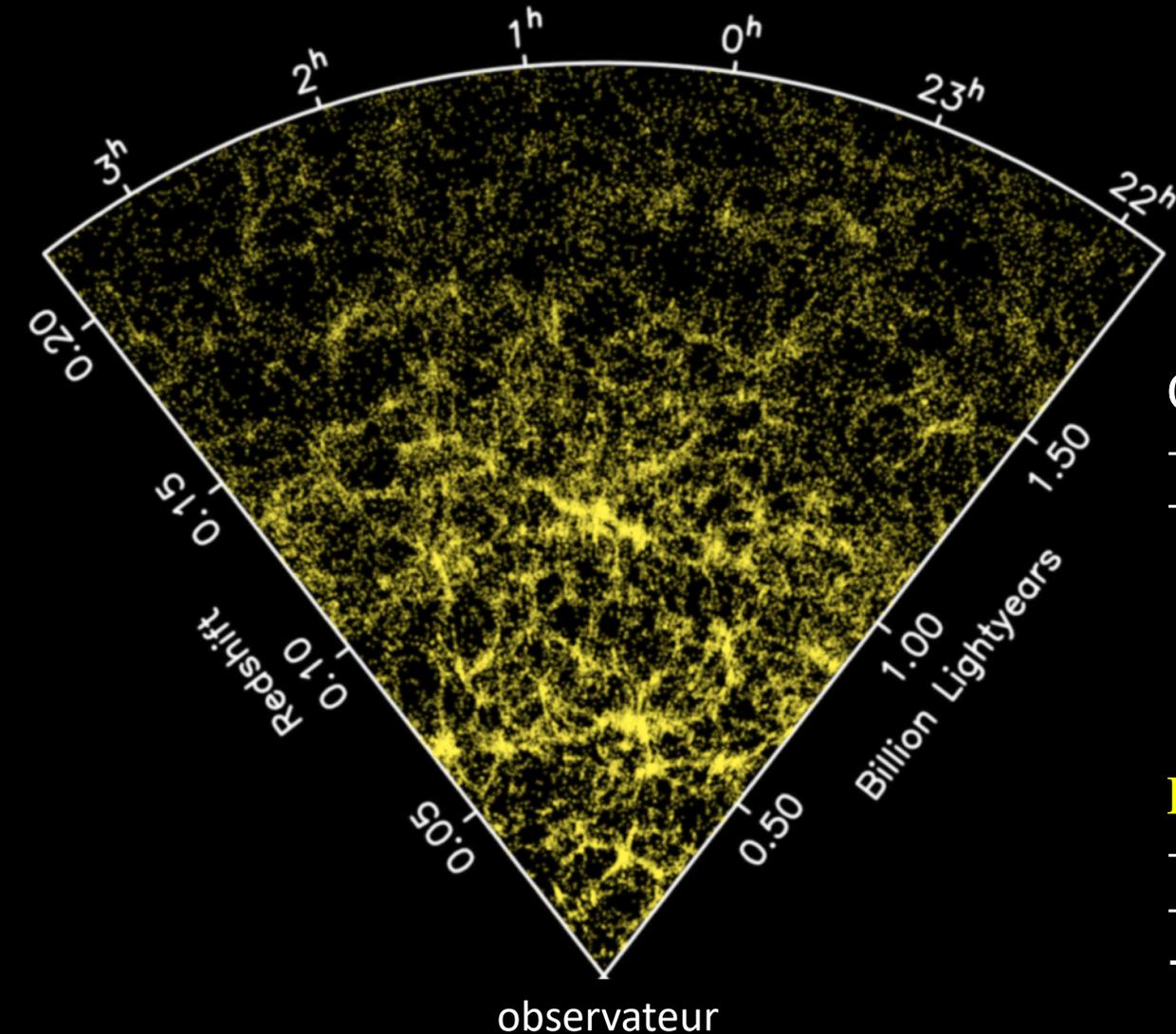
- 1998 : 50 SN Ia
→ le groupe SN du LPNHE se crée !
- 2005 : 100
- 2014 : 1 000
- 2023 : 5 000
- 2025 : 10 000

Défi scientifique et technologique !

Plus de SN Ia (meilleure précision statistique) exige une meilleure calibration photométrique.



Piste émergente : la distribution des galaxies



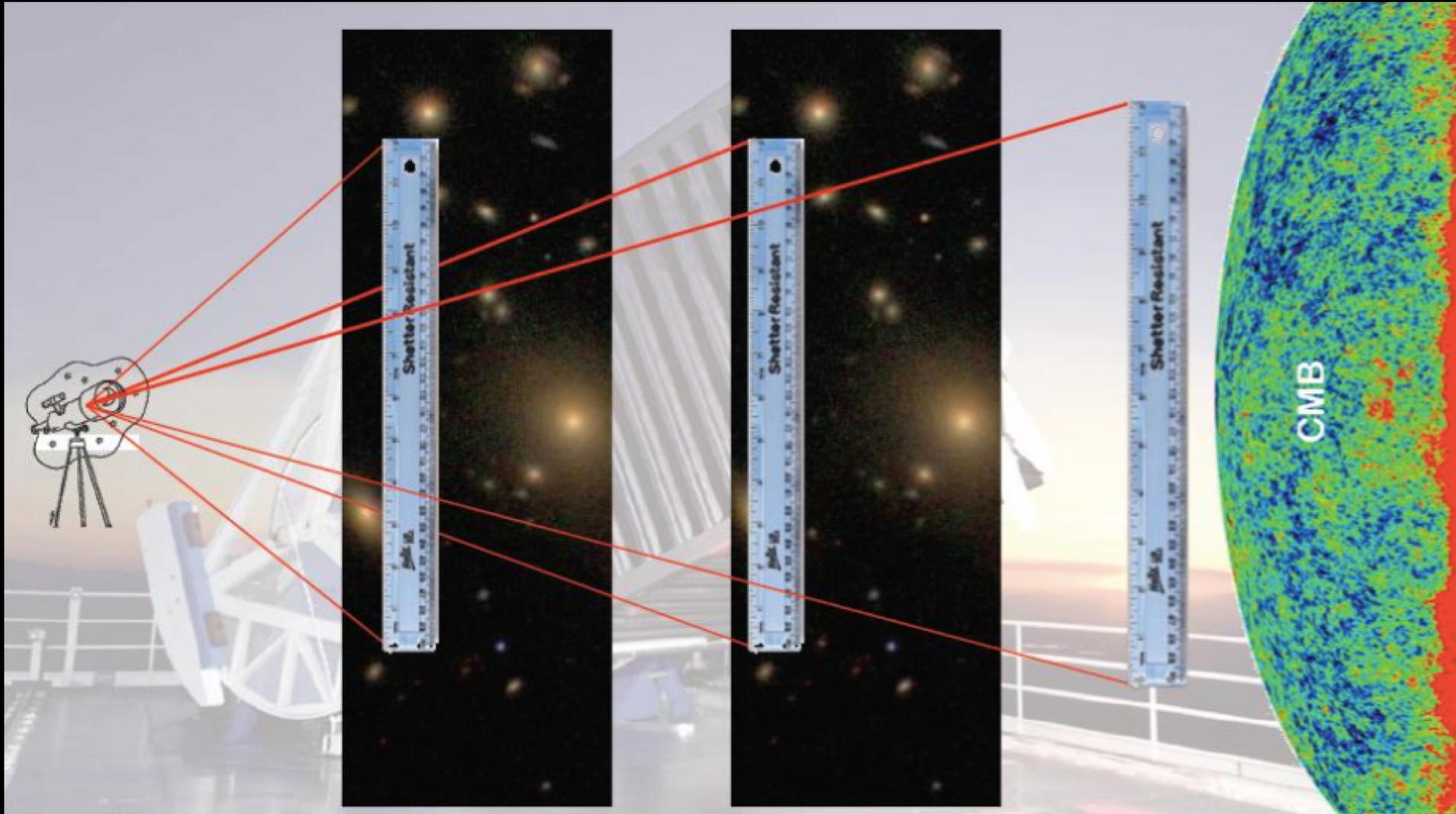
Grands relevés de galaxies → **cartographie 3D**

