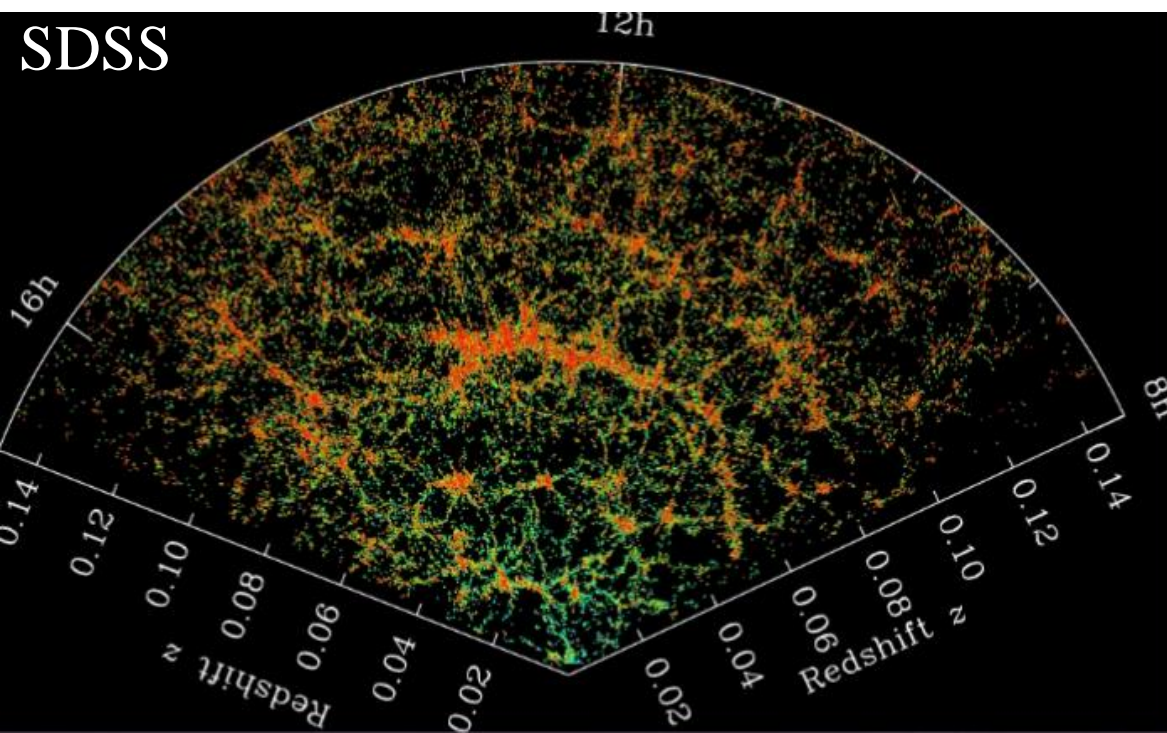




COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

Chaire Galaxies et Cosmologie

Observation des Grandes Structures

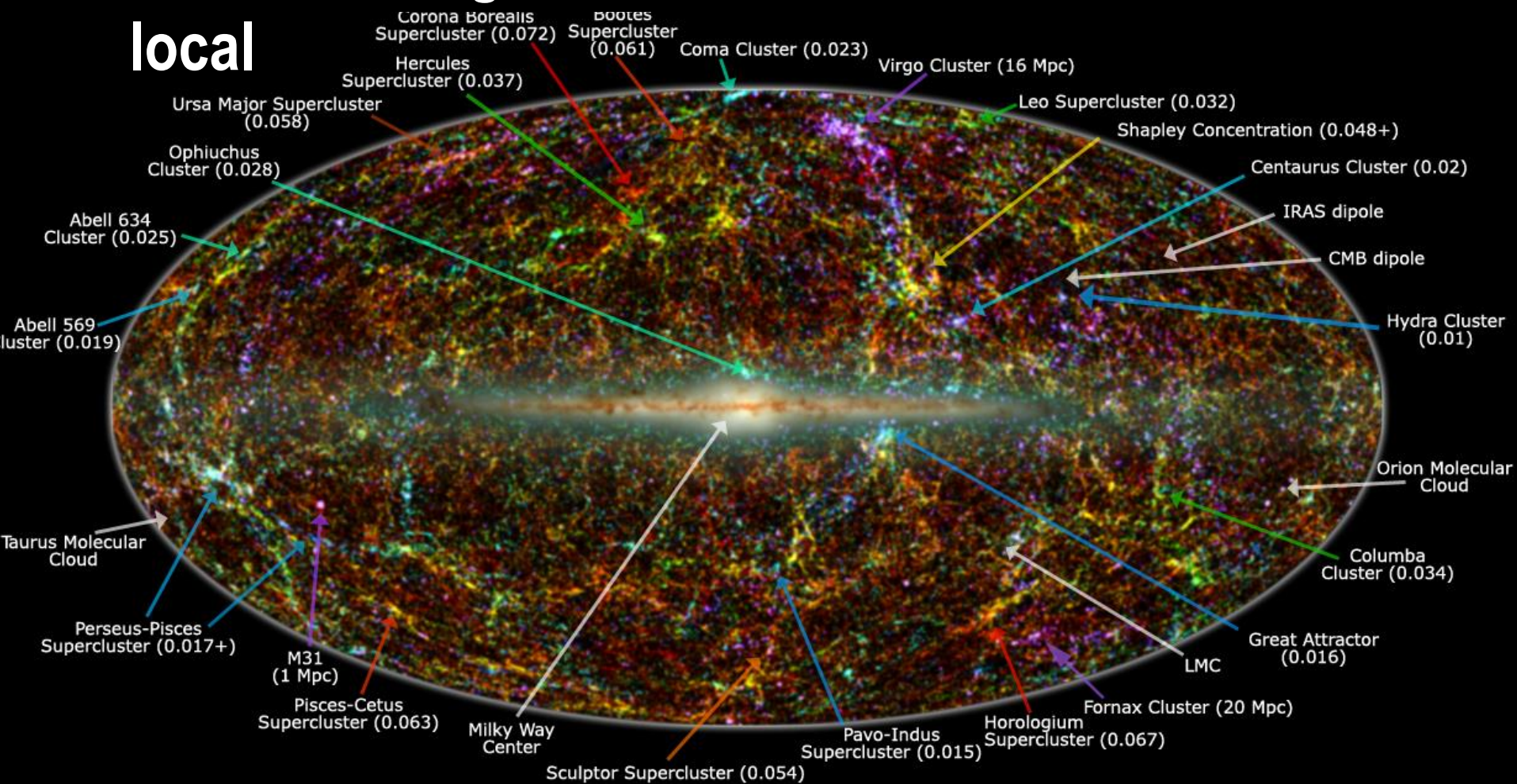


Françoise Combes



Structures à grande échelle dans l'Univers

local



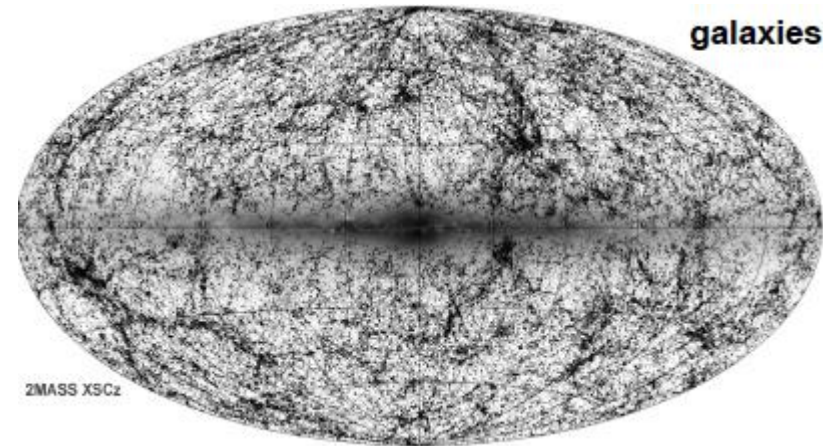
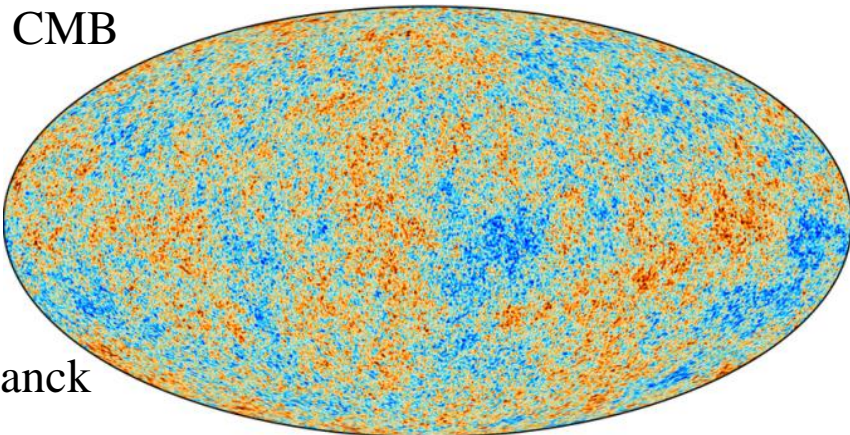
Legend: image shows 2MASS galaxies color coded by redshift (Jarrett 2004); familiar galaxy clusters/superclusters are labeled (numbers in parenthesis represent redshift).
Graphic created by T. Jarrett (IPAC/Caltech)

2MASS

Amas et superamas proches 1997-2001

Comment se développent les structures

Aujourd'hui, filaments cosmiques, vides, sur-densités
Amas et super-amas de galaxies



380 000 ans après le Big-Bang
Fluctuations de 10^{-5}
Linéaire

13.8 milliards d'années
Structures non-linéaires
très contrastées

→ Qu'apprend-on sur notre Univers?

