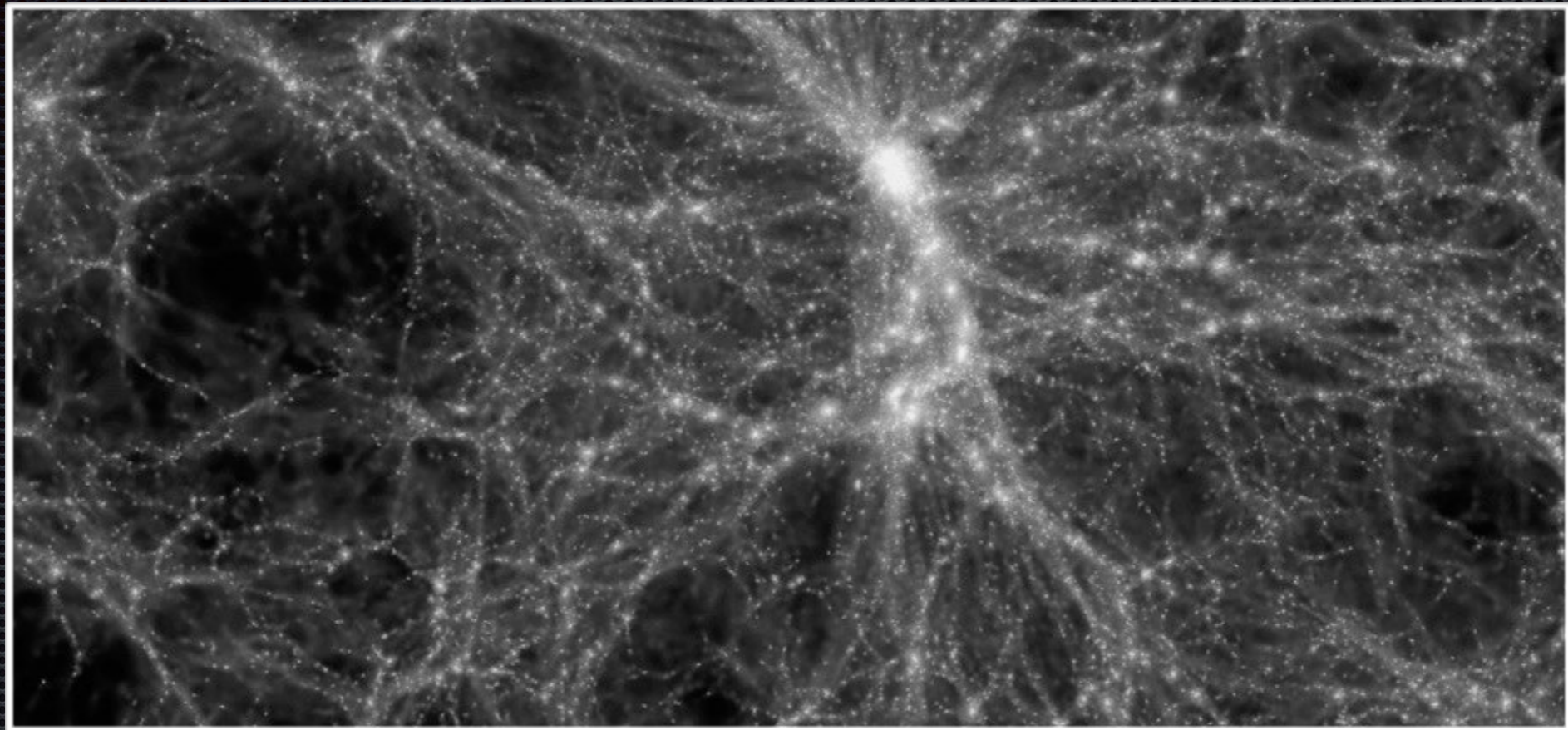


Cosmologie Observationnelle



Alice Pisani



Montpellier, 27/06/2017
OCEVU Summer Camp L2

Cosmologie Observationnelle

I) Les piliers de la Cosmologie Moderne

II) La composition de l'Univers

III) Les grandes structures, un outil pour comprendre l'Univers

Cosmologie Observationnelle

I) Les piliers de la Cosmologie Moderne

II) La composition de l'Univers

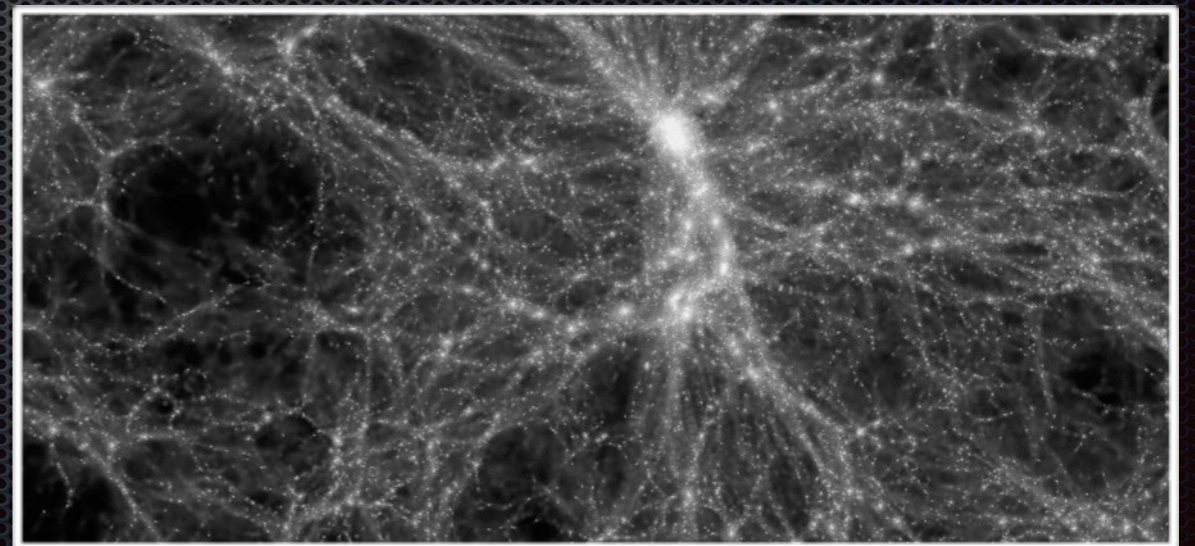
III) Les grandes structures, un outil pour comprendre l'Univers

Cosmologie Observationnelle

étudier notre Univers

grâce aux observations

C'est une
discipline
relativement
récente !



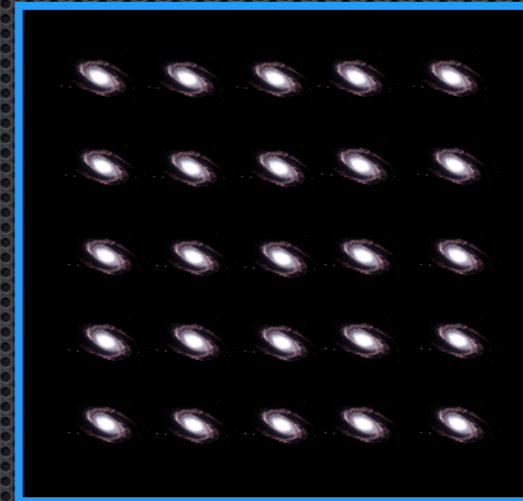
Que sait-on?

Principes de base:

- 1) les lois physiques sont les mêmes à grande échelle (ex: Relativité Générale)
- 2) notre position n'est PAS privilégiée

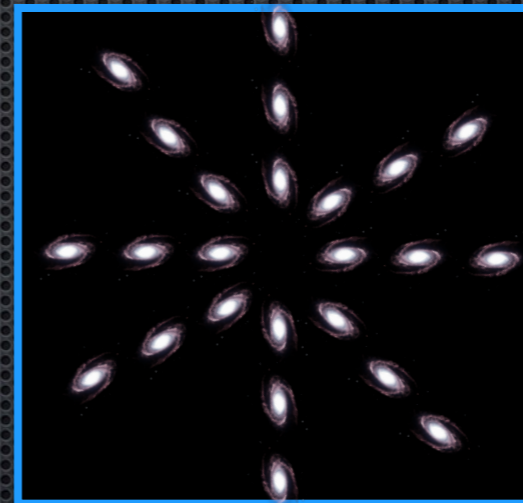
l'Univers est le même partout

l'Univers est le même dans toutes les directions



Homogène

+

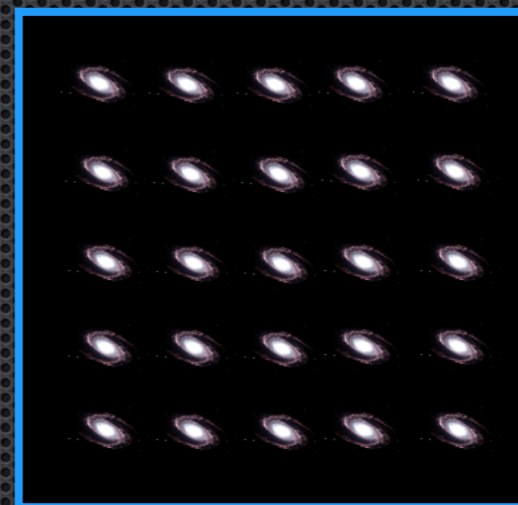


Isotrope

Que sait-on?

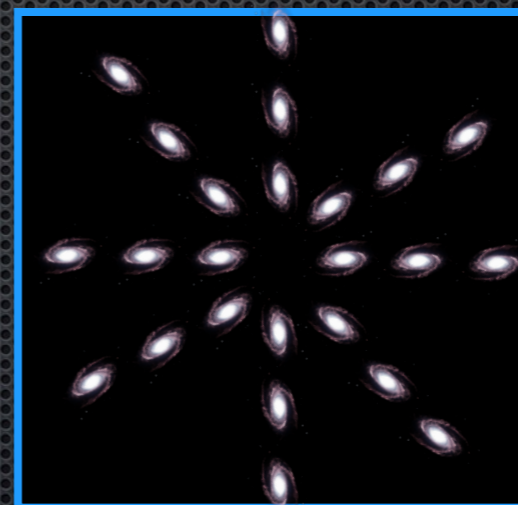
Principes de base:

- 1) les lois physiques sont les mêmes à grande échelle (ex: Relativité Générale)
- 2) notre position n'est PAS privilégiée



Homogène

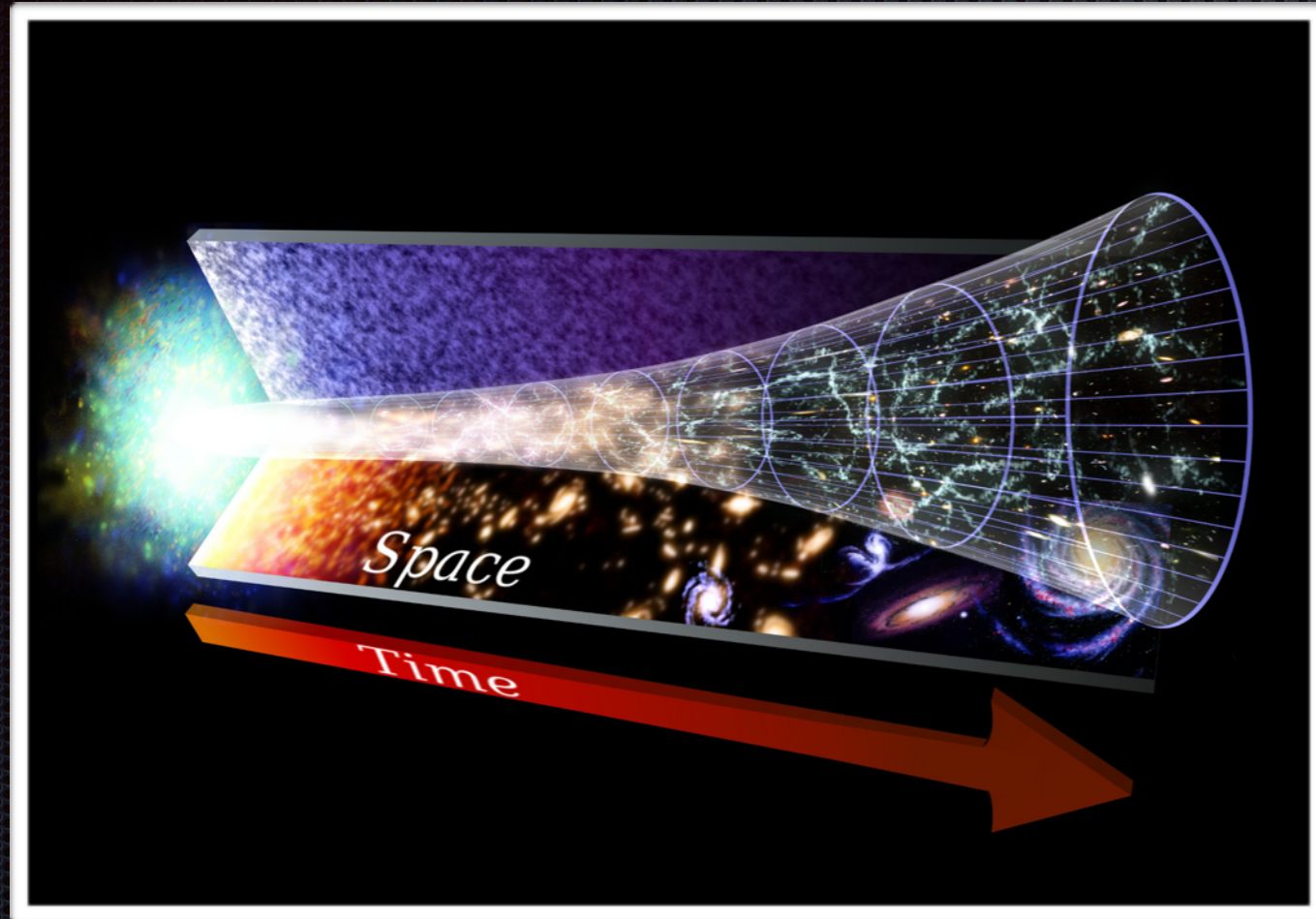
+



Isotrope

c'est le Principe cosmologique

L'Univers est en expansion ...



Slipher, Lemaître, Hubble

comment le sait-on?

Mesurer des distances: le redshift



The screenshot shows the Wikipedia article for 'Effet Doppler'. The title is 'Effet Doppler'. Below the title, there is a note: 'Pour les articles homonymes, voir Doppler.' The main text explains that the Doppler effect, or Doppler-Fizeau effect, is the shift in frequency of a wave (mechanical, acoustic, electromagnetic, or of another nature) observed between emission and reception when the distance between the emitter and the receiver varies over time. It notes that the term 'effet Doppler-Fizeau' is reserved for electromagnetic waves.