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

Distribution spatiale des galaxies non uniforme :

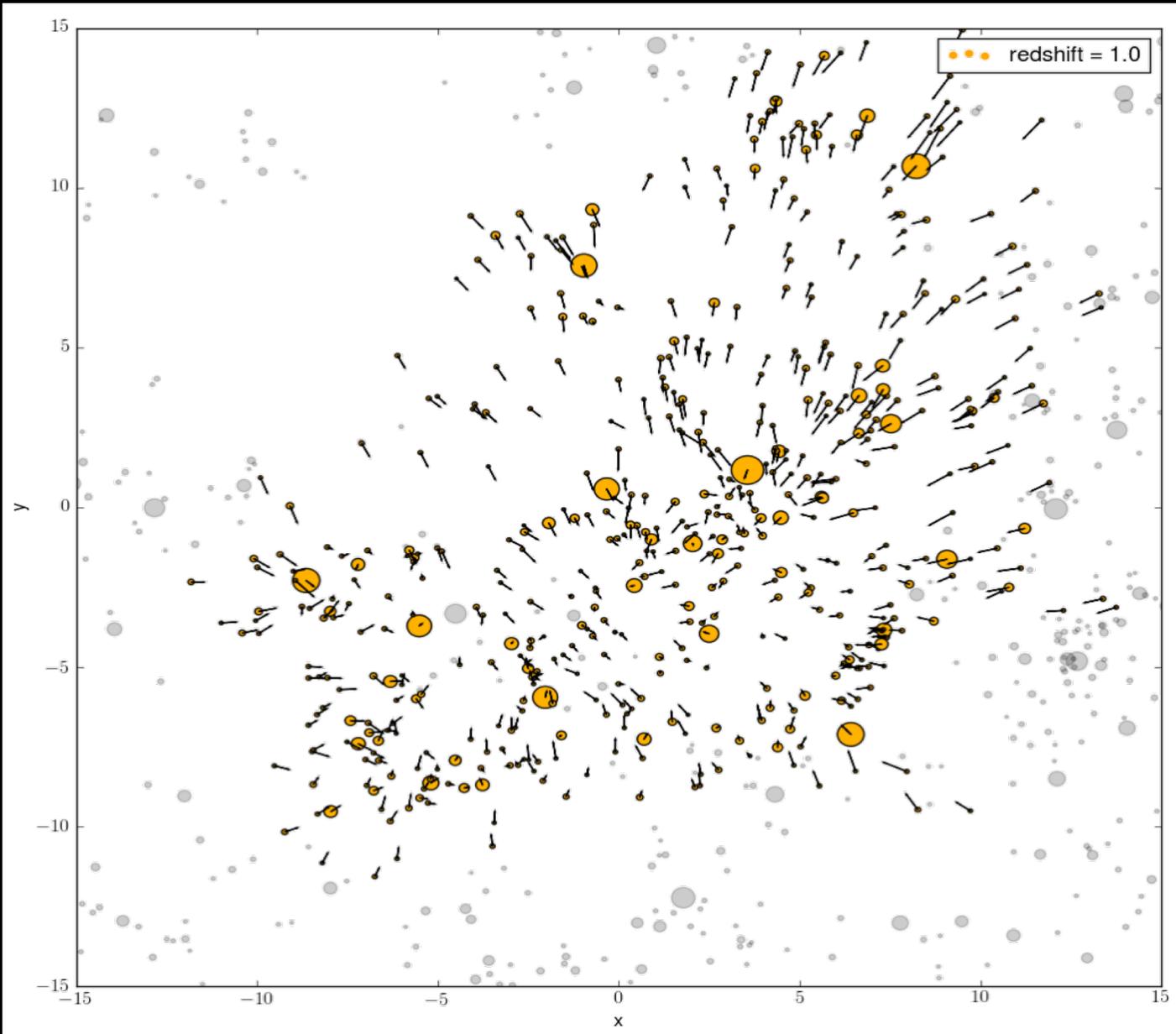
- régions avec beaucoup de galaxies → « clusters »
 - régions avec peu de galaxies → vides
- Contraste de densité