Les grandes questions

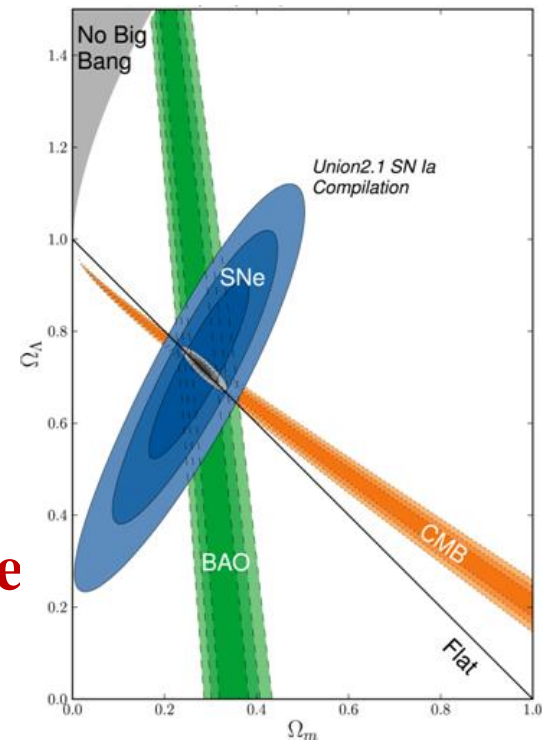
Pourquoi cartographier les grandes structures de l'Univers?

Comment se sont formées les galaxies depuis la période du Big-Bang
homogène et uniforme: phénomènes physiques?

Déterminer les paramètres cosmologiques

- densité de l'Univers, Ω_b , Ω_m
- Energie noire Ω_Λ ou constante cosmologique
- Taux d'expansion: constante de Hubble, comment varie-t-elle?

Taux de croissance des galaxies: gravité modifiée
Biais entre matière noire et baryonique?
Origine des fluctuations?



Bref historique des découvertes



Nicolas Louis de Lacaille (1713-1762)
Hémisphère Sud (Fornax, Norma, Sculptor, ...)



Charles Messier (1730-1817), nébuleuses
110 objects, galaxies, amas globulaires



William, Caroline & John Herschel
(18 & 19^{ème} siècles)



NGC ~8000 objets, nébuleuses planétaires, amas
d'étoiles (ouverts ou globulaires), etc..