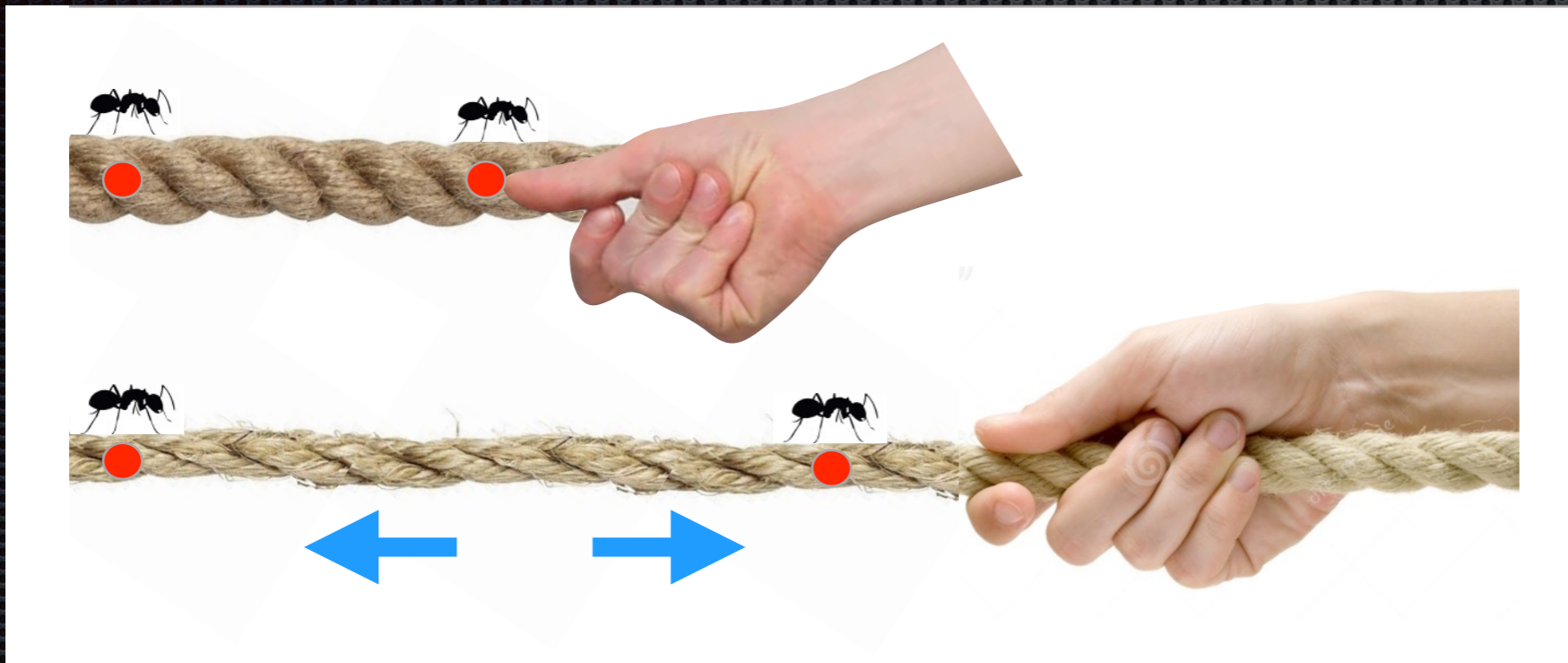
Notamment la longueur d'onde est décalée vers le rouge si l'objet s'éloigne.

$$z = \frac{\lambda_o - \lambda_e}{\lambda_e} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

Observation: Les galaxies autour de nous présentent presque toutes un redshift ! Comme il est improbable que toutes les galaxies s'éloignent de nous (Principe Cosmologique !), alors la seule explication est que l'Univers est en expansion.

La longueur d'onde est émise, mais entre-temps l'Univers subit une expansion !

Mesurer des distances: le redshift



Attention: redshift cosmologique est très différent du redshift dû à un effet Doppler, car la source n'est pas en mouvement* ! C'est l'espace entre nous et la source qui se dilate.

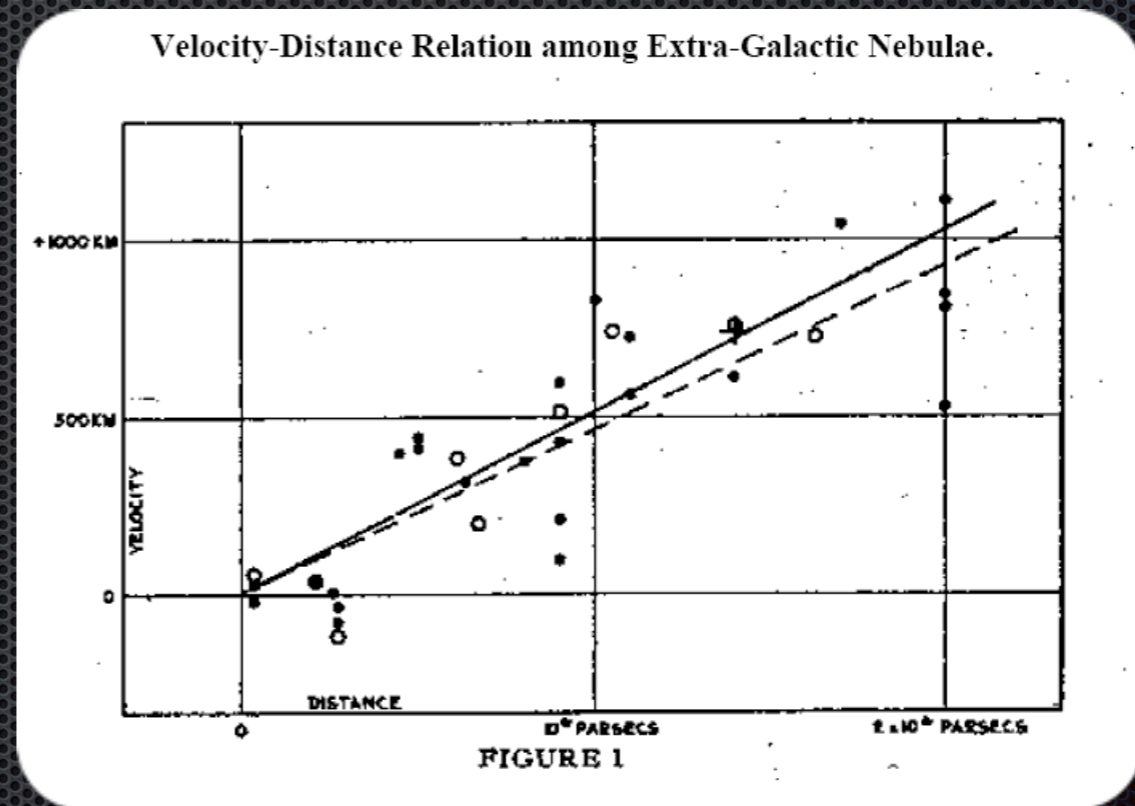
* à part les vitesses particulières, si nos fourmis décidaient de se balader sur la corde il faut rajouter une composante au redshift en + de l'expansion... voir discussion plus bas

La loi de Hubble

Pour certains objets on peut estimer leur distance (céphéides, supernovae de type Ia); et on mesure leur redshift.

On établit donc une relation entre la distance et le redshift.

$$cz = H_0 d \simeq v$$



C'est la Loi de Hubble

(Hubble(1929), Lemaître (1927), V. Slipher (1917))

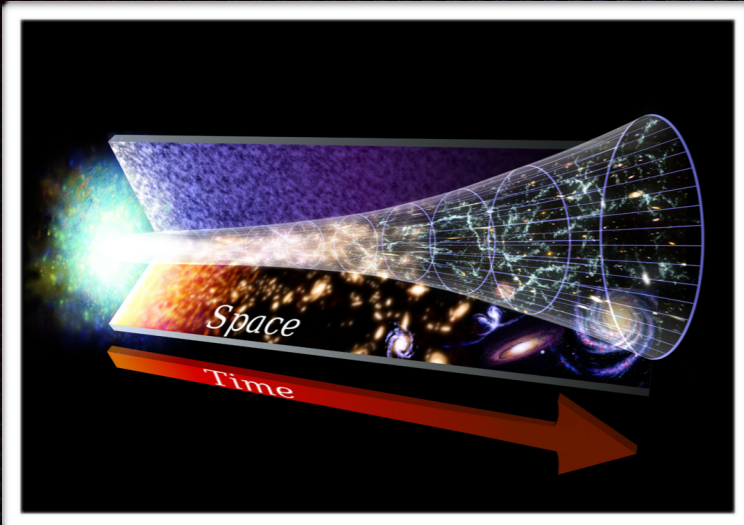
La constante de Hubble

$$cz = H_0 d \simeq v$$

H_0 (appelé constante de Hubble) est le coefficient de proportionnalité et donne une mesure du taux d'expansion de l'Univers aujourd'hui.

H_0 a une valeur d'environ 70 km/s/Mpc...

et l'expansion ... accélère !

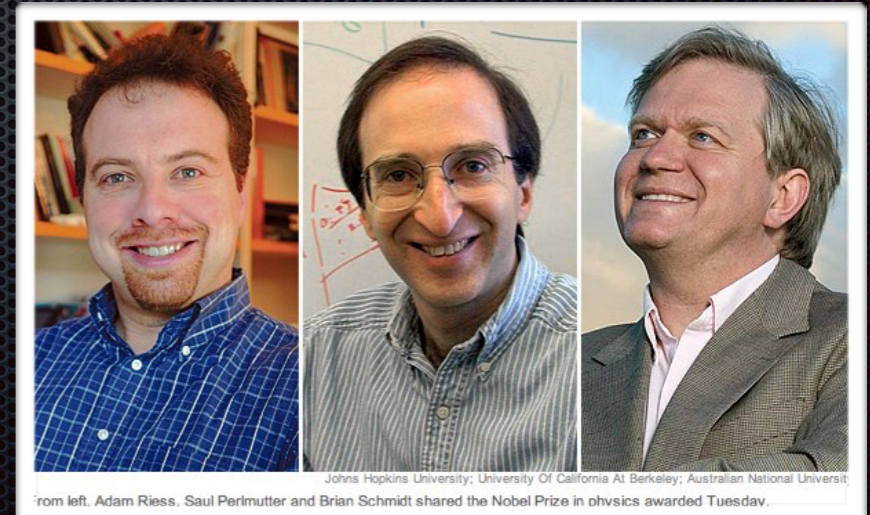
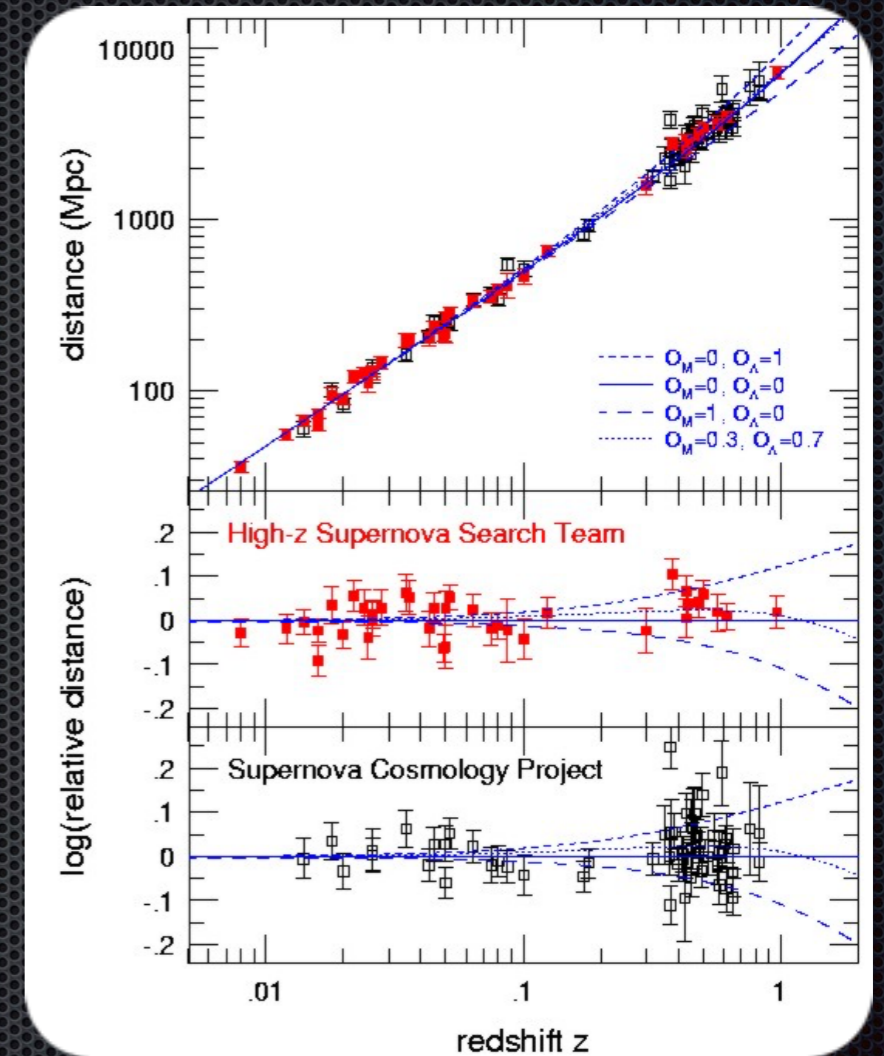


Les SNIa sont plus loin que ne le laisse penser le z.

Chandelles
Standard
Type Ia
Supernovae
(explosion
étoile)

Luminosité connue

Prix NOBEL 2011



Cosmologie Observationnelle

I) Les piliers de la Cosmologie Moderne

II) La composition de l'Univers

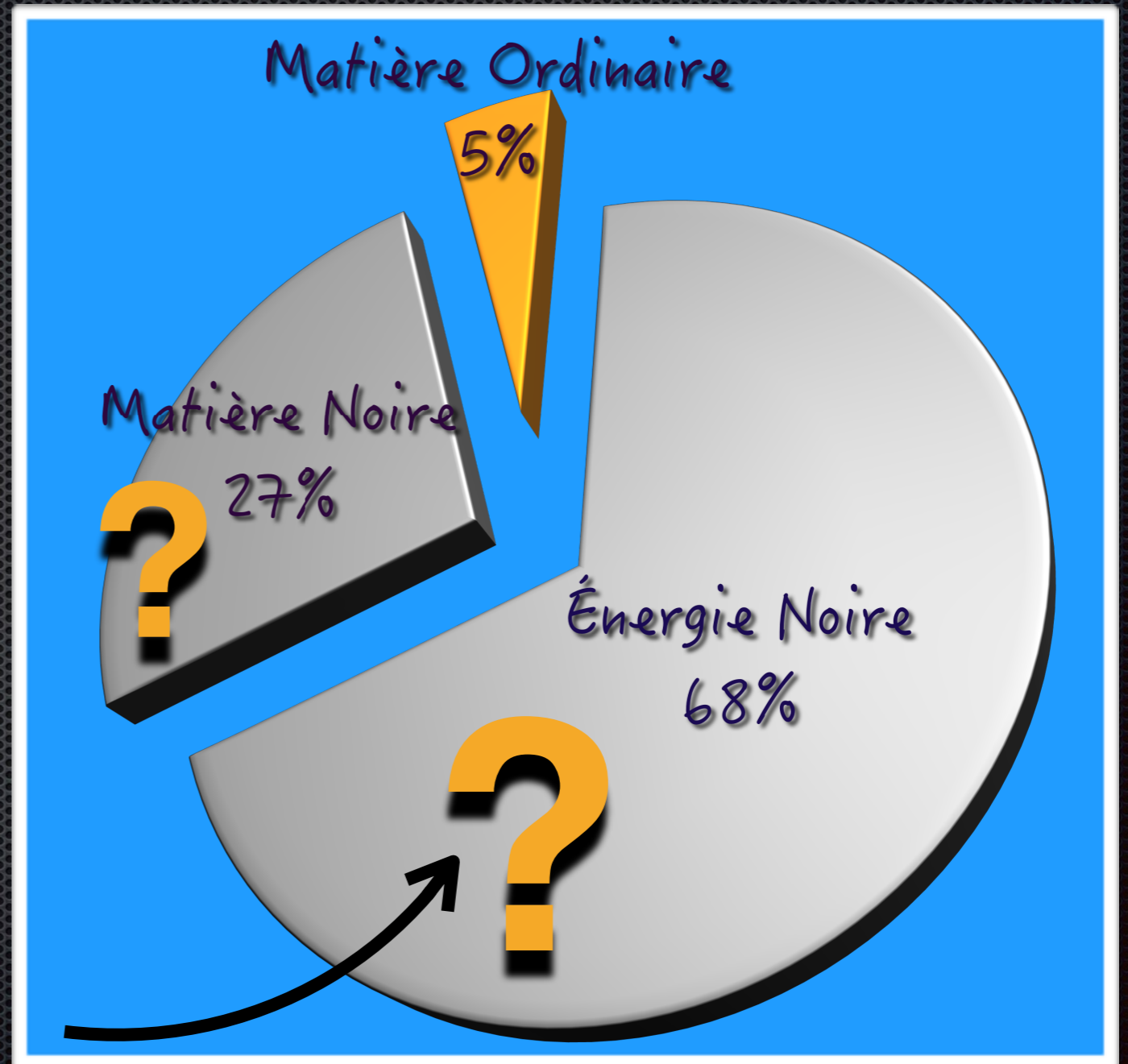
III) Les grandes structures, un outil pour contraindre l'univers