Piste émergente : la distribution des galaxies



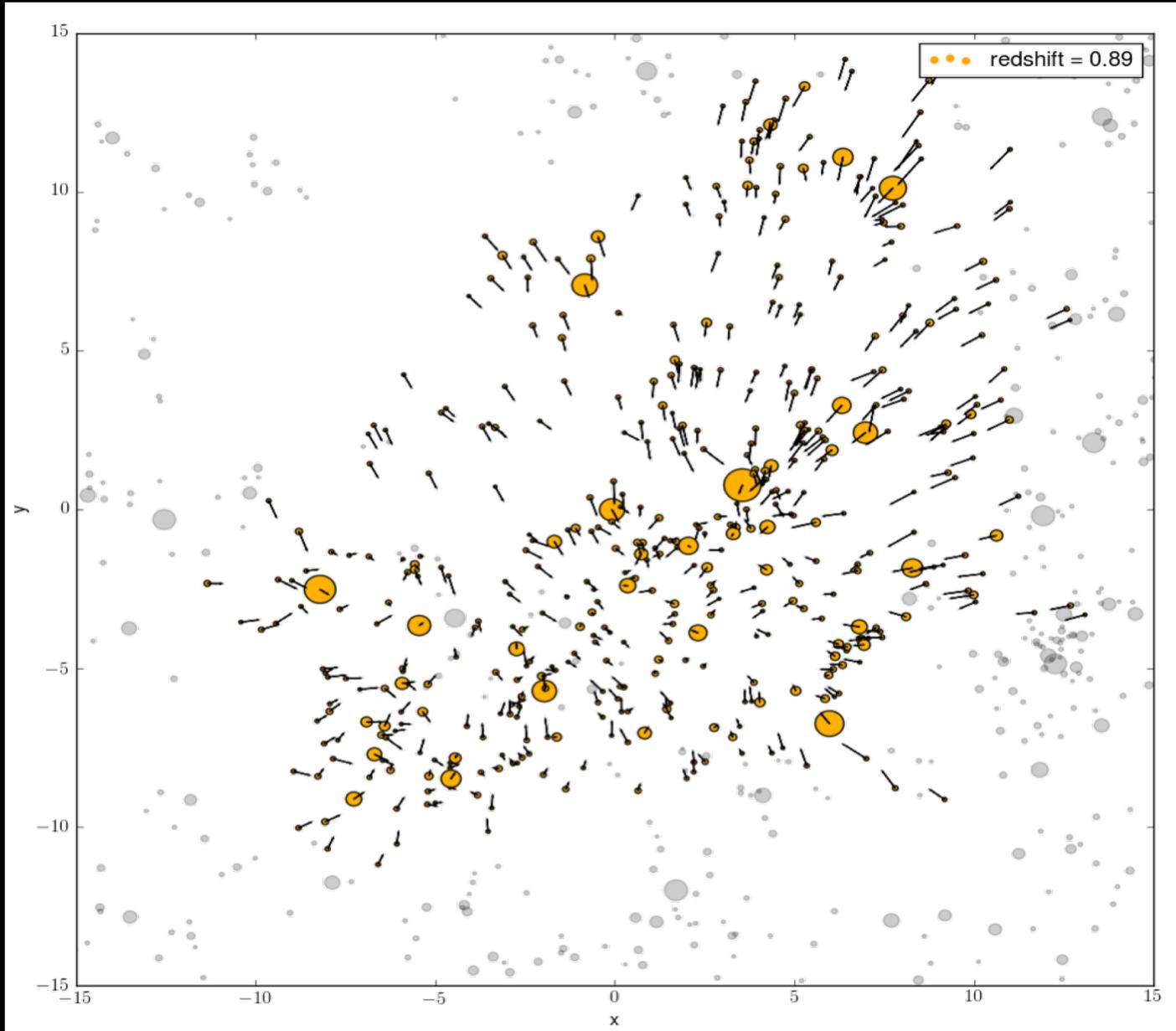
→ Distance caractéristique entre deux galaxies comme une règle standard pour mesurer l'évolution des distances entre les galaxies au cours du temps
Et donc pour **retracer l'histoire de l'expansion de l'univers**

Piste émergente : la distribution des galaxies



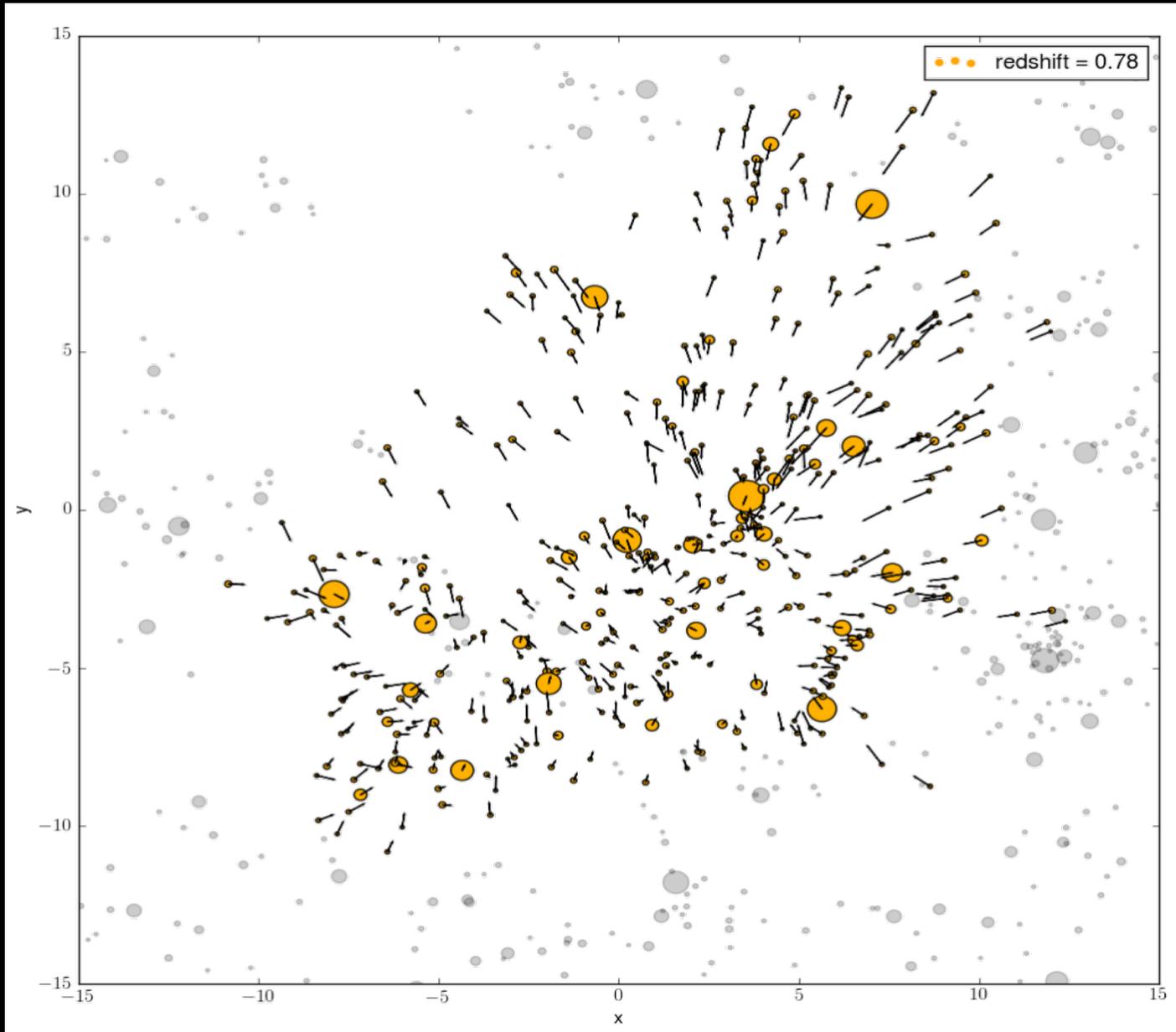
Chaque point représente une galaxie simulée et chaque point a une flèche qui représente la **vitesse propre de la galaxie**