Henrietta Leavitt (1909) Les Céphéides



Vesto Slipher (1913) vitesse de récession
des « nébuleuses »

Le débat – Expansion de l'Univers



Harlow Shapley (1885-1972)

Les nébuleuses font partie de notre Galaxie

Voie lactée de 100kpc

Heber Curtis (1872-1942)

Les nébuleuses, comme M31 sont des galaxies extérieures, diamètre 10kpc



Hubble (1925-26) identifie des Céphéides dans M31, M33

Ce sont des galaxies à part, distantes de ~ 1000 kpc

Et interprète les vitesses positives comme une expansion en **1929**



Georges Lemaître propose l'Univers original très dense et très chaud (**1927**)

Qualifié de **Big-Bang** par Fred Hoyle (**1949!**)



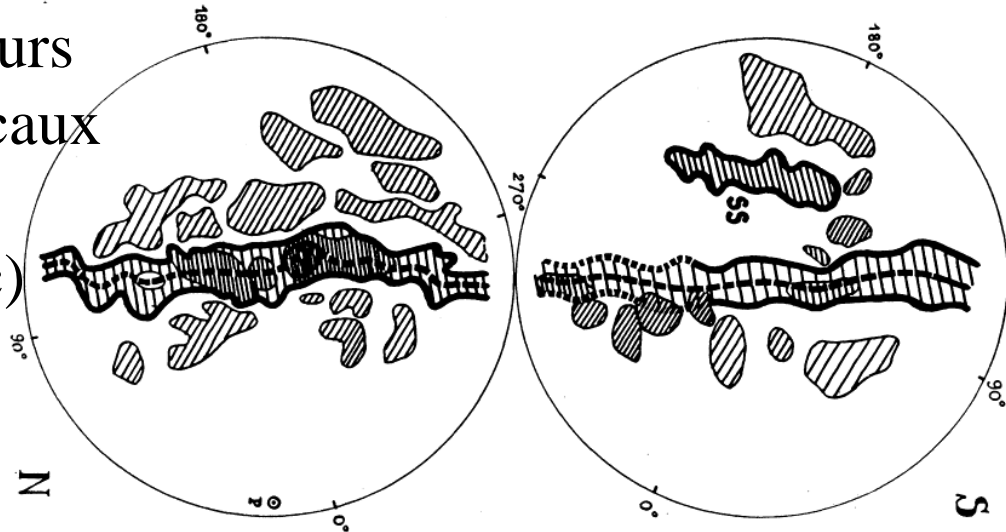
Structures à 2D des galaxies



Determination des amas >1920 (Harlow Shapley, George Abell, Fritz Zwicky, ...)



Gérard de Vaucouleurs
(1953) Les amas locaux
sont aplatis en un
Superamas (30 Mpc)

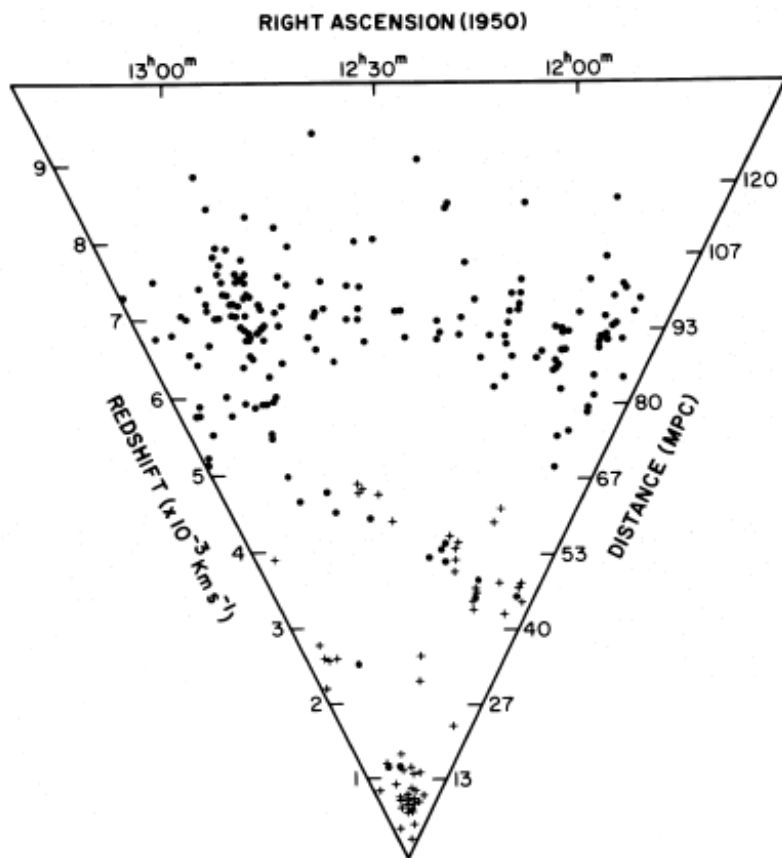


1 million de galaxies (Shane & Wirtanen 1967)

Structure en éponge, ou gruyère (Einasto et al 1977)

Filaments, et vides

Les premiers vides

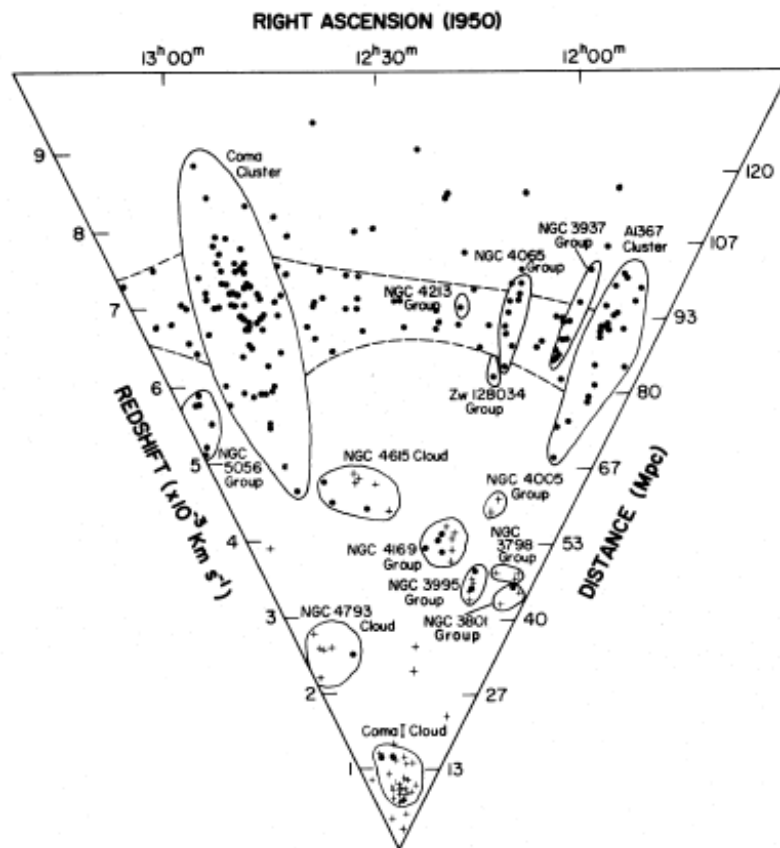


Gregory & Thompson 1978

Obs des redshifts dans le superamas

Coma/A1367

➔ Grands vides



Joeveer & Einasto 1978

Univers cellulaire

“Vide”: *Chincarini 1978*

Bref historique des cartographies



CfA-2 18 000 spectres de galaxies (1985-95)