La composition de l'Univers

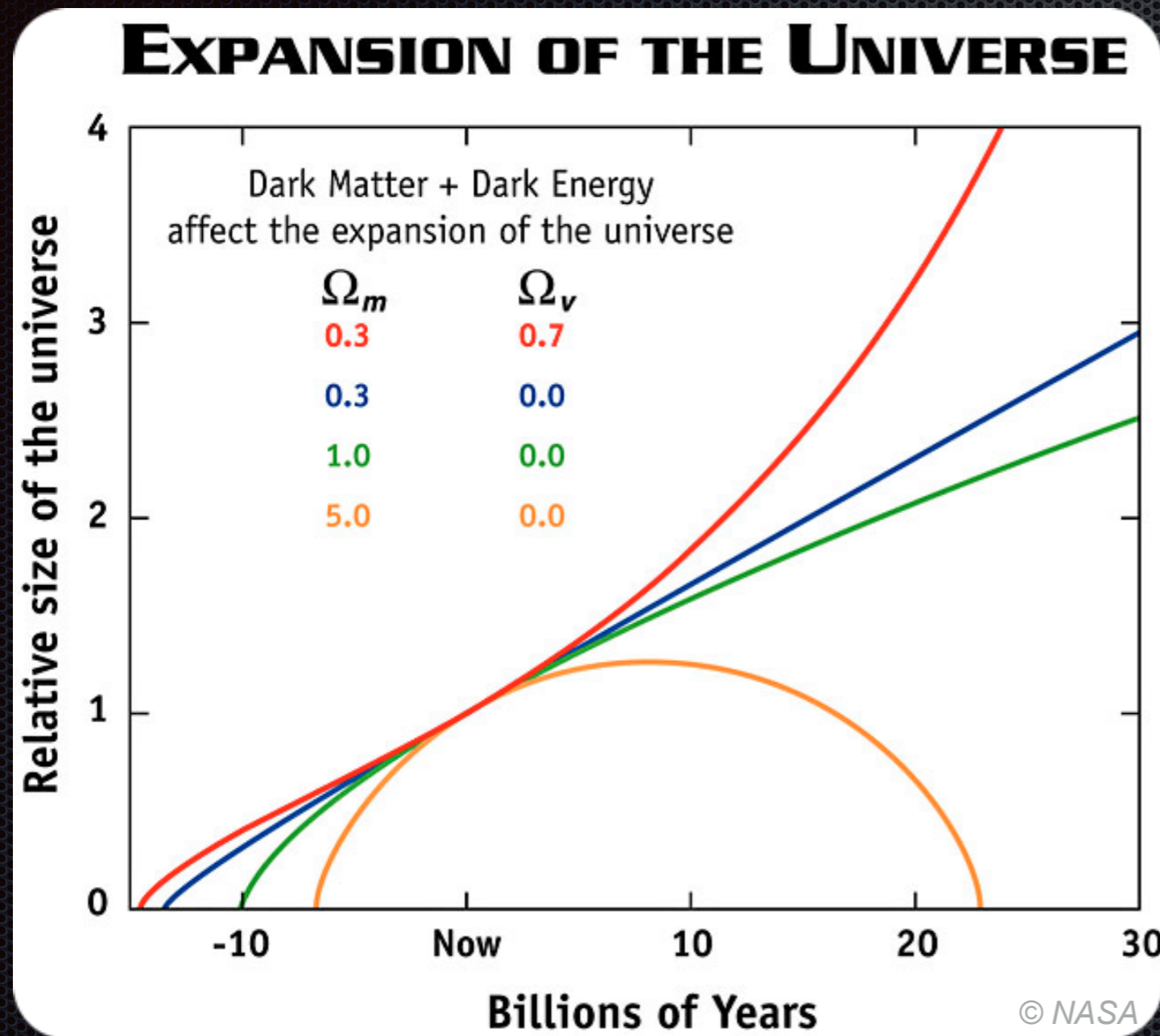
Comment expliquer
cette expansion?

On postule l'existence
de l'énergie noire.

responsable de
l'expansion accélérée



Le destin de l'Univers dépend de ses composantes



Ω_m

Ω_Λ

La densité critique

Notre Univers est en expansion, la force de gravité et la nature de ses composantes vont définir son destin.

On peut définir une densité critique aujourd'hui:

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

C'est une valeur de référence: si l'Univers a aujourd'hui une densité totale égale à la densité critique, alors la géométrie de l'Univers est une géométrie Euclidienne (l'Univers est plat).

Les paramètres de densité

Les paramètres de densité sont normalisés à cette valeur:

$$\Omega_m = \frac{\rho_m}{\rho_c} \quad \Omega_\Lambda = \frac{\rho_\Lambda}{\rho_c} \quad \Omega_{rad} = \frac{\rho_{rad}}{\rho_c}$$

Ils nous donnent la densité de chaque composante par rapport à la densité critique de l'univers.

Les paramètres de densité

Sans rentrer dans les détails, on sait que si l'univers est plat:

$$\Omega_{rad} + \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$$

Sur un univers plat, les paramètres de densité nous donnent donc des "pourcentages" de composantes de l'univers

Les équations d'état

Dans notre Univers on peut écrire les densités comme:

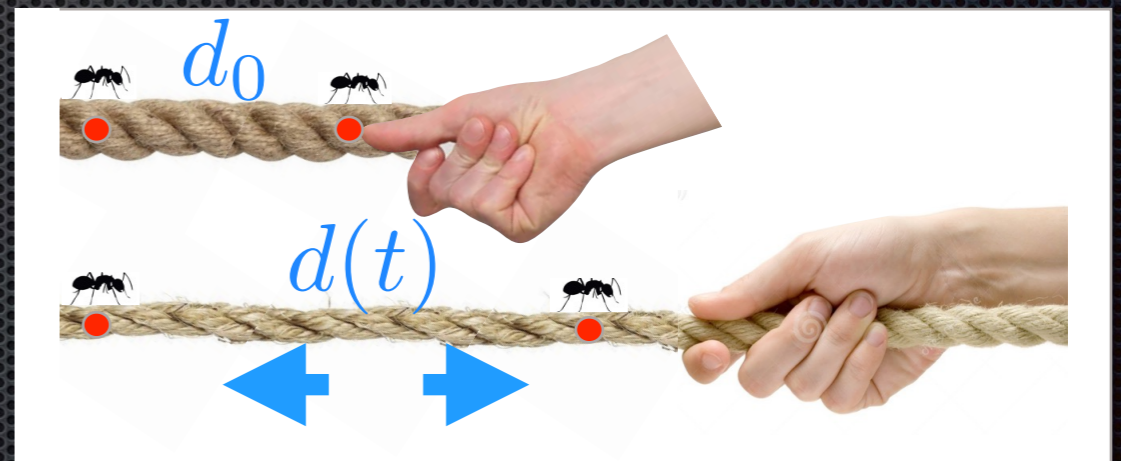
$$\rho \propto a^{-3(1+w)}$$

où a est le facteur d'échelle, qui nous donne le facteur d'expansion des longueurs suite à l'expansion.

$$d(t) = a(t)d_0$$

On peut montrer que:

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



Les équations d'état

Donc, on peut décrire les densités des paramètres en fonction du facteur d'échelle.

$$\rho \propto a^{-3(1+w)}$$

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

$$\rho_{mat}(a) \propto a^{-3} \quad (\text{proportionnelle à l'inverse du volume})$$

$$\rho_{rad}(a) \propto a^{-4} \quad (\text{proportionnelle à l'inverse du volume} * a, \text{ car la longueur d'onde est aussi dilatée et } \lambda \propto a)$$

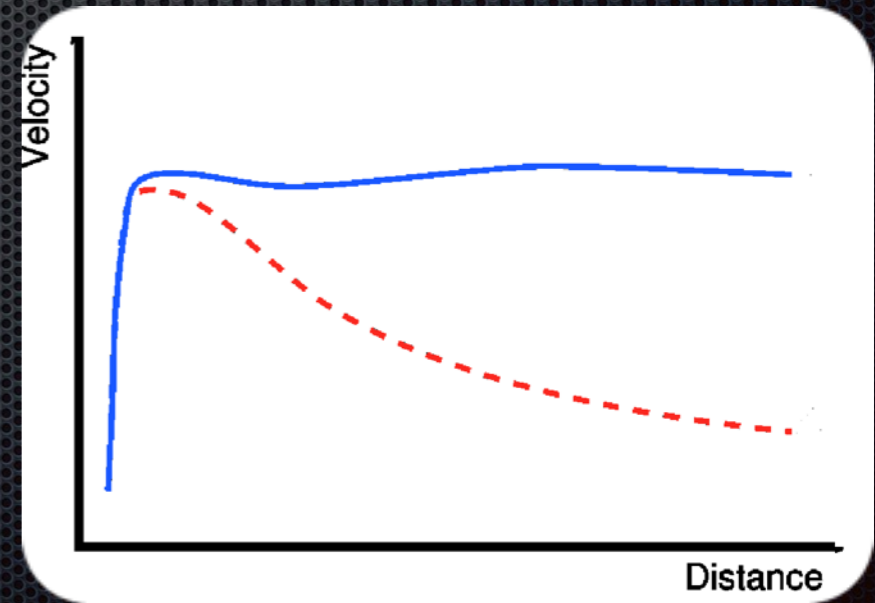
$$\rho_{\Lambda}(a) = \rho_{\Lambda,0} \quad \longleftrightarrow \quad w_{\Lambda} = -1$$

L'énergie noire est ici décrite comme constante cosmologique: sa densité d'énergie ne varie pas au cours du temps.

Un bref regard sur la matière noire

Observations:

- 1) Zwicky estime la masse de l'amas de galaxies Coma grâce à la luminosité des galaxies. Puis mesure les vitesses des galaxies dans les amas de galaxies. La force de gravité de la masse visible est trop faible par rapport à des vitesses si élevées. Il en déduit l'existence de masse non visible.
- 2) Rubin mesure courbes rotation des galaxies spirales, cette courbe ne correspond pas à la courbe théorique. La platitude de la courbe montre la présence d'un halo énorme de matière noire.



L'énergie noire

On a parlé de constante cosmologique, mais ... comme nous ne la comprenons pas, on peut chercher à comprendre si elle varie avec le temps.

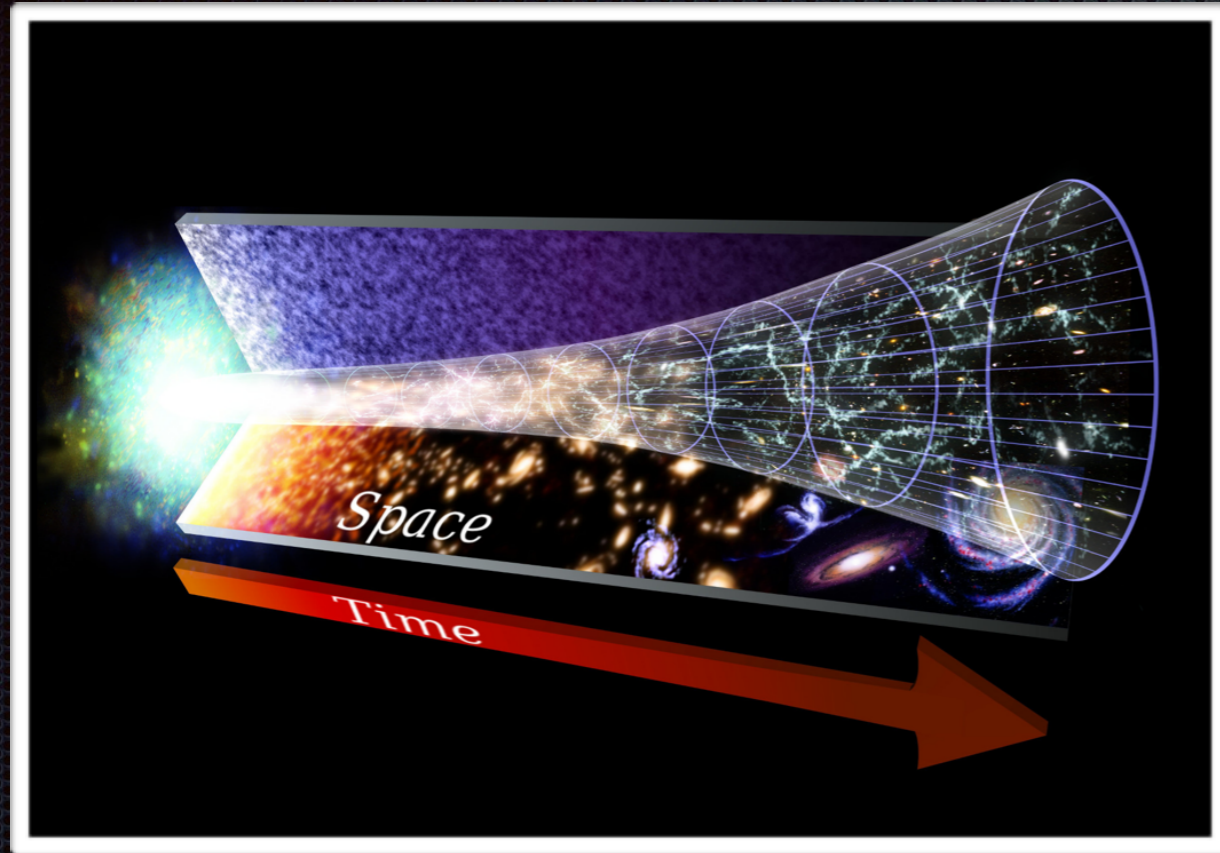
$$w(a) = w_0 + w_a(1 - a) \qquad w(z) = w_0 + w_a \frac{1}{1+z}$$

On va donc essayer de contraindre les paramètres:

w_0

w_a

Un Univers à découvrir: contraindre les paramètres cosmologiques



H_0

Ω_Λ

w_a

w_0

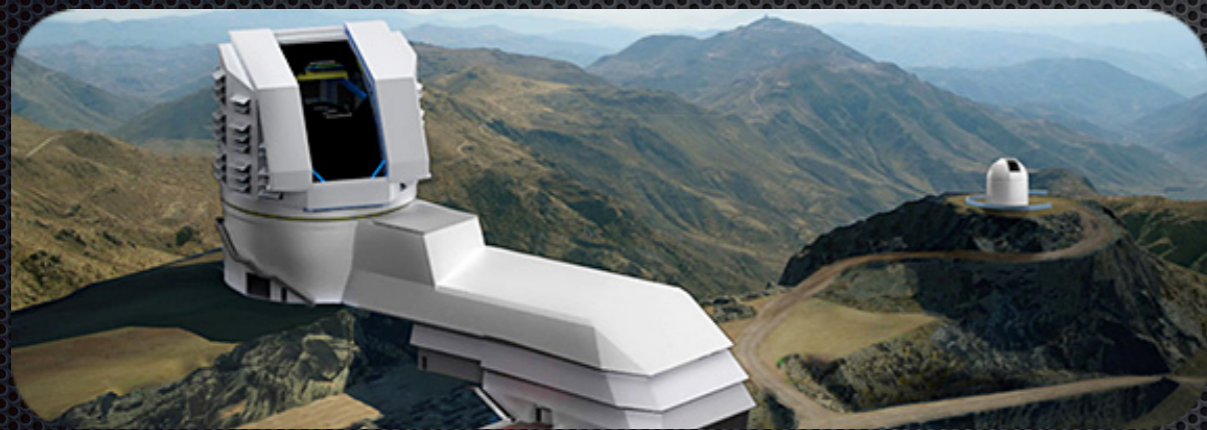
Ω_m

Aller + loin avec les supernovae

Comme elles sont rares, il faut construire des grands télescopes !