Piste émergente : la distribution des galaxies



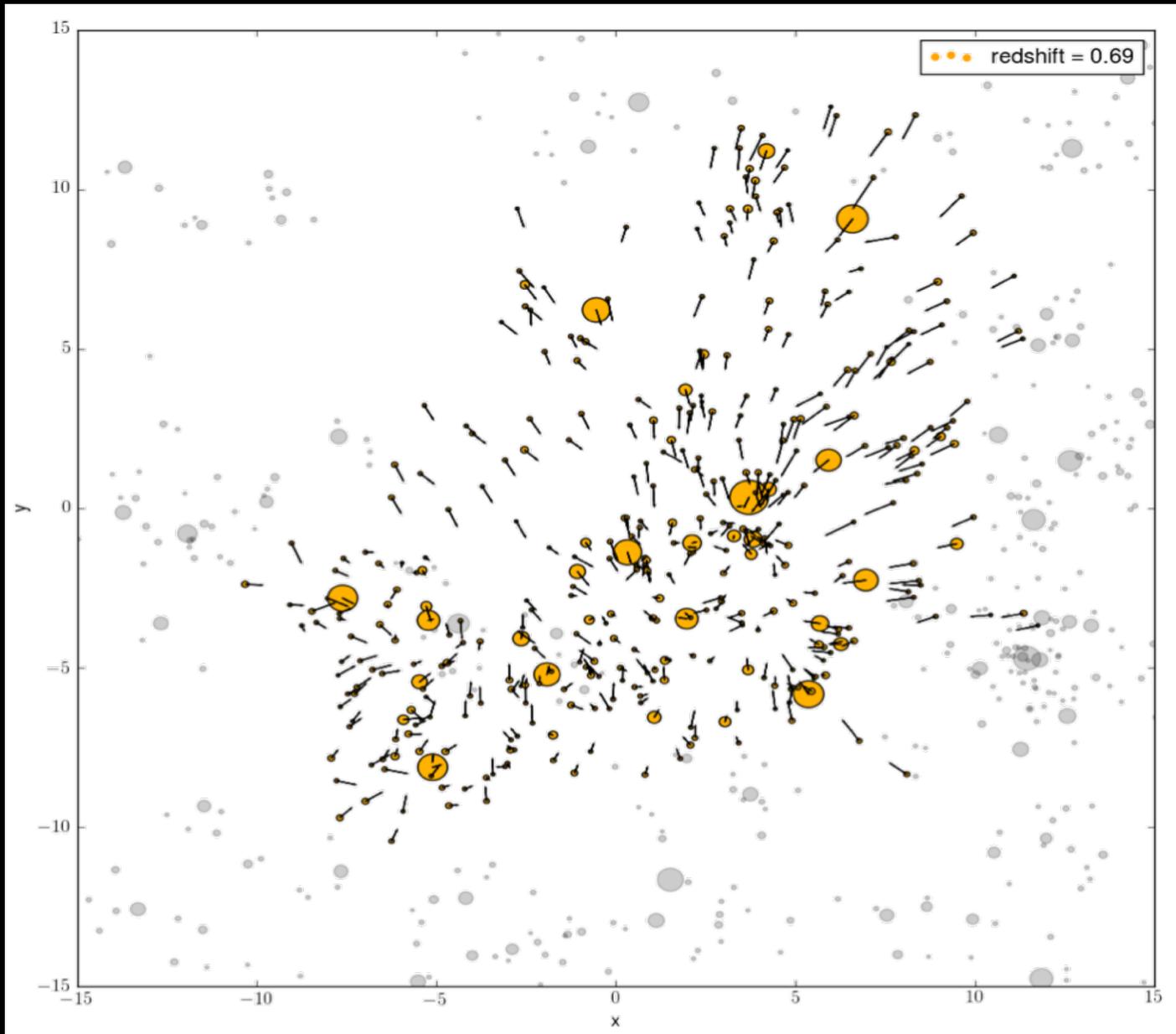
Chaque point représente une galaxie simulée et chaque point a une flèche qui représente la **vitesse propre de la galaxie**

Piste émergente : la distribution des galaxies



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

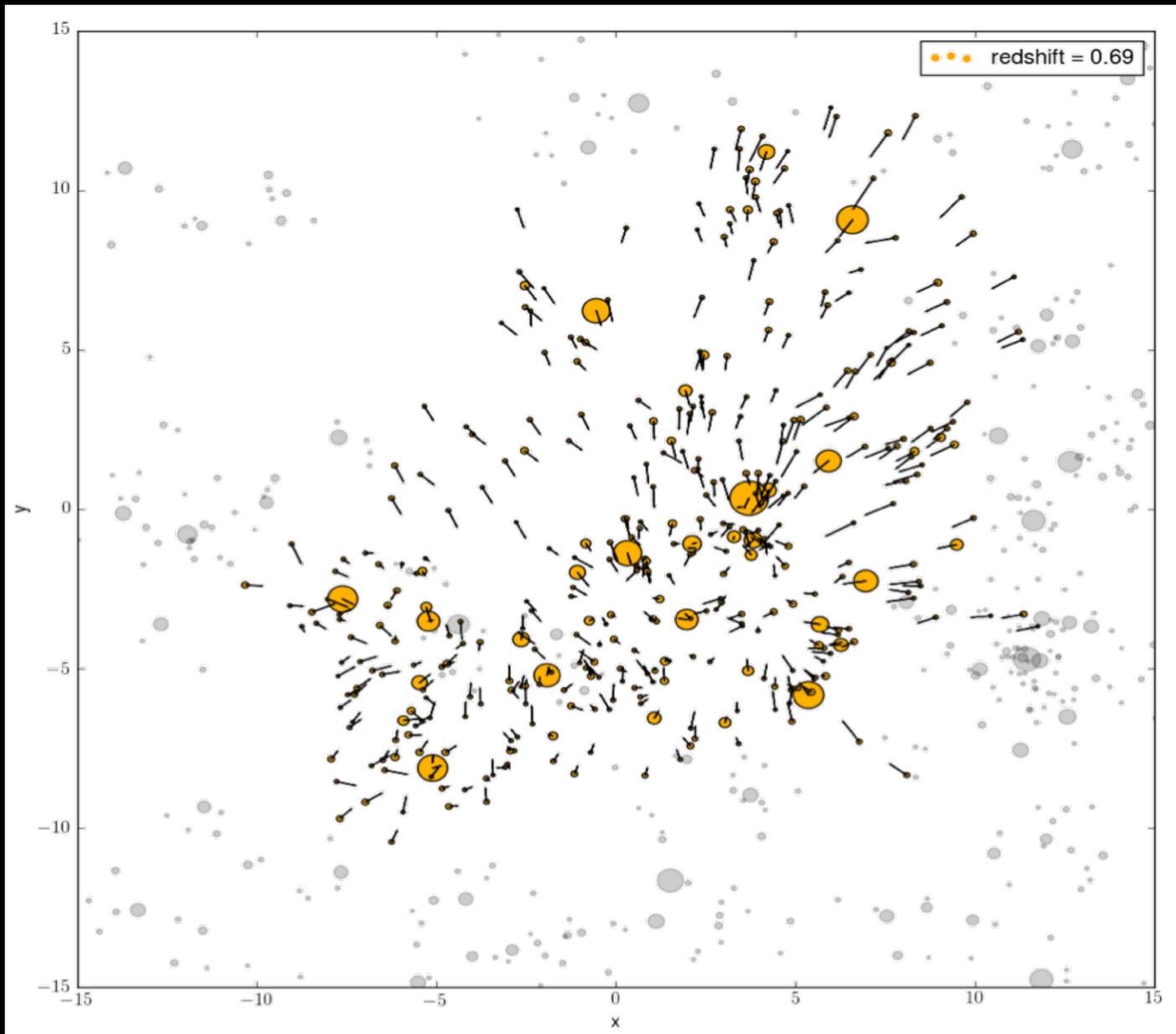
Piste émergente : la distribution des galaxies