SSRS2, APM.. (several telescopes 1-2m) +MMT (4-6m)

SDSS-I/II: Sloan Digital Sky Survey: 1 million de spectres de galaxies

images de 100 millions d'objets, 100 000 Quasars

1/4 de la surface du ciel (2.5m telescope)

Apache Point Observatory (APO), Sunspot, New Mexico, USA

→ 2000-2008: Legacy

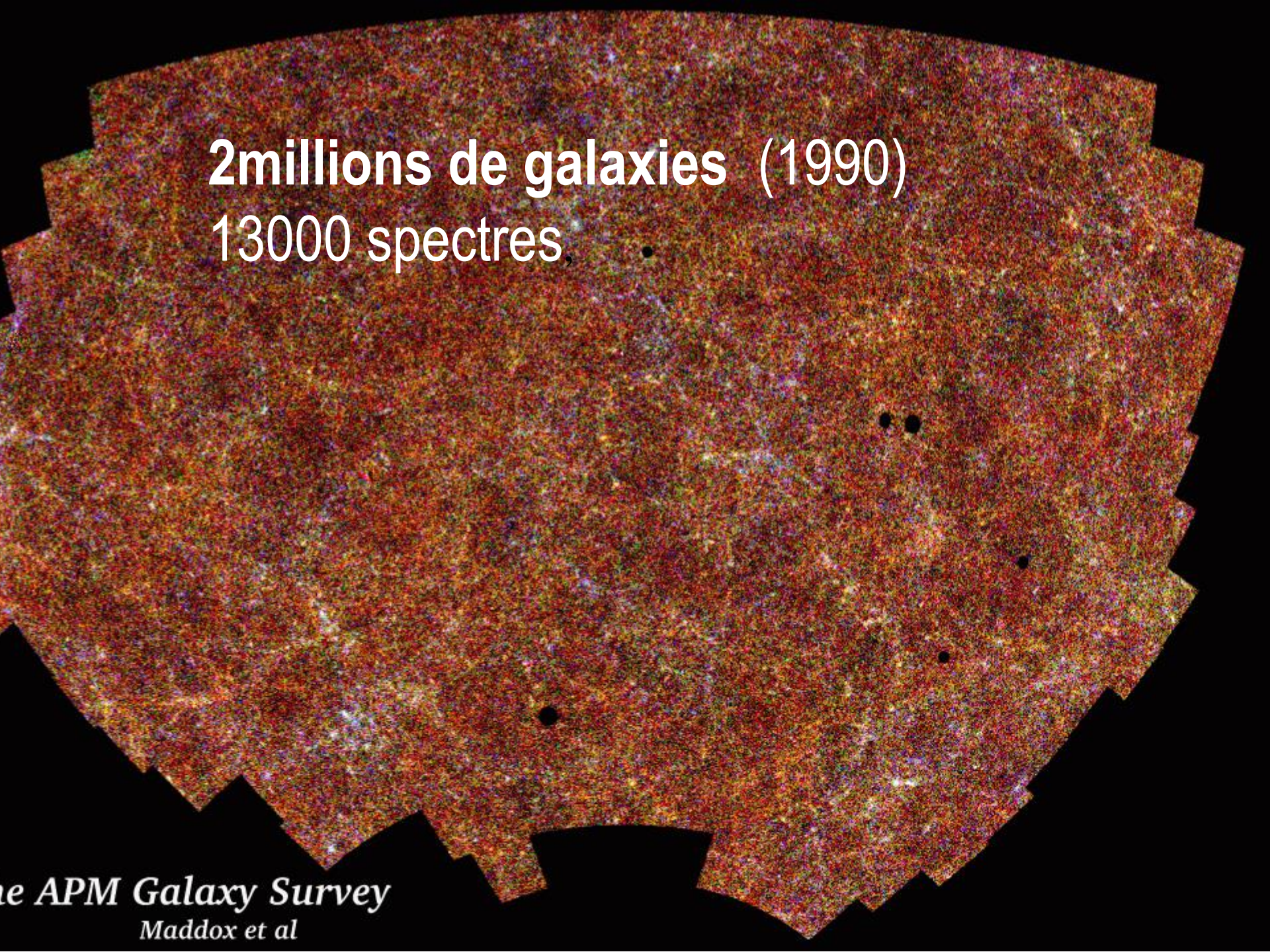
2dF GRS: Galaxy Redshift Surveys: 250 000 spectres de galaxies

AAT-4m, Australia et UK (400 spectres par pose)