Large Synoptic Survey Telescope 3 à 4 millions de SN en 10 ans



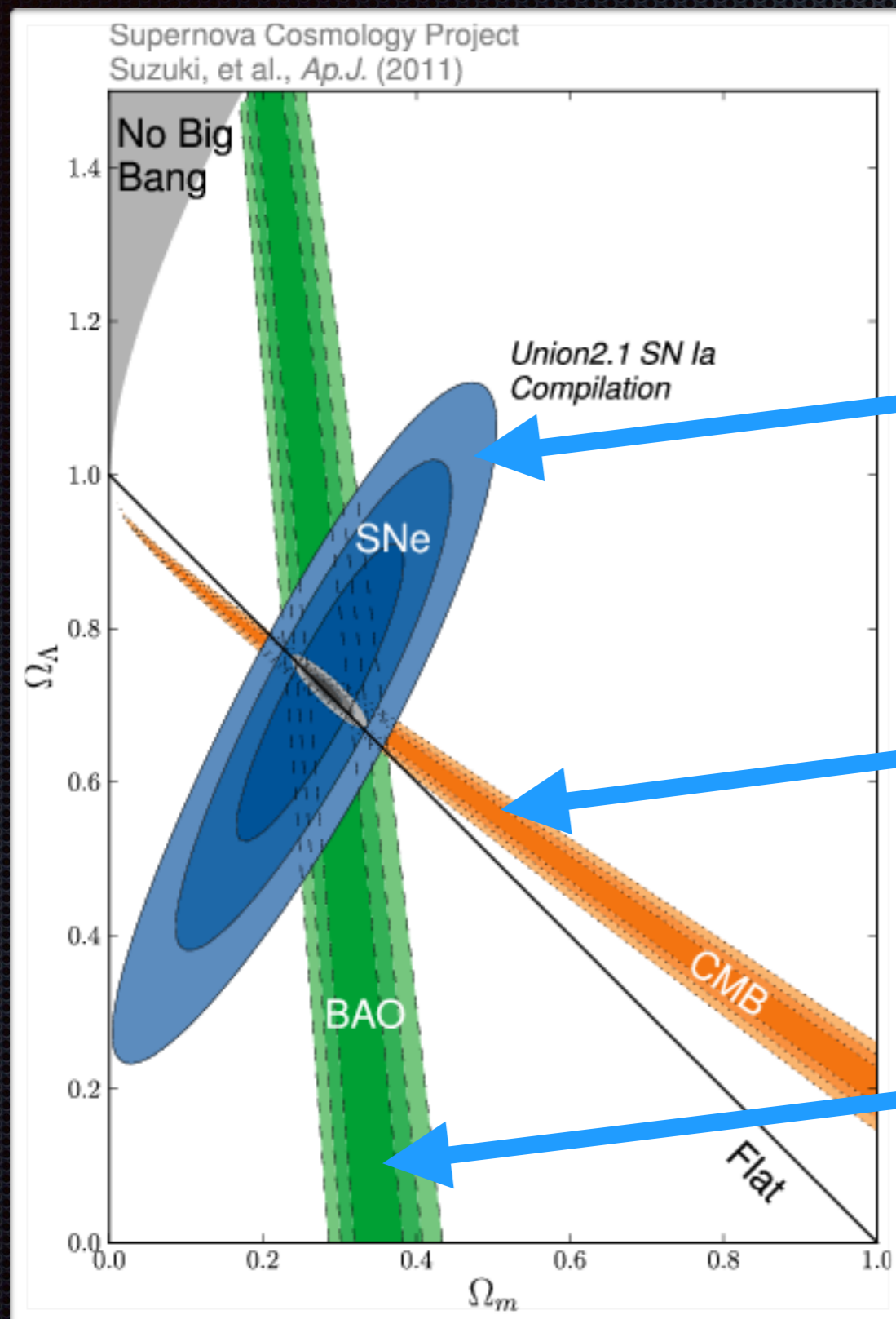
10 billions
(37 billions total
objects)

18000 sq.deg.

z up to ~ 1.5
 $\sigma_z = 0.02(1+z)$
is the goal

et après? que peut-on regarder d'autre dans l'Univers pour mieux le comprendre?

Piliers de la cosmologie observationnelle



On a vu les SNIa...

On a vu le CMB...

On va maintenant se tourner vers les grandes structures, un outil puissant !

Cosmologie Observationnelle

I) Les piliers de la Cosmologie Moderne

II) La composition de l'Univers

III) Les grandes structures, un outil pour comprendre l'Univers

Regardons l'Univers à grande échelle

Les galaxies constituent l'Univers.

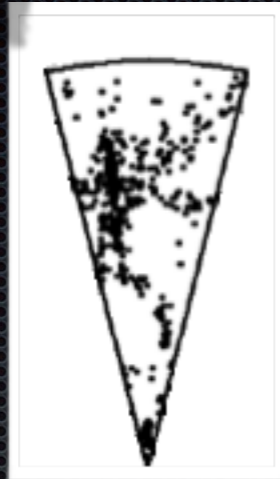


On peut étudier leur distribution: comment se disposent les galaxies à très grande échelle?

Jetons un premier regard à la distribution de galaxies

1977

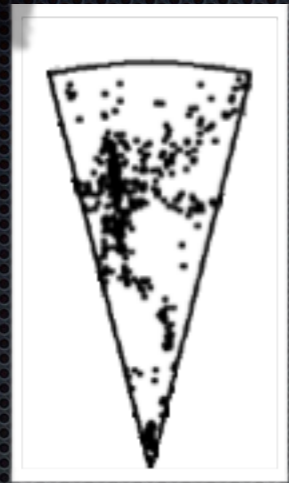
Credit: Thompson and Gregory 1977



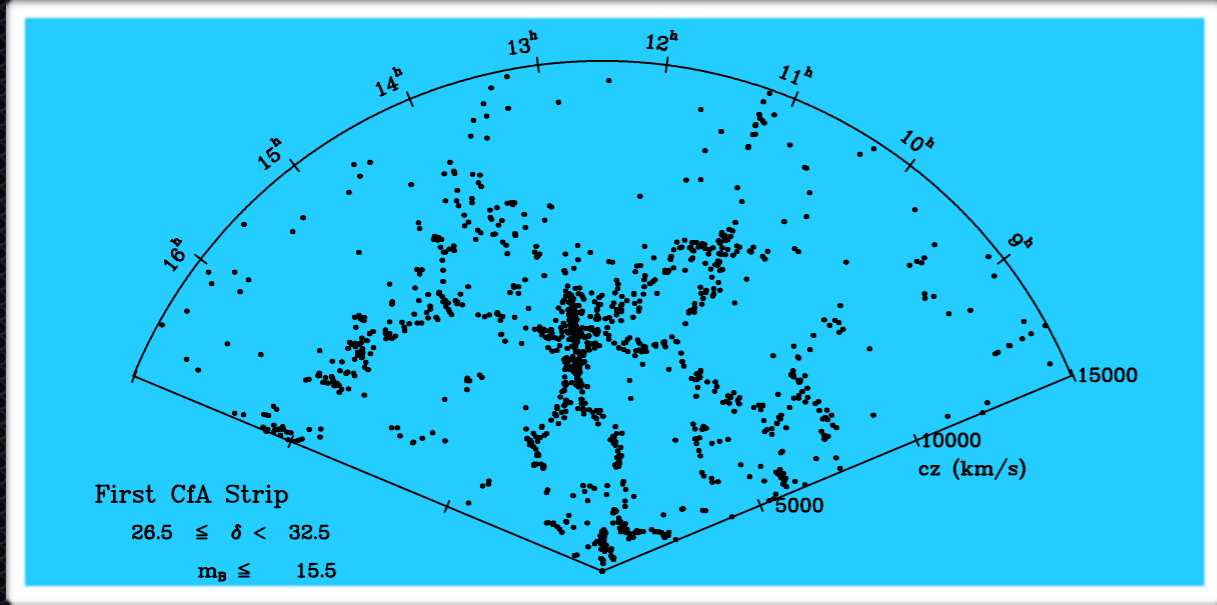
Jetons un premier regard à la distribution de galaxies

1977

Credit: Thompson and Gregory 1977



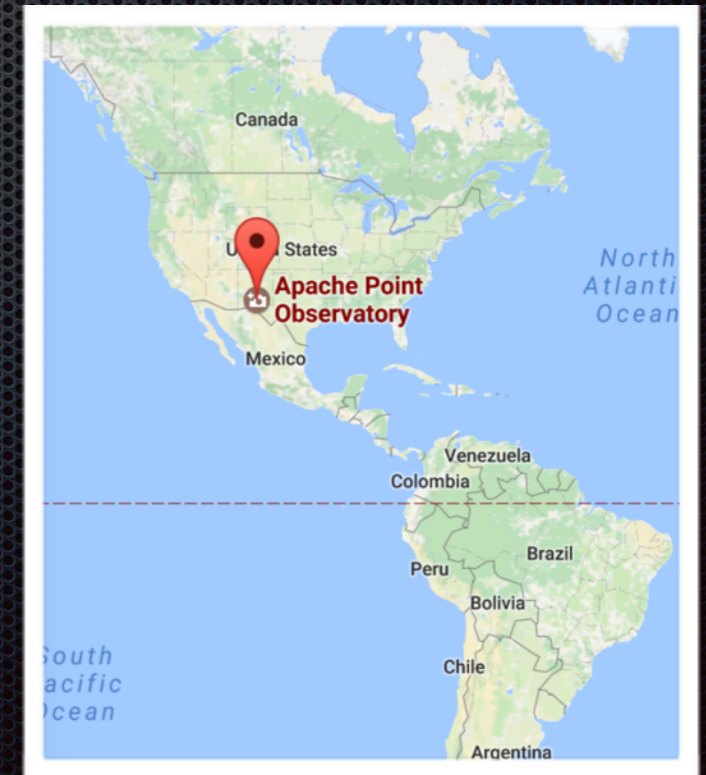
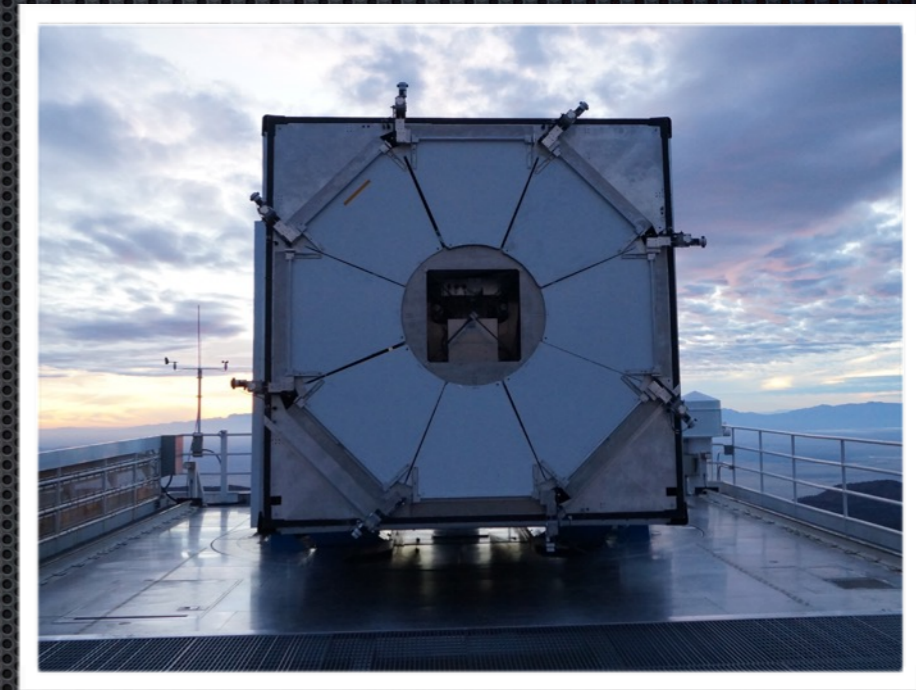
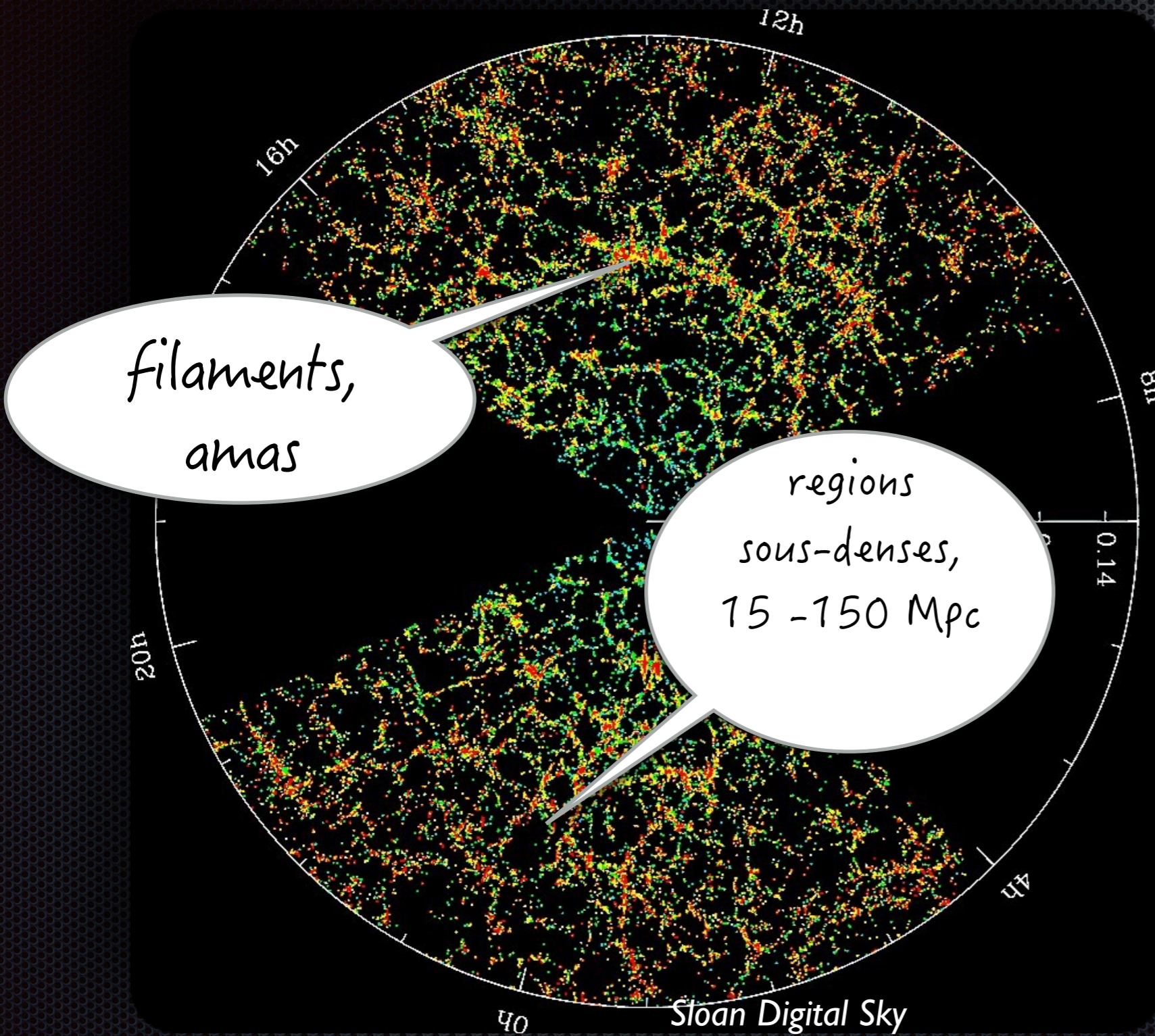
Credit: Jaan Einasto private collection