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**

Piste émergente : la distribution des galaxies



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

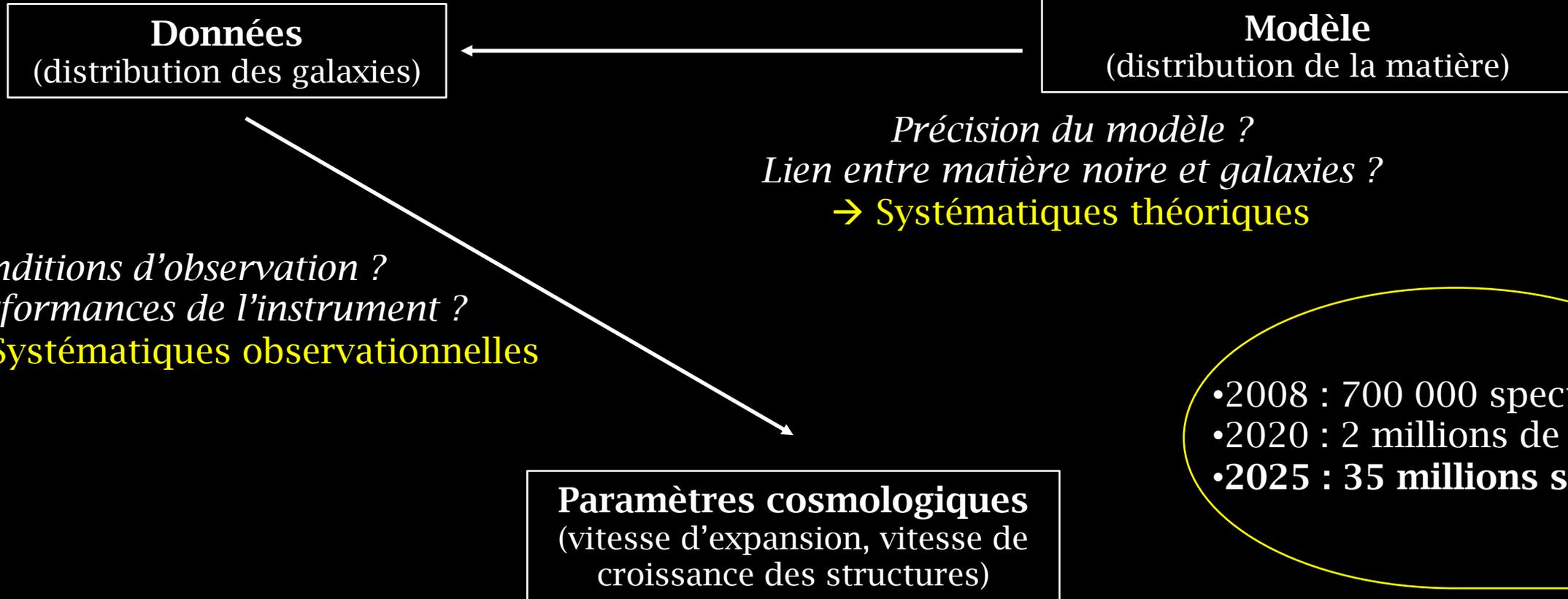
Les galaxies s'attirent les unes entre elles pour former des structures plus grandes
→ **effondrement dû à la force de gravité**