1997- 2003, $z=0-0.2$

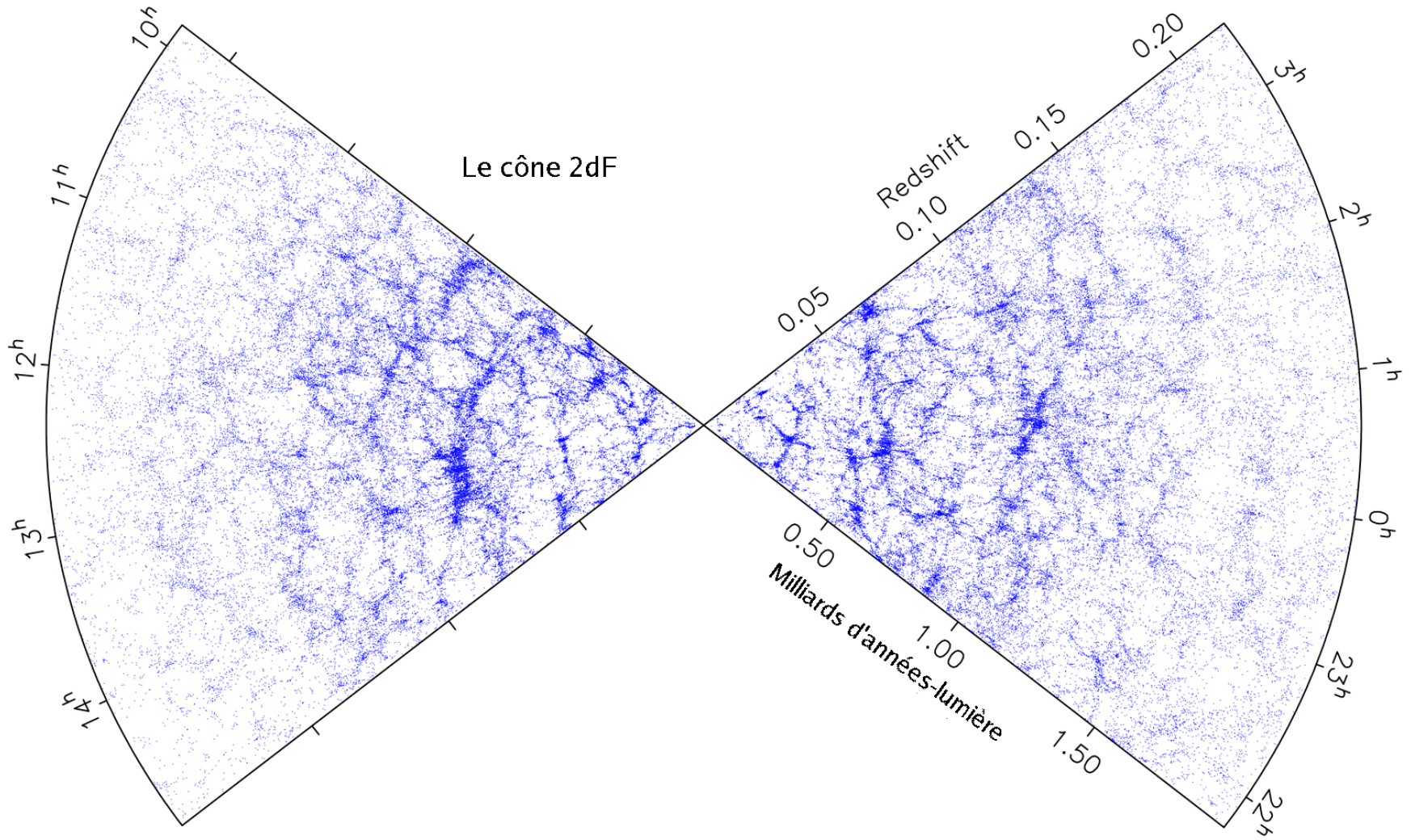
$R=600\text{Mpc}$ (2 milliards d'al)





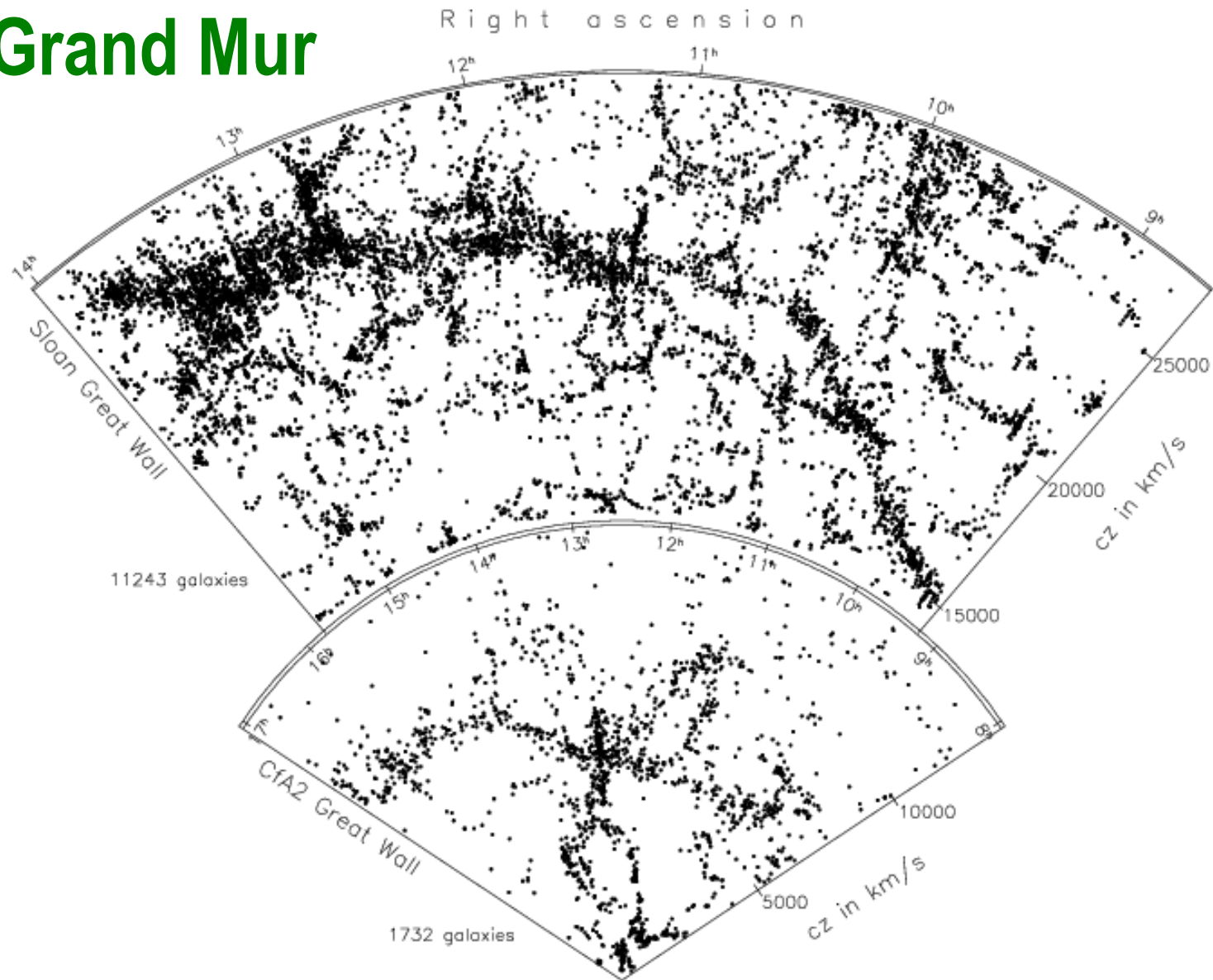
2millions de galaxies (1990)
13000 spectres