1986

Credit: de Lapparent et al. 1986

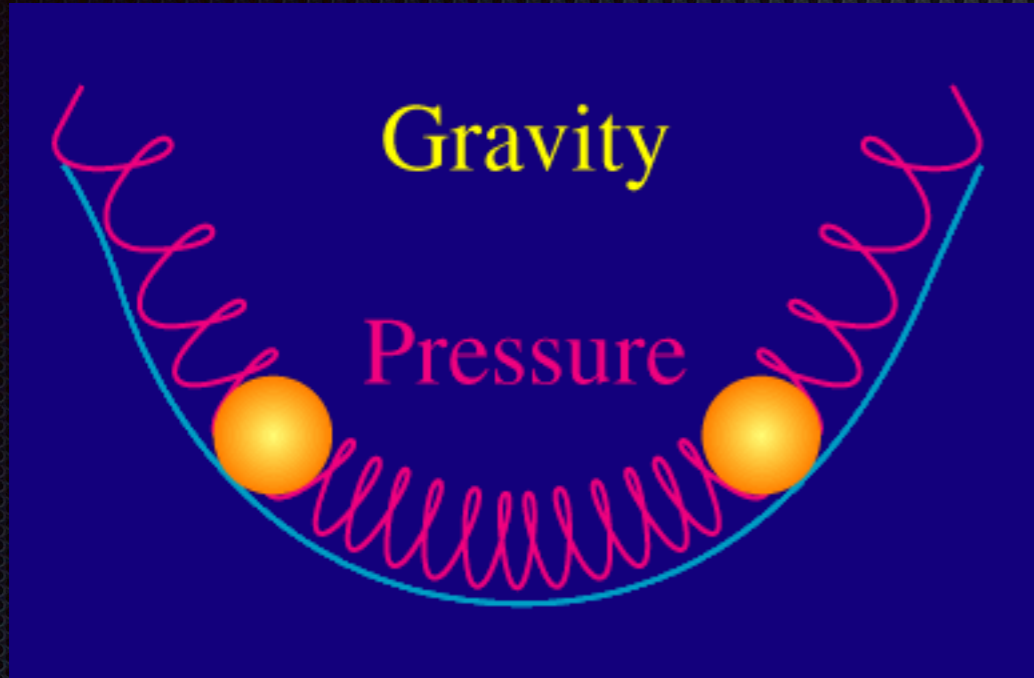
La toile cosmique



1 Mpc ~ 3 millions d'années

Des sondes cosmologiques: les BAO

Plasma primordial



Région sur-dense
Matière noire, baryons, photons



Oscillations des photons et
baryons



Découplément: les Photons
s'échappent, la pression finit



Perturbations de matière
baryonique gelées à un rayon figé

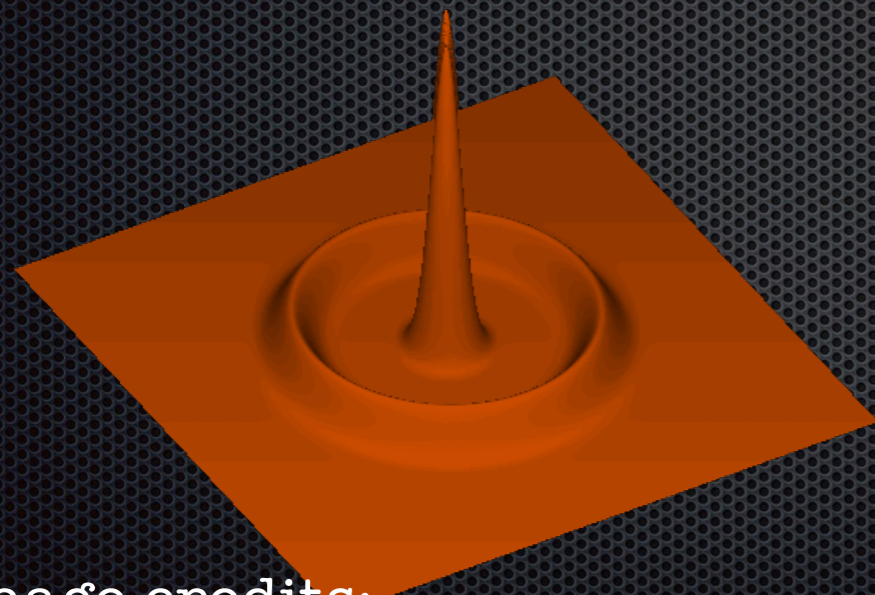


Image credits:
Hu, Eisenstein

Des sondes cosmologiques: les BAO

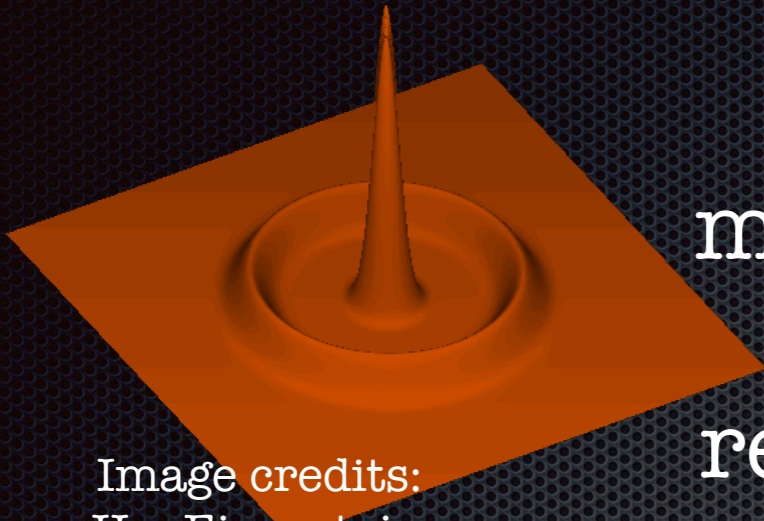


Image credits:
Hu, Eisenstein

BOSS (SDSS) a mesuré la distribution de galaxies pour retrouver ce "pattern" statistique.

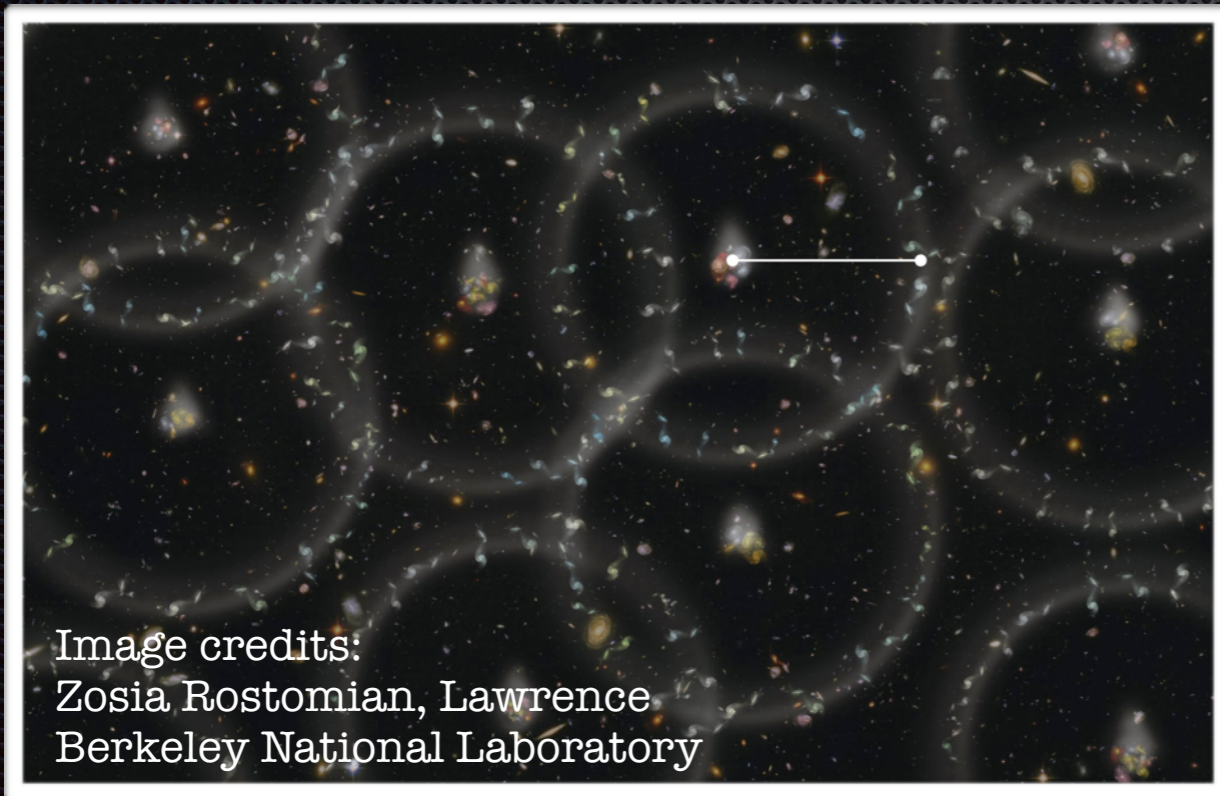
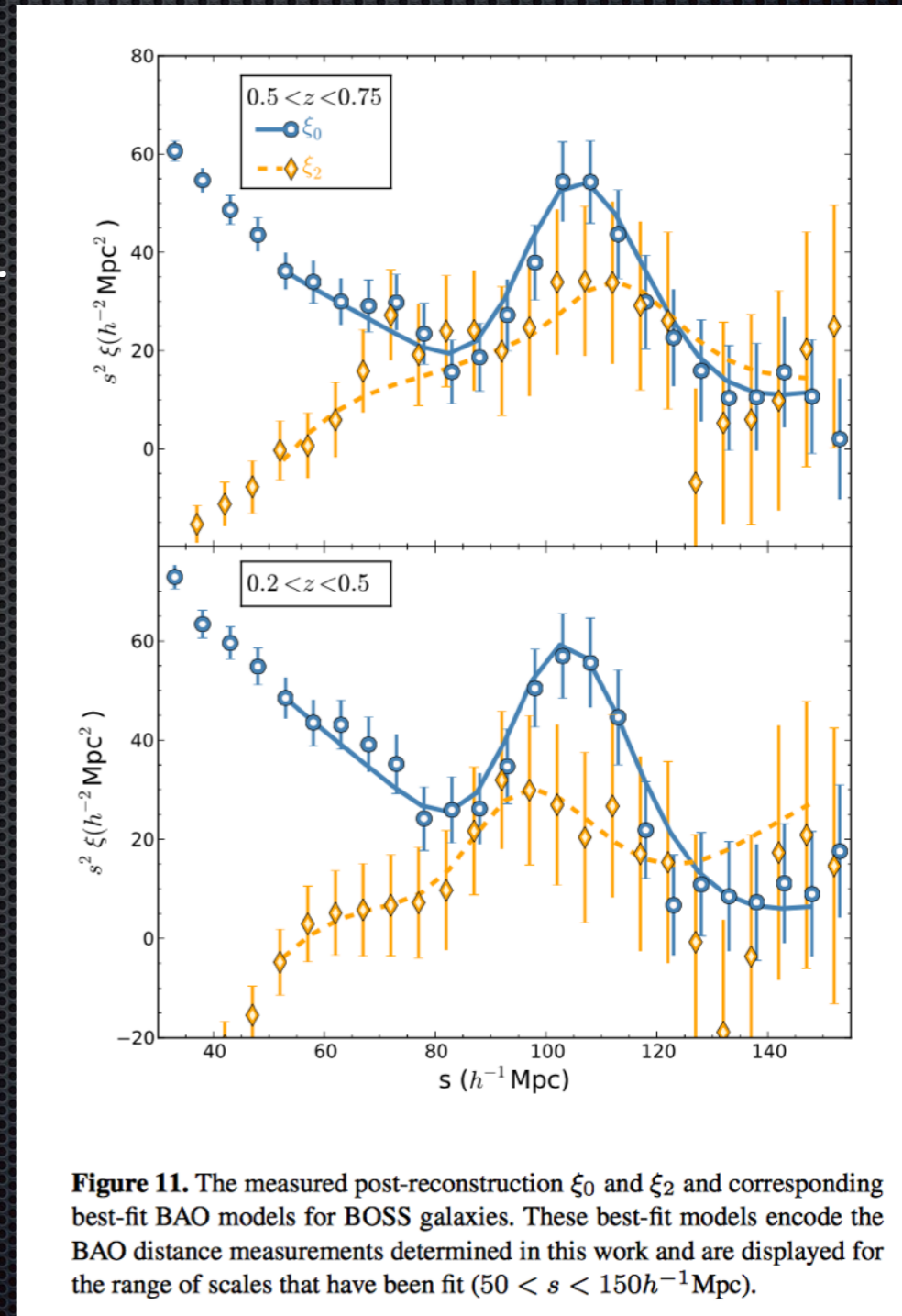
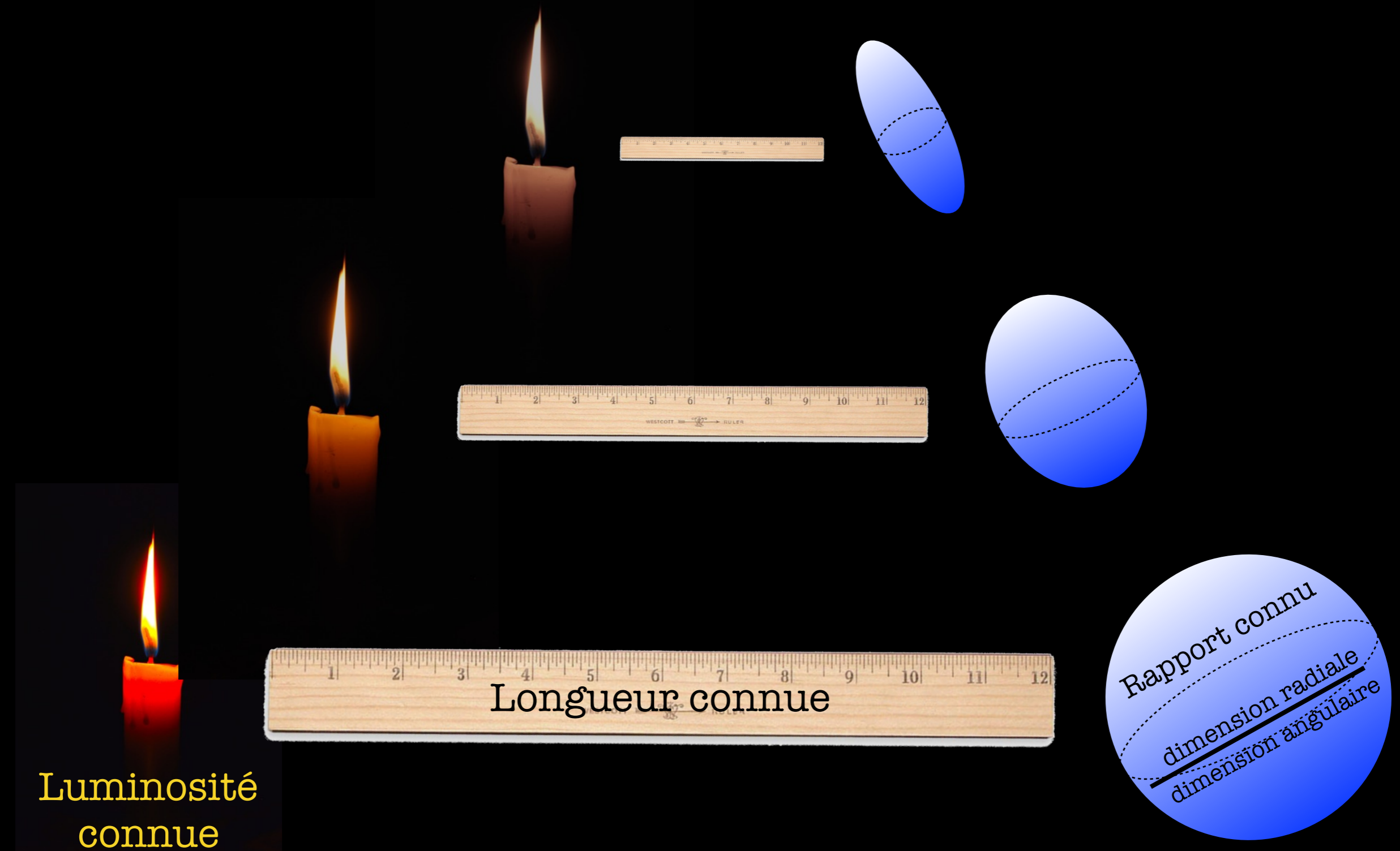