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

Piste émergente : la distribution des galaxies

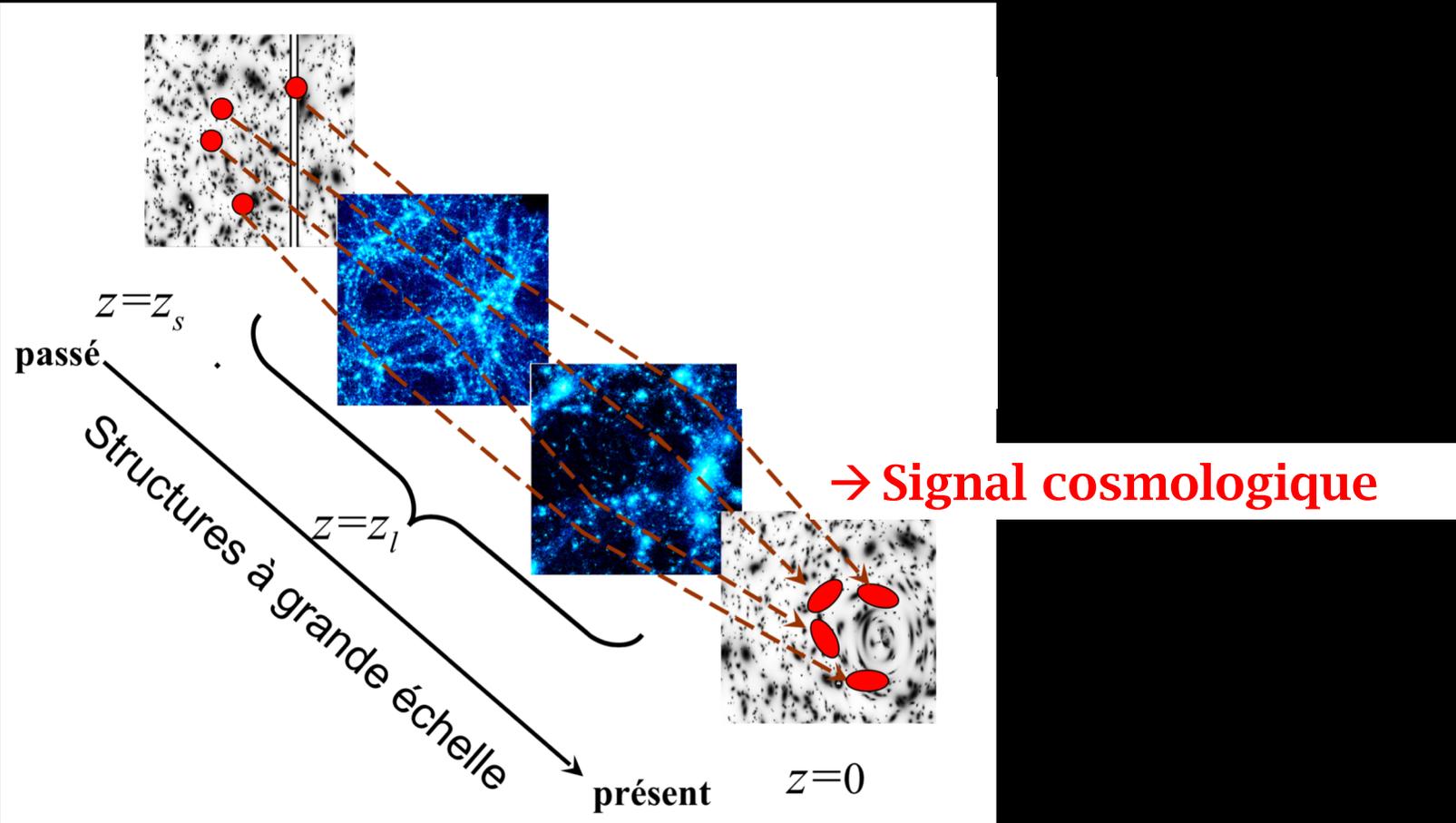
Un défi majeur : le contrôle des effets systématiques < %

Défi scientifique et technologique !

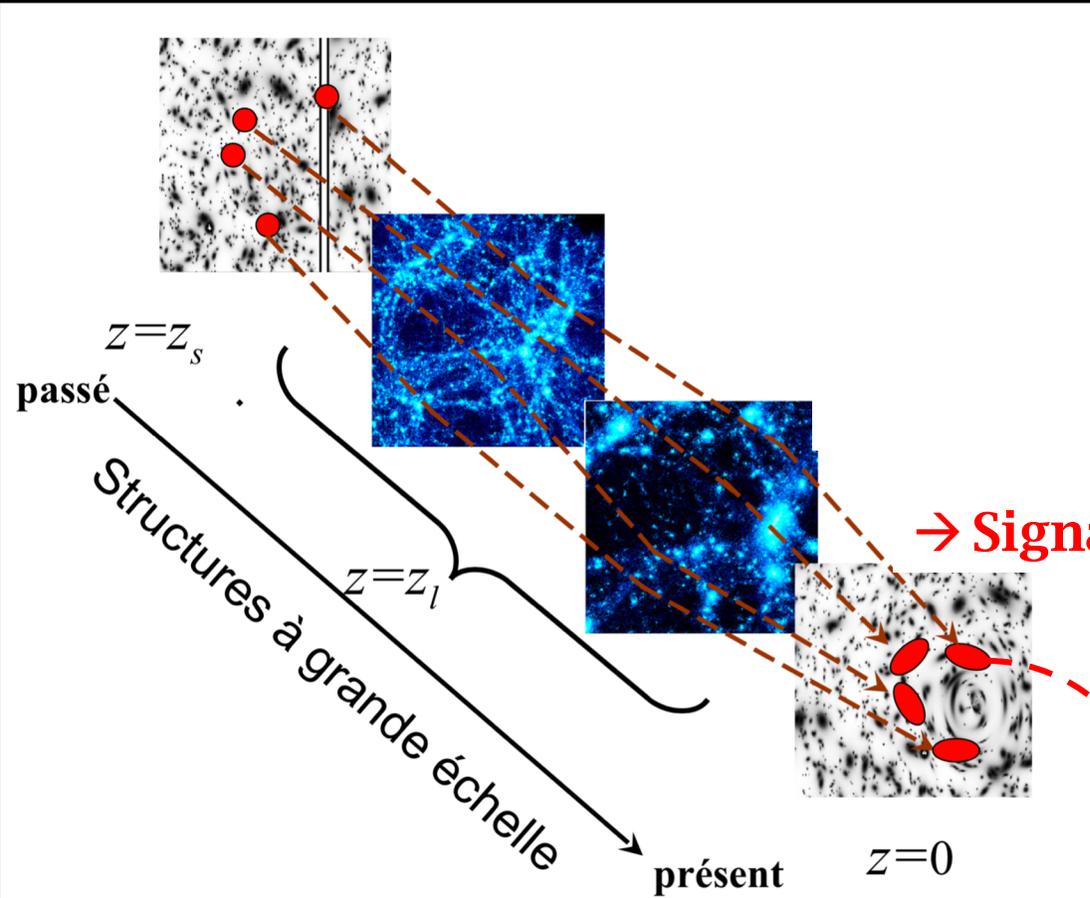


- 2008 : 700 000 spectres
- 2020 : 2 millions de spectres
- 2025 : 35 millions spectres