2dF Galaxy Redshift Survey

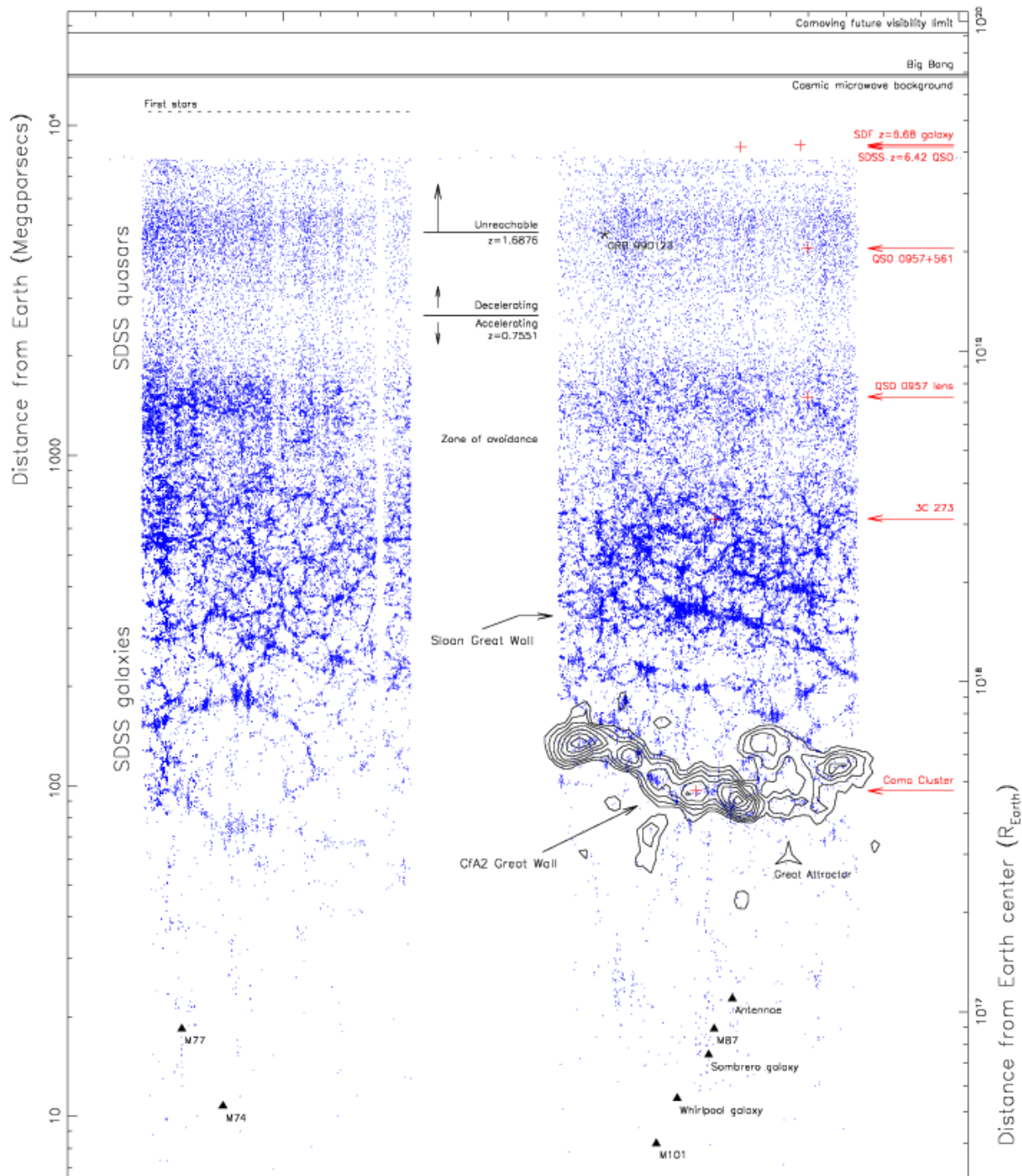


250 000 galaxies, Colless et al (2003)

Le Grand Mur



Comparaison du CfA2 et SDSS (Gott 2003)



Les Grandes Structures

Gott et al (03)
 Carte Conforme
 Echelle
 Logarithmique

Grand mur SDSS
1370 Mpc

80% plus grand que
 Le grand mur CfA2

Le projet SDSS – APO Apache Point Observatory

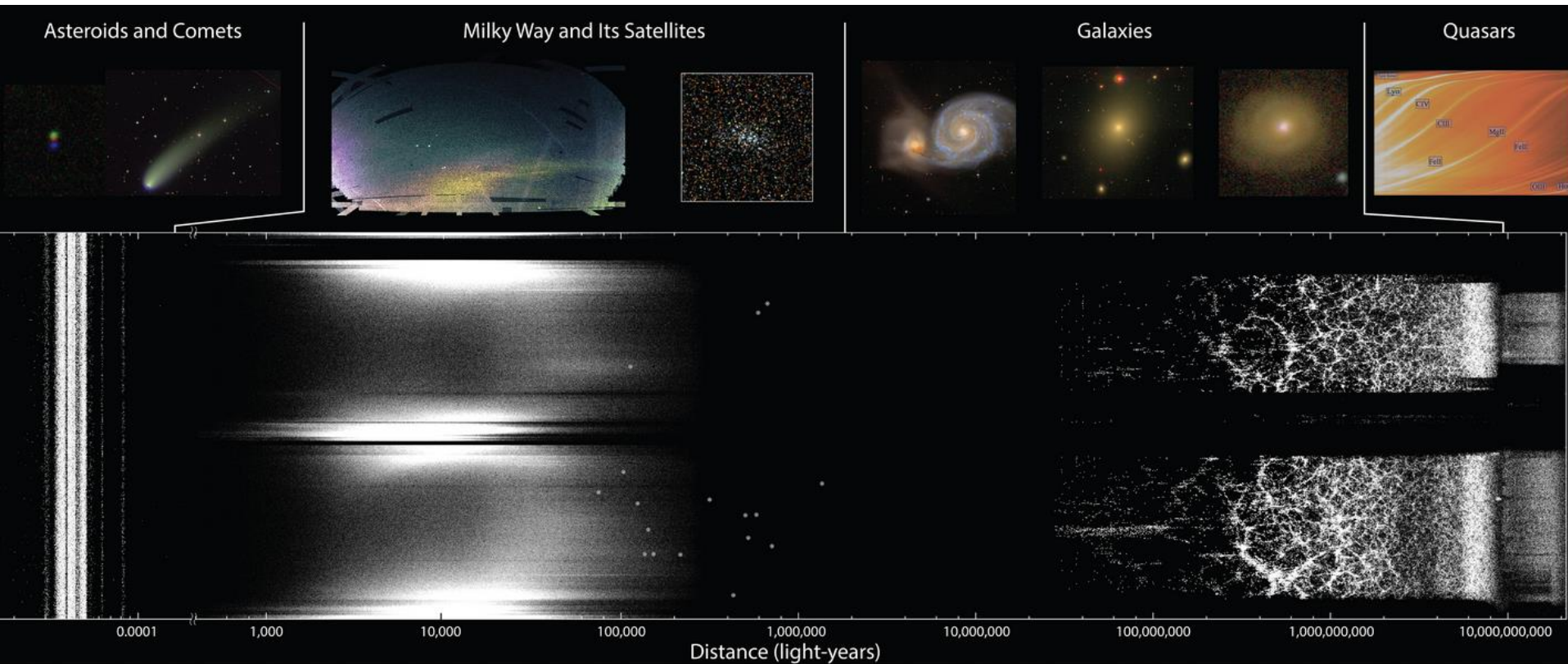
Depuis 20 ans (première lumière en **Mai 1998**)