Image credits:
Zosia Rostomian, Lawrence
Berkeley National Laboratory



ArXiv: 1607.03145, BOSS collaboration

En Cosmologie on utilise les objets standard...

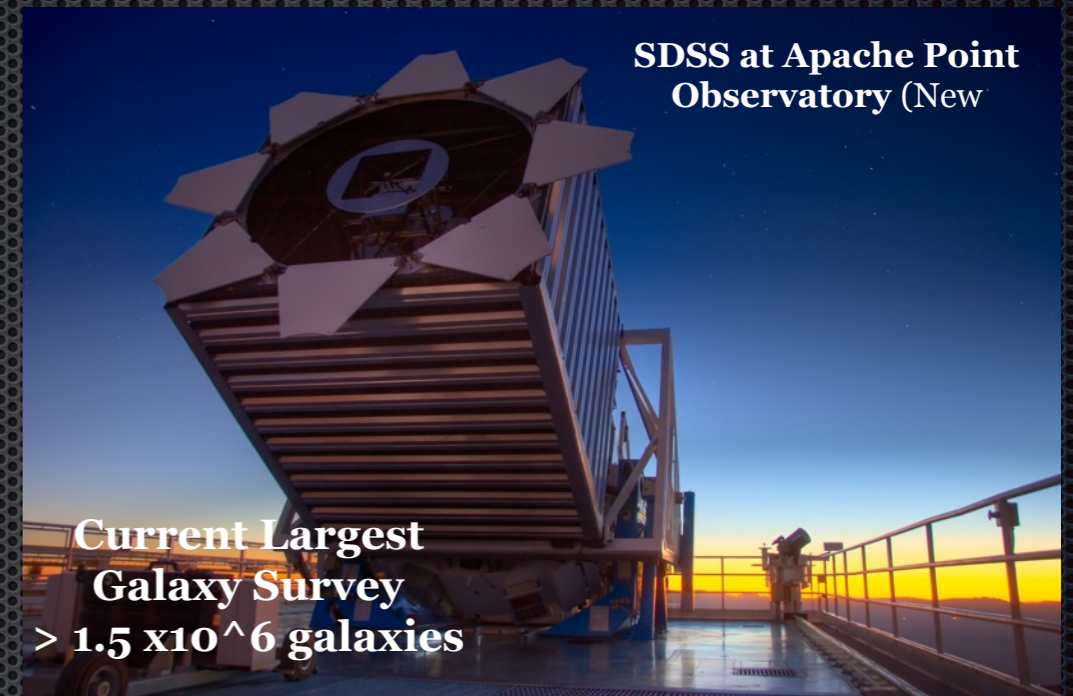
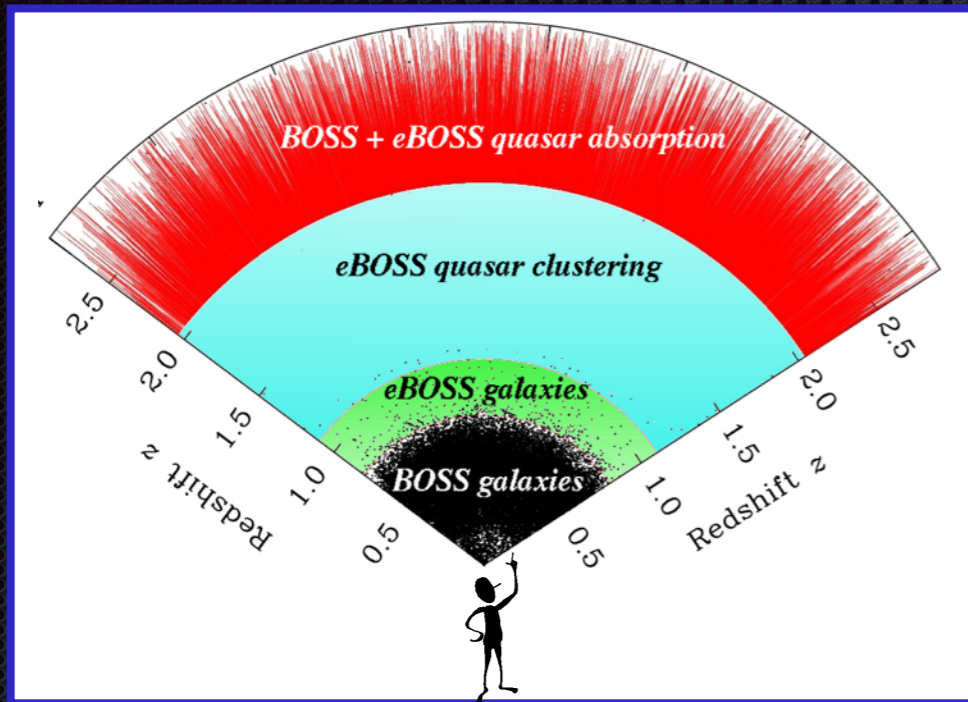


Luminosité connue

Longueur connue

Rapport connu
dimension radiale
dimension angulaire

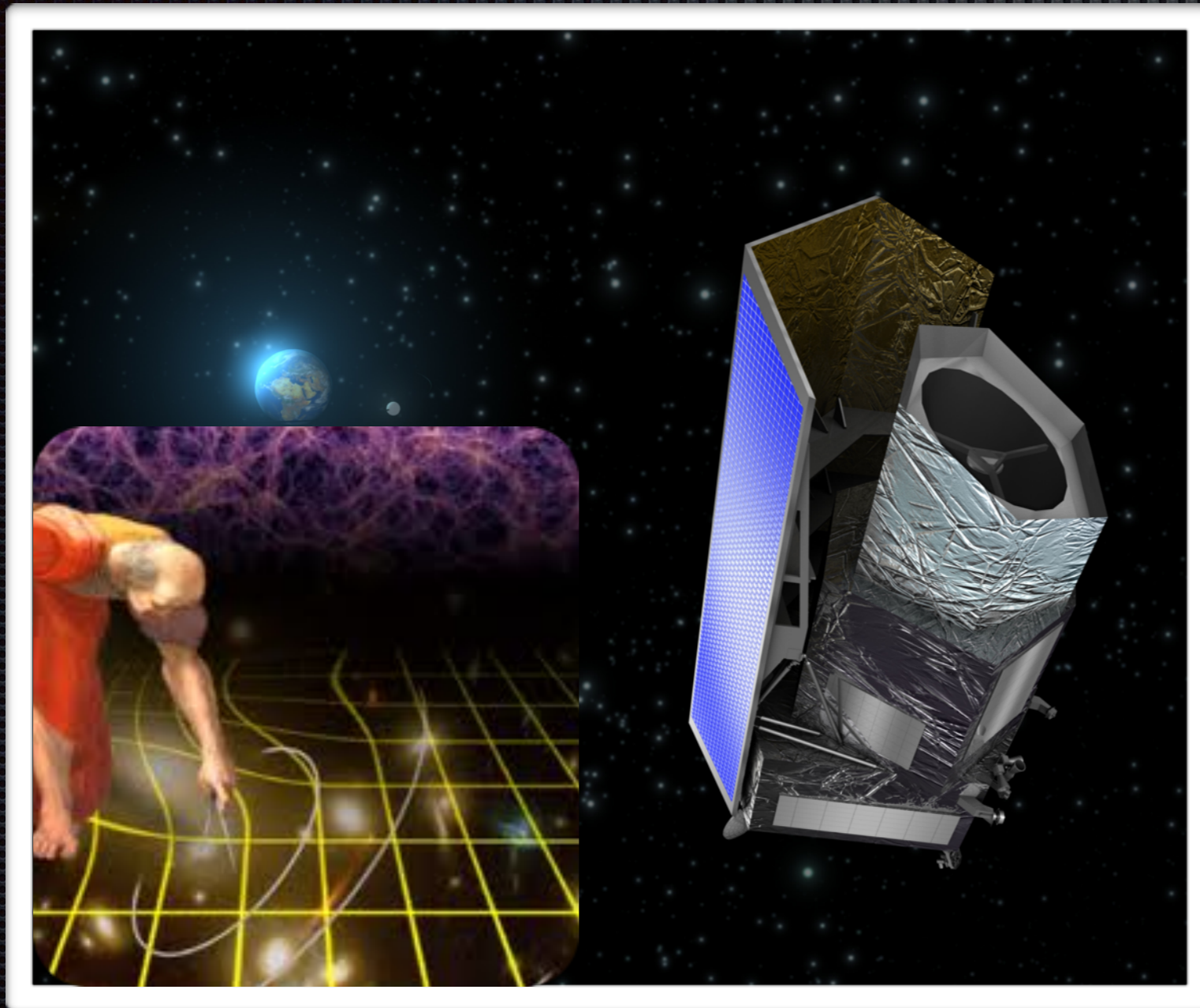
eBOSS: toujours plus loin



Mesurer le BAO avec des traceurs différents !

et après?

Comprendre si l'énergie noire varie dans le temps

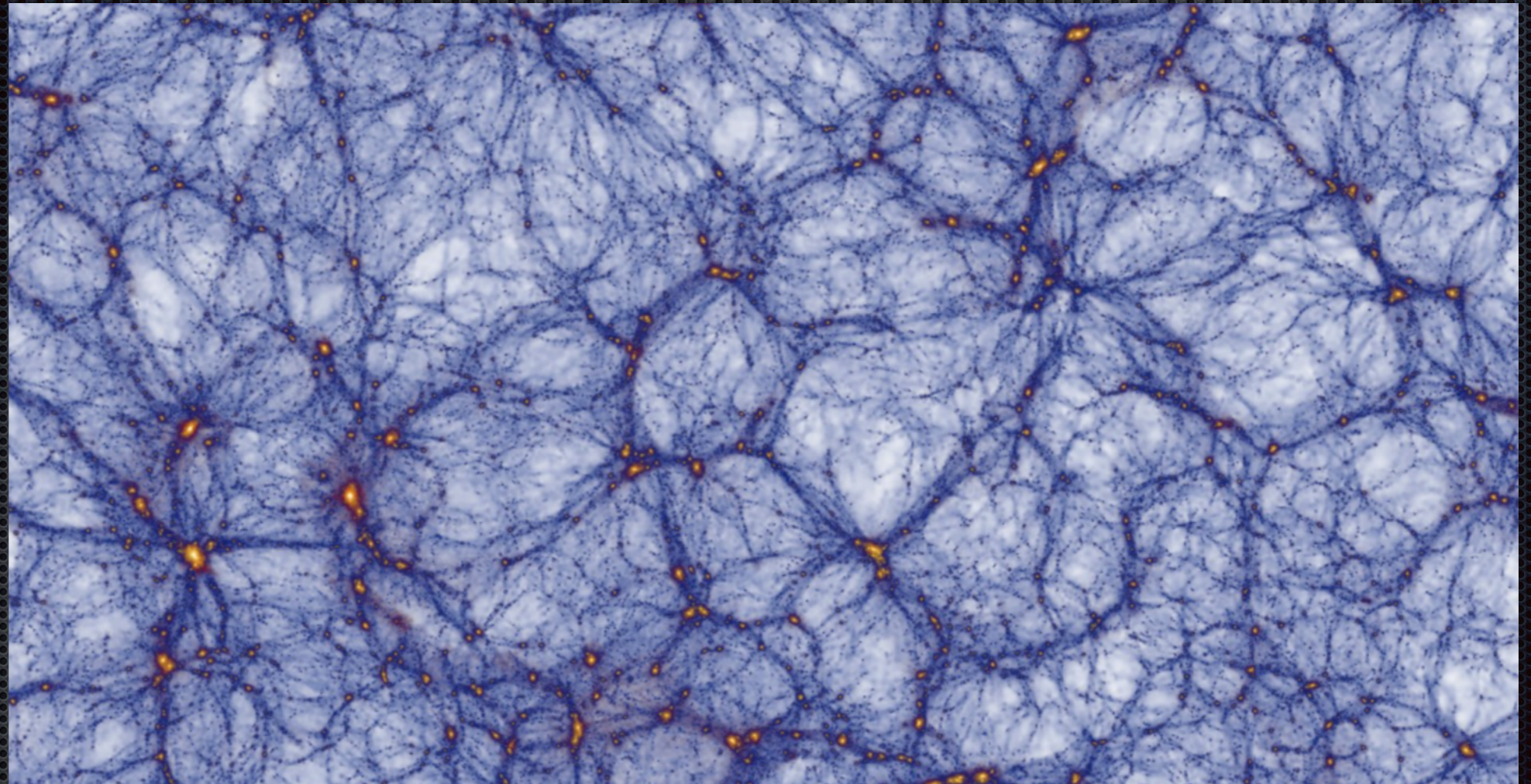


EUCLID
2020-2026

50 millions d'objets en spectroscopique

Les sondes complémentaires

Amas



Vides

Les amas de galaxies

Contraintes attendues

La fonction de distribution des amas en fonction de leur masse dépend du modèle cosmologique.