Piste prometteuse : la forme des galaxies

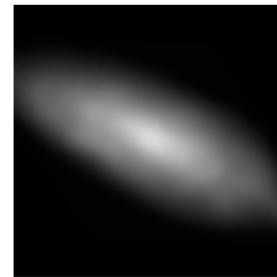


Piste prometteuse : la forme des galaxies

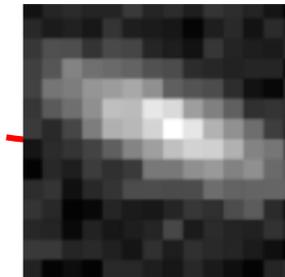


→ Signal cosmologique

Propagation des photons à travers l'atmosphère puis le télescope



Pixelisation de l'image à travers la camera du télescope



→ Signal observé

Piste prometteuse : la forme des galaxies

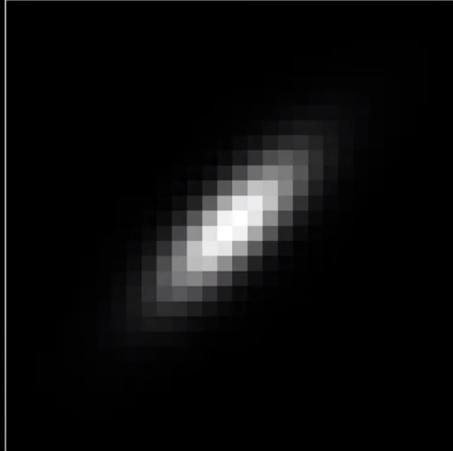
Un défi majeur : modéliser la turbulence atmosphérique et les déformations liées à l'instrument (PSF)



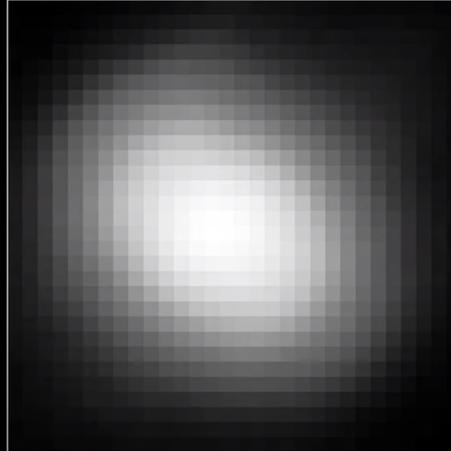
Truth image



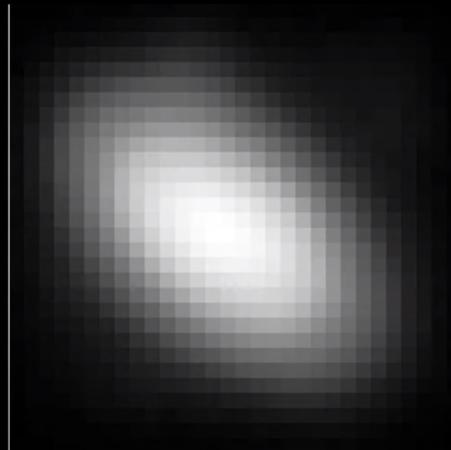
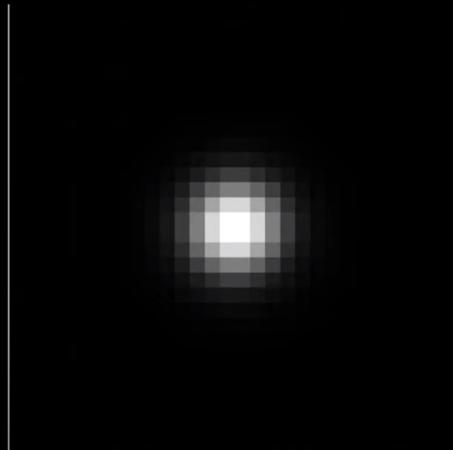
PSF



Observed image



Changer la *forme de la PSF* change l'image observée ([lien youtube](#))



Changer la *taille de la PSF* change l'image observée ([lien youtube](#))

Défi scientifique et technologique !

Qui appuie sur la pédale d'accélérateur de l'expansion de l'univers ?

Les grands projets dans lesquels le LPNHE est impliqué



BOSS/eBOSS (2008-2020)



DESI (2021-2026)

Distribution 3D des galaxies @LPNHE

BOSS / eBOSS

DESI

Qui appuie sur la pédale d'accélérateur de l'expansion de l'univers ?



Les grands projets dans lesquels le LPNHE est impliqué



BOSS/eBOSS (2008-2020)



DESI (2021-2026)



ZTF (2018-2024)



Subaru HSC (2017-2020)



LSST (2023-2033)

Distribution 3D des galaxies @LPNHE

BOSS / eBOSS
DESI

SN Ia @LPNHE

ZTF / Subaru HSC
LSST (Vera Rubin)

Forme des galaxies @LPNHE

Subaru HSC
LSST (Vera Rubin)

Complémentarité des approches



Forme des galaxies
(HSC, LSST)

Distribution des
galaxies (DESI)

Distribution des
forêts Lya (DESI)

SN Ia
(ZTF)

(LSST)

SN Ia
(HSC)

Redshift z

$z = 0$

$z = 0.1$

$z = 0.6$

$z = 2$

$z = 3.5$

$z = 1100$

Aujourd'hui

Expansion accélérée (il y a 6 milliards d'années)

380 000 ans (CMB)

Big Bang

Et synergie des approches



Forme des galaxies
(HSC, LSST)

Synergie : Analyser la distribution des formes et des positions des galaxies en même temps

Distribution des galaxies (DESI)

Distribution des forêts Lya (DESI)

Synergie : Certaines galaxies de DESI abritent des SN Ia

SN Ia
(ZTF)

(LSST)

SN Ia
(HSC)