Très grand champ, et télescope de 2.5m dédié

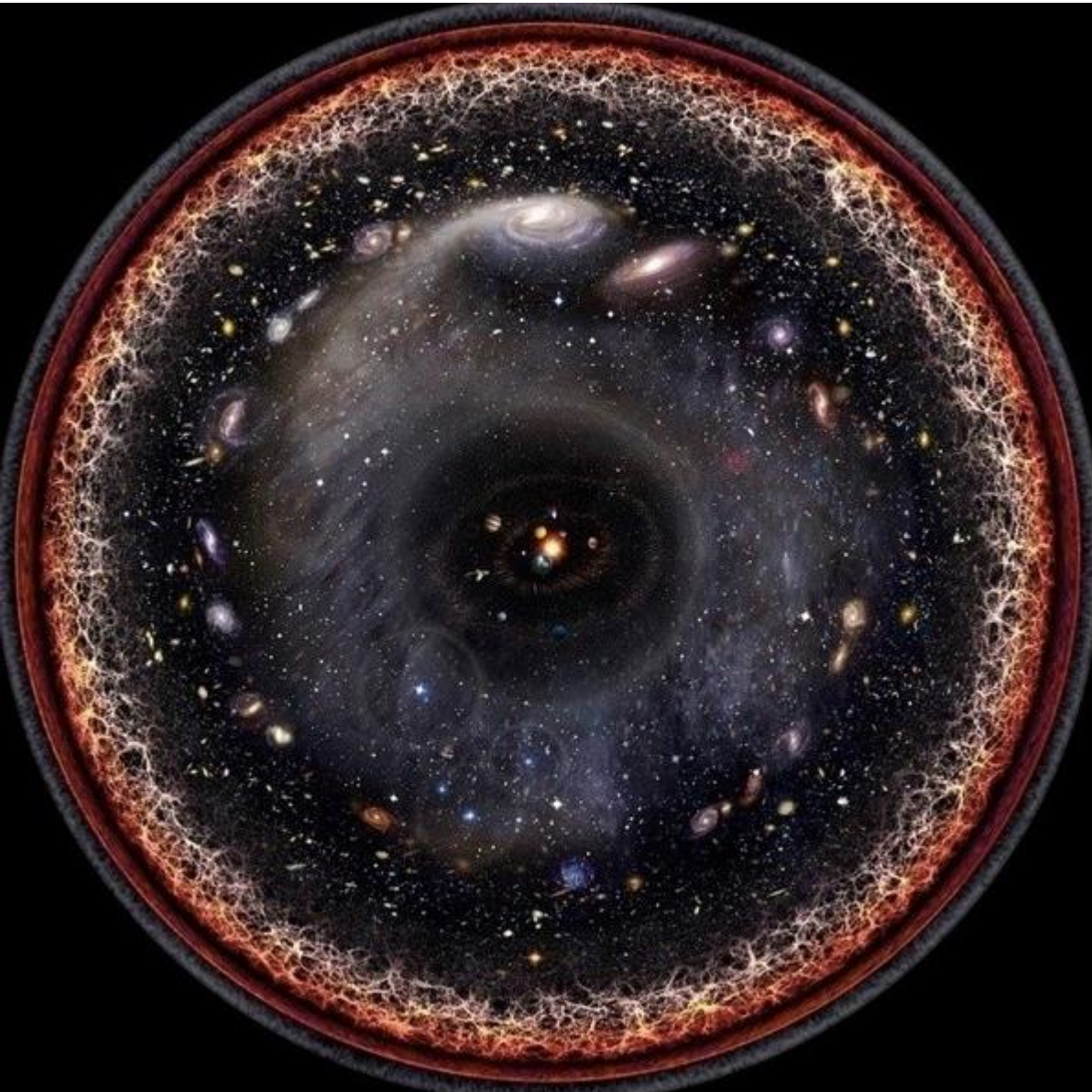
Observation de la **Voie lactée**: APOGEE Galaxy Evolution Experiment

Galaxies, imagerie et spectroscopie (multi-objets, des centaines à la fois)

Les **quasars**, jusqu'à $z=8-9$



Notre vision de l'Univers

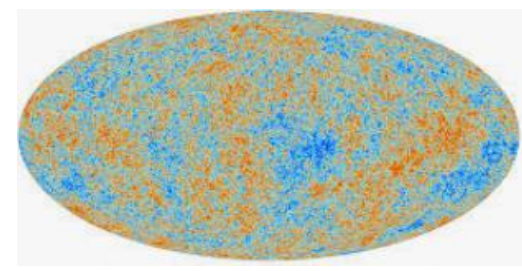


Au centre le système
Solaire
Puis les étoiles de la Voie
Lactée

Les 300 milliards de
galaxies contenues
dans notre Horizon

**Les grands surveys tels
SDSS observent tout à
la fois**

Observer les Grandes Structures



→ Le fonds cosmologique microonde (CMB)

Tout le ciel avec COBE-WMAP-Planck + SPT, ACT, etc.. (<10%)

→ **Imagerie**, SDSS (Sloan) 35% du ciel + Stripe 82 (0.5%)

+ Pan-STARRS (75% du ciel) + CFHT-lens (0.5%)

Champs profonds Hubble (COSMOS, etc)