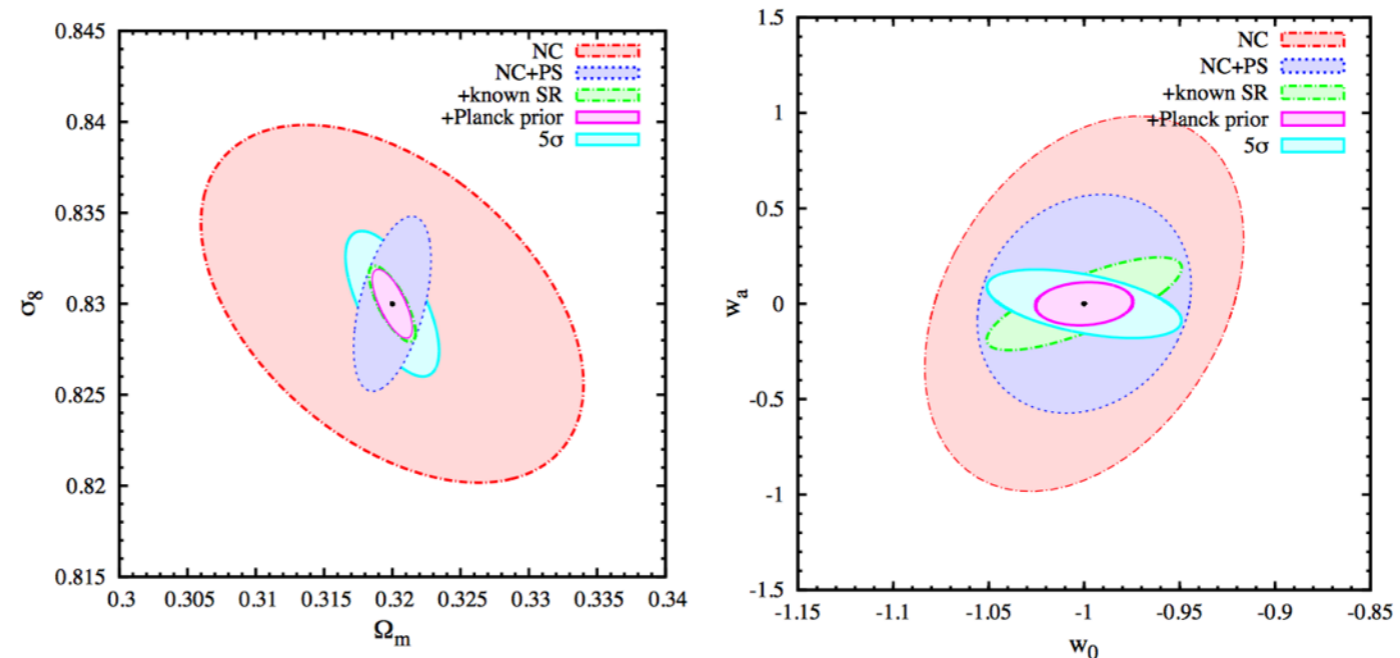
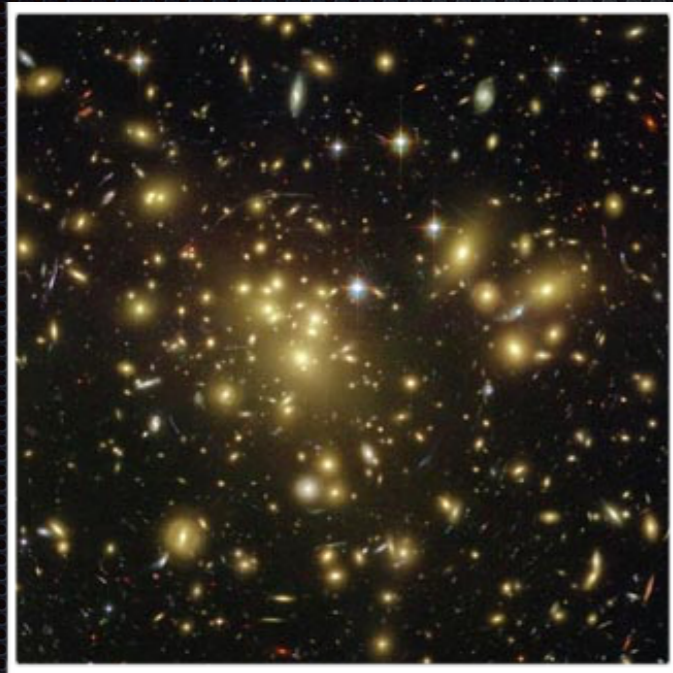
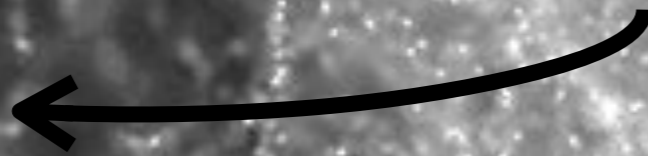


Figure 4. Constraints at the 68 per cent c.l. on the parameters Ω_m and σ_8 (left panel) and on the parameters w_0 and w_a for the DE EoS evolution (right panel). In each panel, we show forecasts for the $N_{500,c}/\sigma_{\text{field}} \geq 3$ *Euclid* photometric cluster selection obtained by (i) NC, the FM number counts (red dash-dotted contours), (ii) NC+PS, the combination of FM NC and power spectrum (PS) information (blue dotted contours), (iii) NC+PS+known SR, i.e. by additionally assuming a perfect knowledge of the nuisance parameters (green dash-dotted contours), and (iv) NC+PS+known SR+*Planck* prior, i.e. by also adding information from *Planck* CMB data (magenta solid contours). With cyan solid lines we show forecasts for the $N_{500,c}/\sigma_{\text{field}} \geq 5$ *Euclid* photometric cluster selection in the case NC+PS+known SR+*Planck* prior (labelled 5 σ). *Planck* information includes prior on Λ CDM parameters and the DE EoS parameters.

ArXiv:1505.02165.pdf

Des sondes cosmologiques: les VIDES

LES VIDES
COSMIQUES



Peu de matière donc
beaucoup d'information
sur l'énergie noire

Si l'énergie noire existe, elle domine l'évolution des vides

Les VIDES: plusieurs méthodes

Régions sous-denses dans la distribution de galaxies...

Taille 10-100Mpc/h

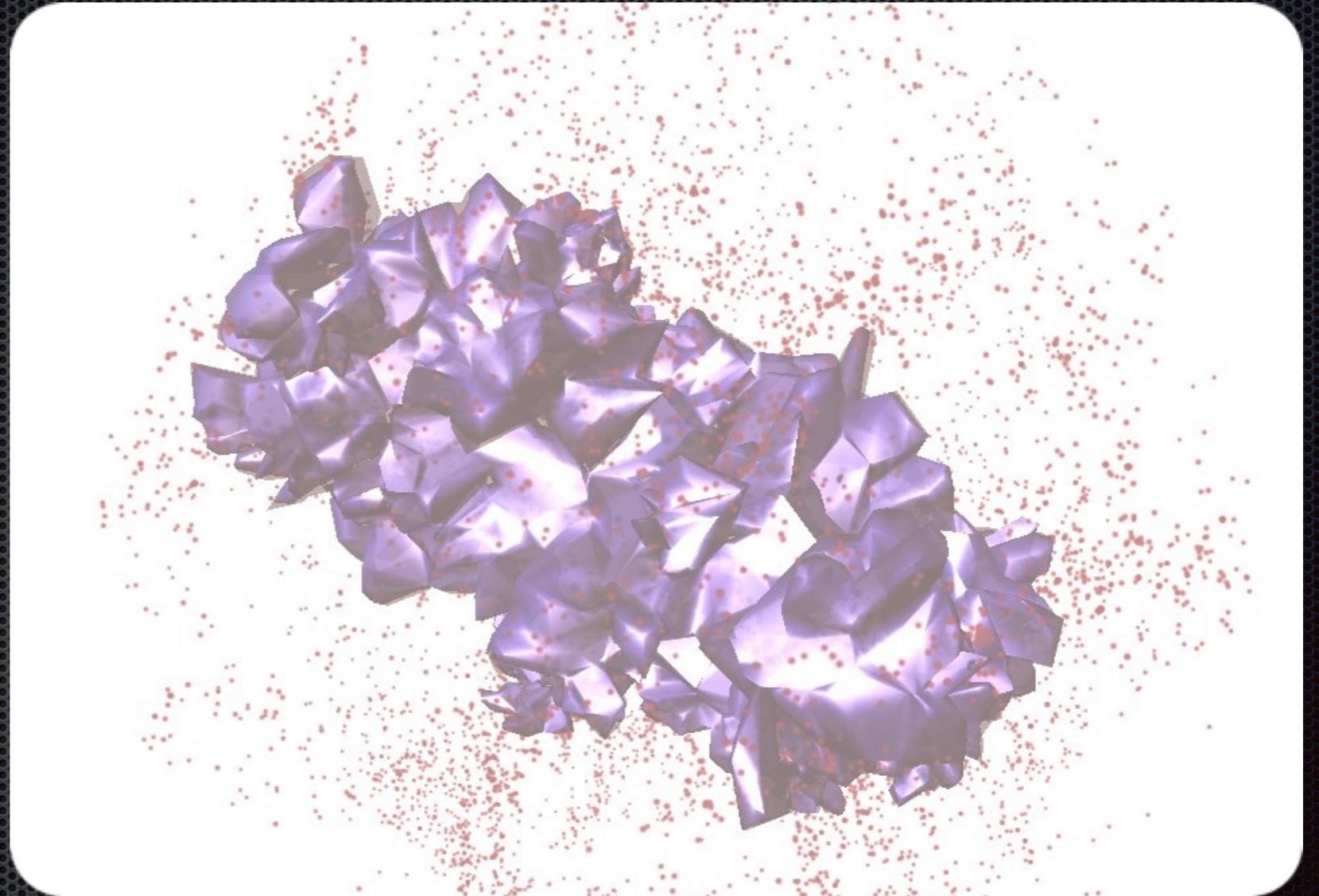
1pc= $3.26 * 10^6$ a.l.

Les vides ont une taille entre 30 millions et 300 millions d'a.l.

Sensibles aux paramètres cosmologiques:

=>Comptage de vides

=>Etude de la forme de vides (test de AP, RSD)



Le comptage de VIDES

On peut compter les vides pour
comprendre les propriétés de
l'énergie noire !

1

2

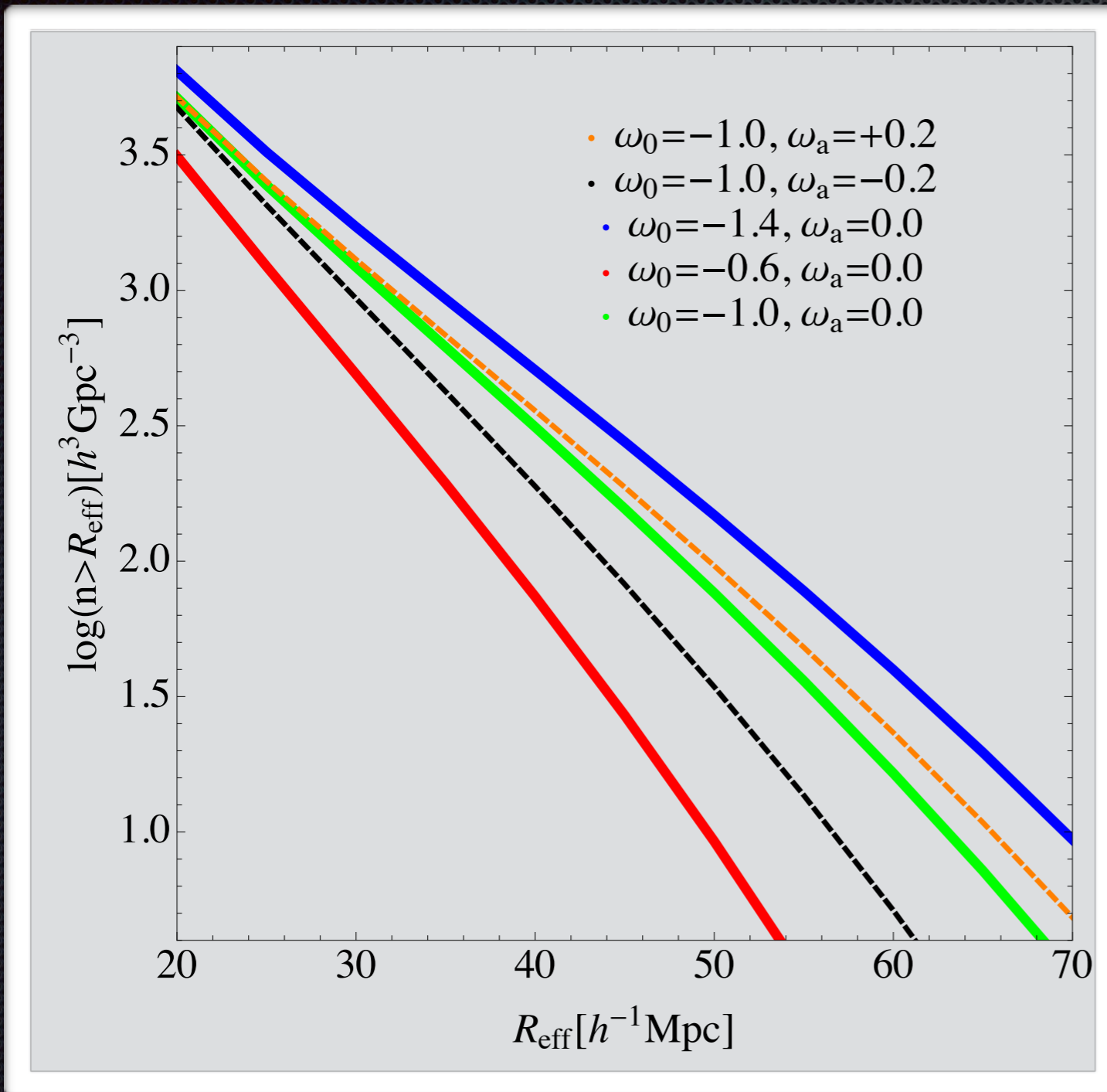
3

4

...