Redshift z

$z = 0$

$z = 0.1$

$z = 0.6$

$z = 2$

$z = 3.5$

$z = 1100$

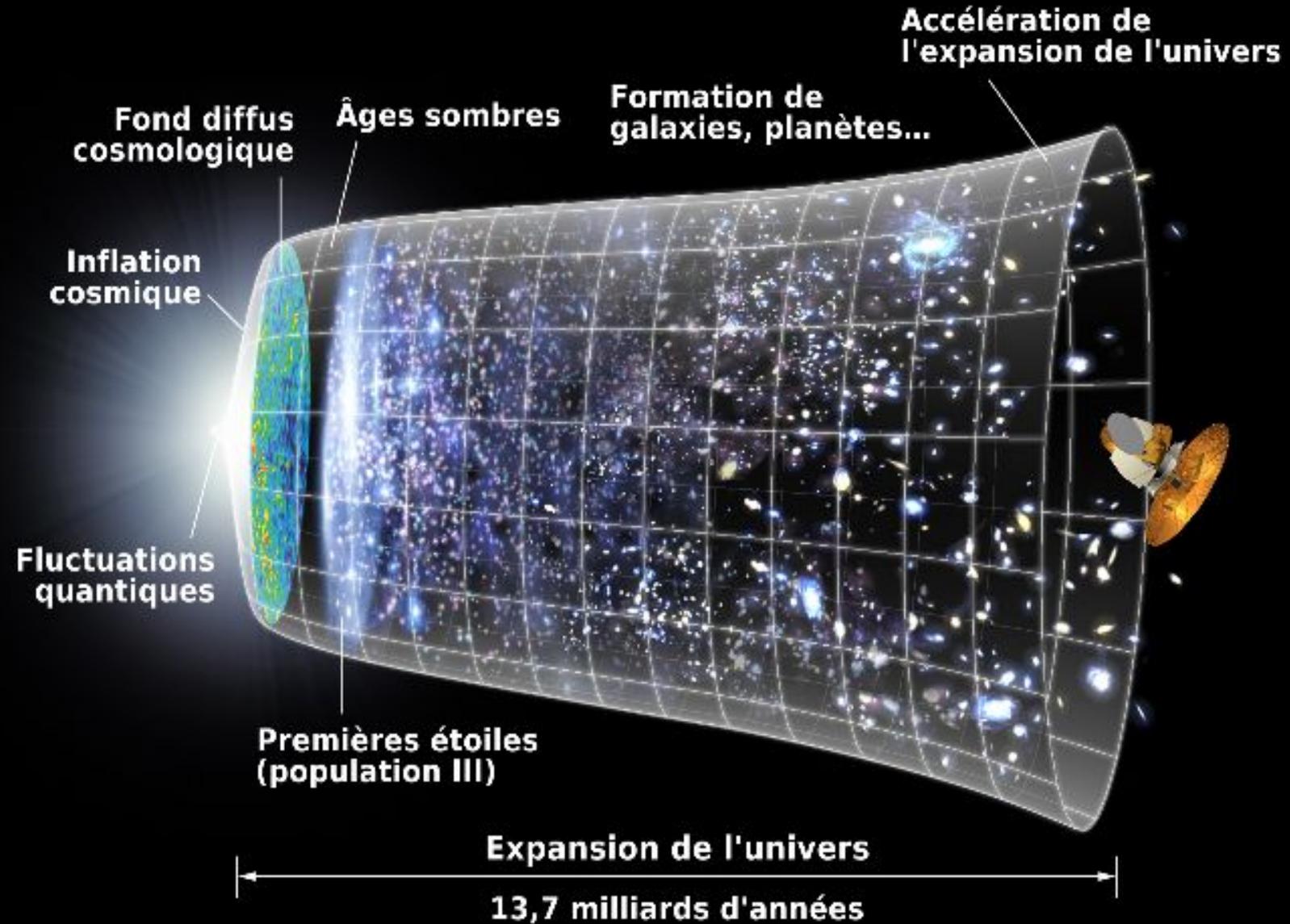
Aujourd'hui

Expansion accélérée

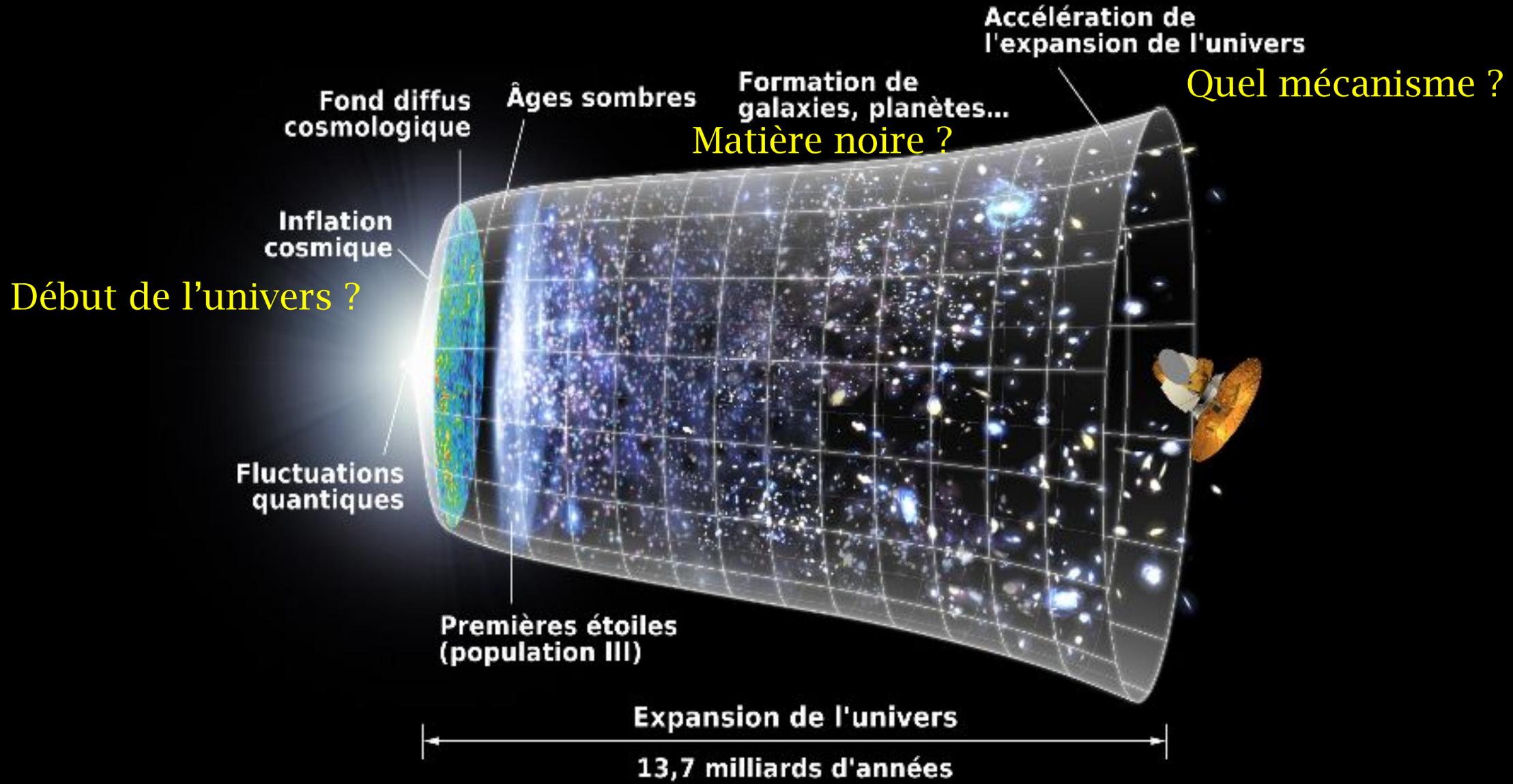
380 000 ans (CMB)

Big Bang

Objectif final : Retracer toute notre histoire cosmique



Objectif final : Retracer toute notre histoire cosmique





Merci pour votre attention !

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