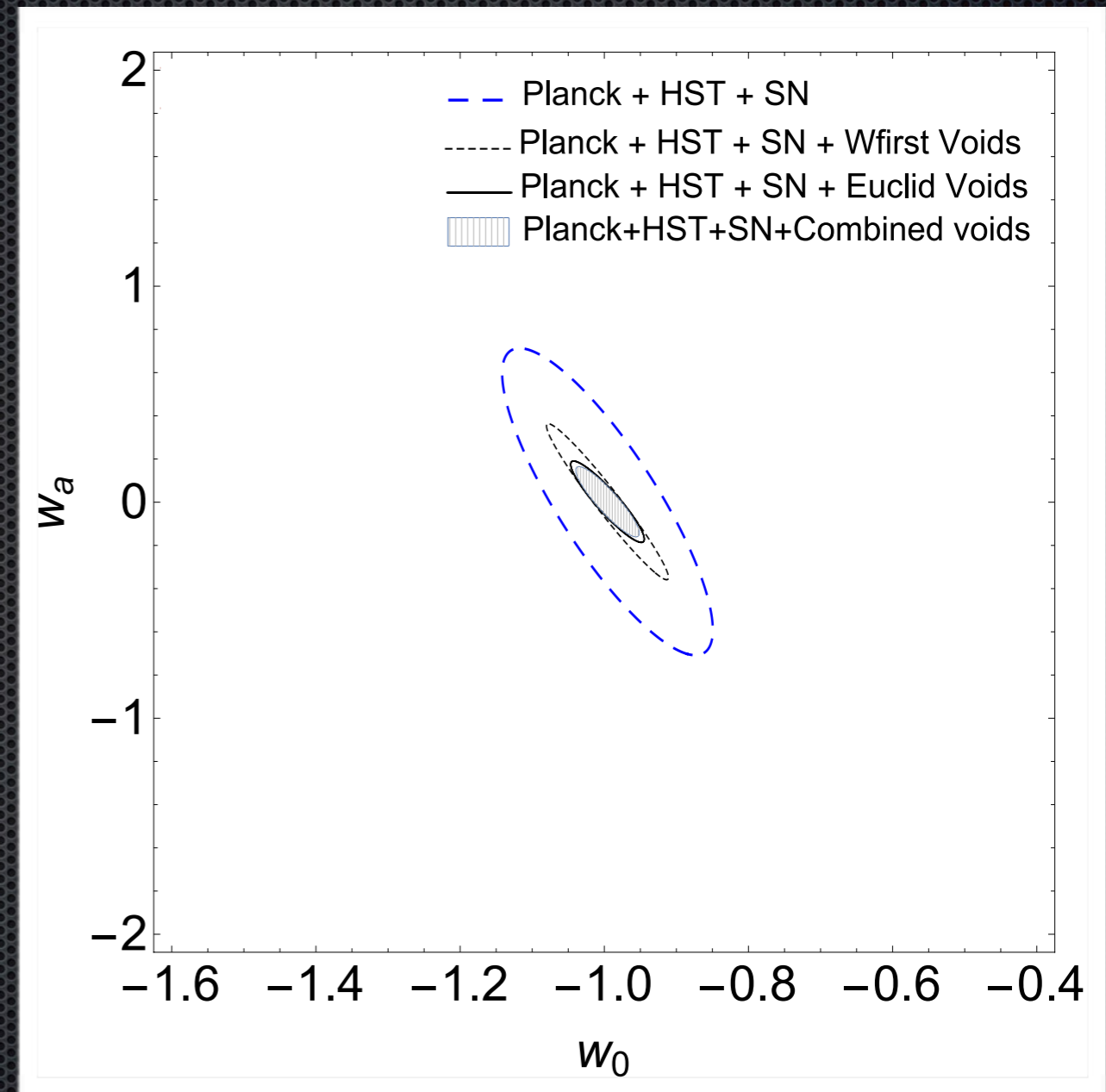
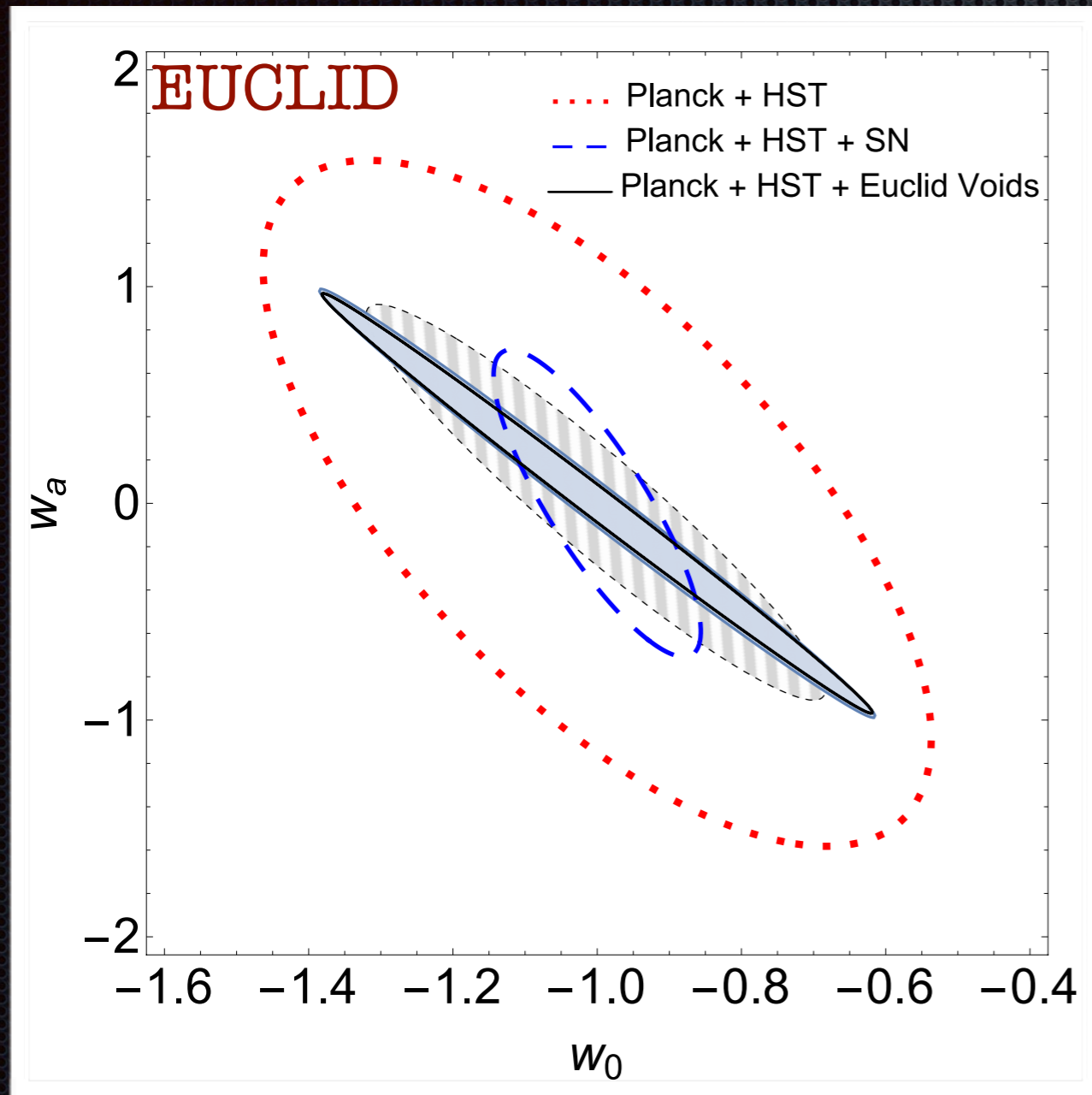
© Millennium XXL simulation

Comprendre si l'énergie noire varie dans le temps



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

Comprendre si l'énergie noire varie dans le temps

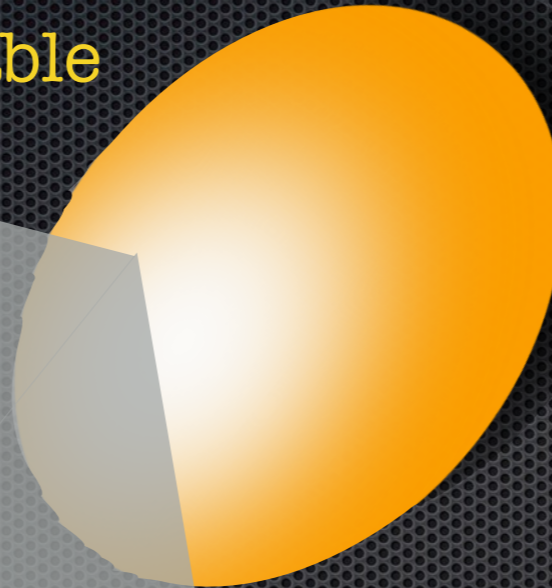


~800 000 vides avec Euclid

Regarder la forme des vides

Espace
observable

Modèle
cosmologique



Donc observer
les sphères
standard nous
permet de
tester notre
modèle !

En cosmologie on appelle
cela le test de Alcock-
Paczyński (1979)



Espace réel

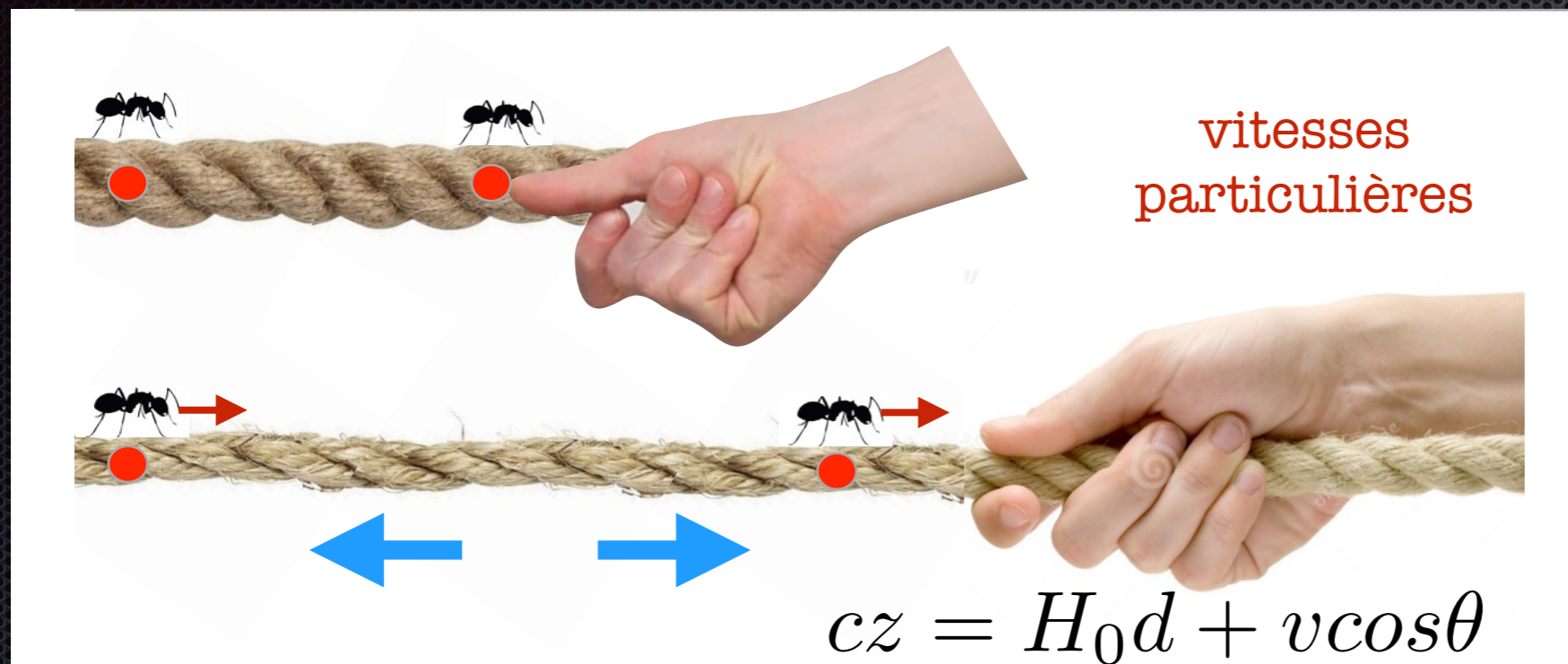


Et si l'énergie noire n'existait pas?

Si l'énergie noire n'existe pas il faut trouver une autre manière d'expliquer l'accélération de l'expansion de l'Univers

Une idée: modifier la relativité générale aux échelles cosmologiques et dans un régime à faible densité. C'est les modèles de gravité modifiée!

En un mot, comment tester les modifications de la RG?

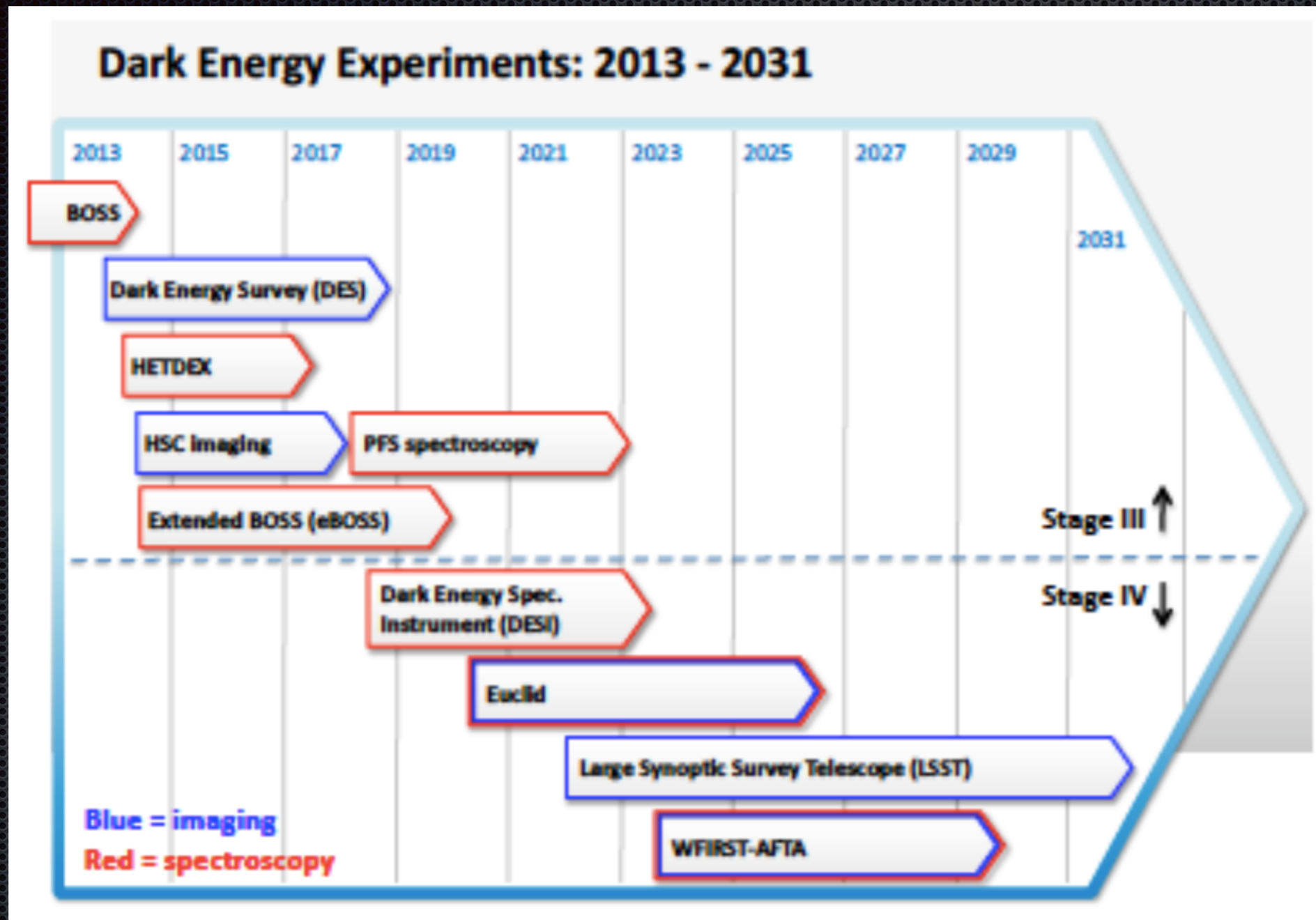


Cela modifie le redshift, et ça, c'est bien un effet Doppler!

Dans la réalité ces vitesses sont dues à la gravité, du coup, en mesurant leur effet on peut la contraindre aussi !

P.s. pour l'instant elle tient bon...

Les futurs sondages



C'est l'ère des big data !

Conclusion

Nous avons vu quels sont les piliers de la cosmologie observationnelle, et comment mesurer l'évolution de l'Univers grâce aux observations.

On a parlé des SN, des BAO, mais aussi de sondes telles que les amas et les vides !

Pour comprendre le destin de notre Univers, les sondages futurs apporteront de nouvelles données, permettant de discriminer entre les modèles d'énergie noire et de comprendre sa nature.