~5 millions de galaxies, $\sim 1^{\circ 2}$

→ **Spectroscopie**, 2dF

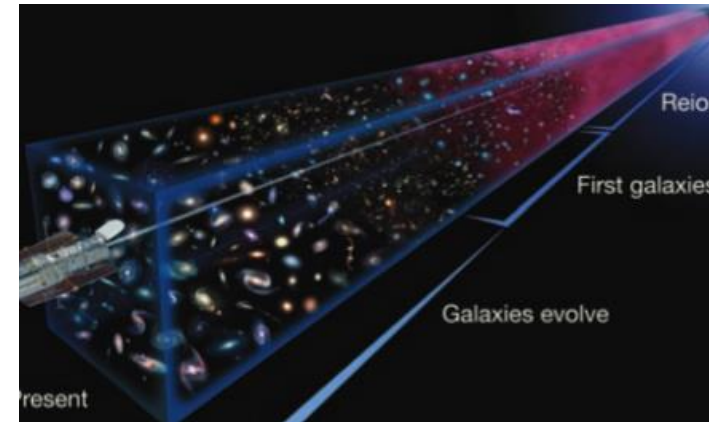
SDSS-I/II 1million de galaxies $z=0-0.2$

100 000 Galaxies rouges lumineuses (LRG) $z=0-0.45$

SDSS-III BOSS, 1.5 million galaxies lumineuses $z=0.2-0.7$

160 000 Quasars $z=2-4$

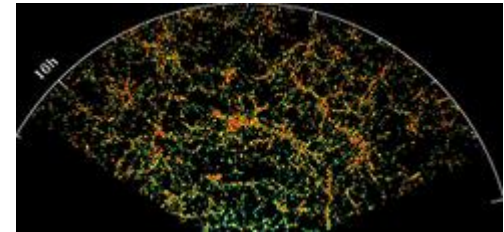
SDSS-IV depuis 2014 -- aujourd'hui DR (Data Release) 14 --



Le SDSS en quelques chiffres

Financé par Alfred Sloan Foundation 25% + US Dep of Energy 5%,
puis 50 Universités, dans 4 continents, (dont une participation Française)
10 000 astronomes l'ont utilisé, ~10 000 publications

Imagerie: 5 couleurs ugriz
200 millions de sources



Spectroscopie: APOGEE2, multi-objets, 300 spectres simultanés,
R=22000 envoyés par fibre optique de 2 arcsec

e-BOSS: 1000 trous dans une plaque, champ de 3 degrés
1000 fibres optiques, de taille 2 arcsec, font les spectres bleus et rouges
R=1500-3000 selon la longueur d'onde

MANGA: 17 IFU (20-128 fibres) pour 17 galaxies en
Simultané --- Surveys de 10 000 galaxies



L'instrument SDSS

25% du ciel:

DR7 - 8423 sq. deg.

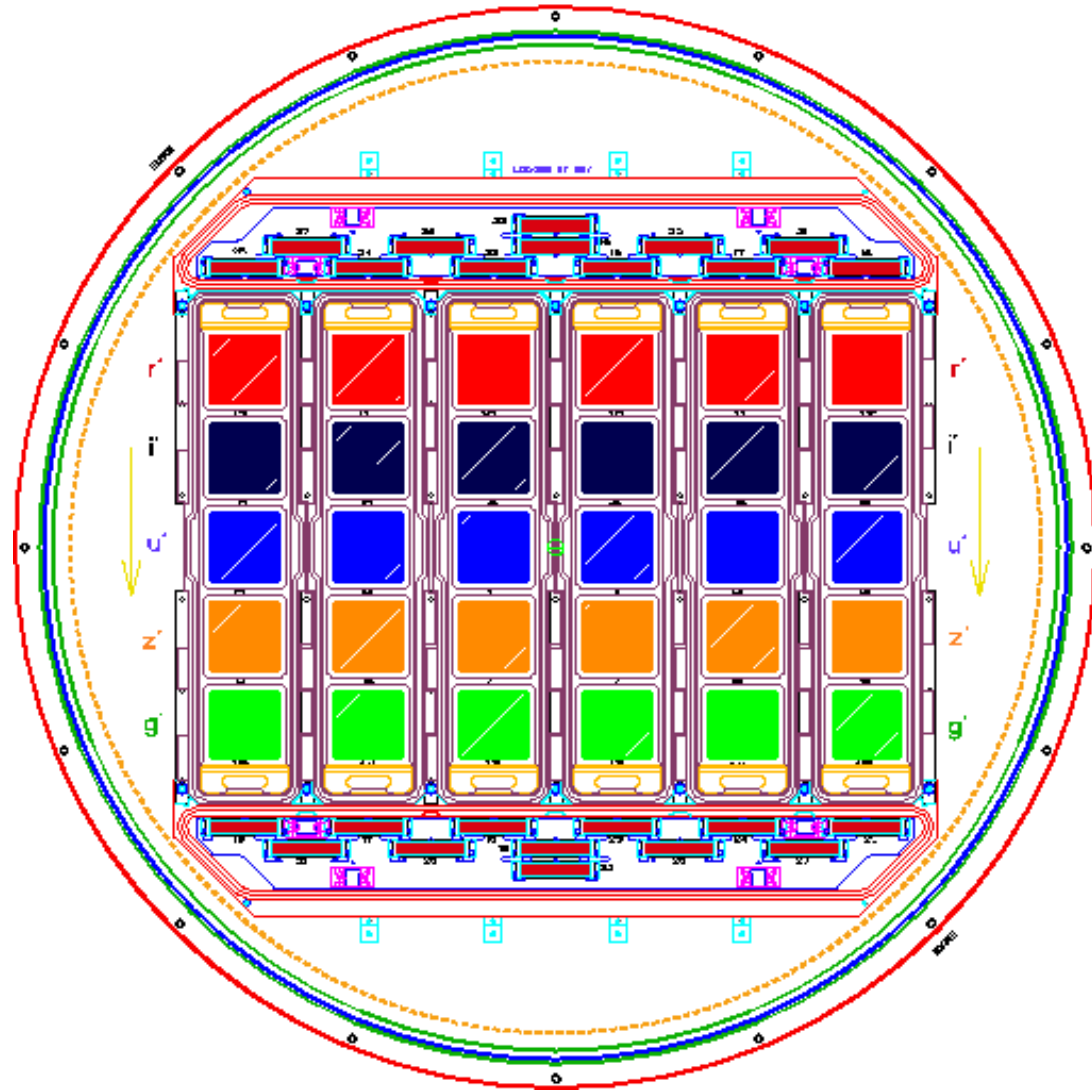
Photométrie: système de
5 filtres: ugriz

Driftscan mode

- 5 filtres:
- 30 CCD, 5 x 6
- S/N ~ 5
- CCD: 2048x2048
- 120 Mbyte

Spectroscopie

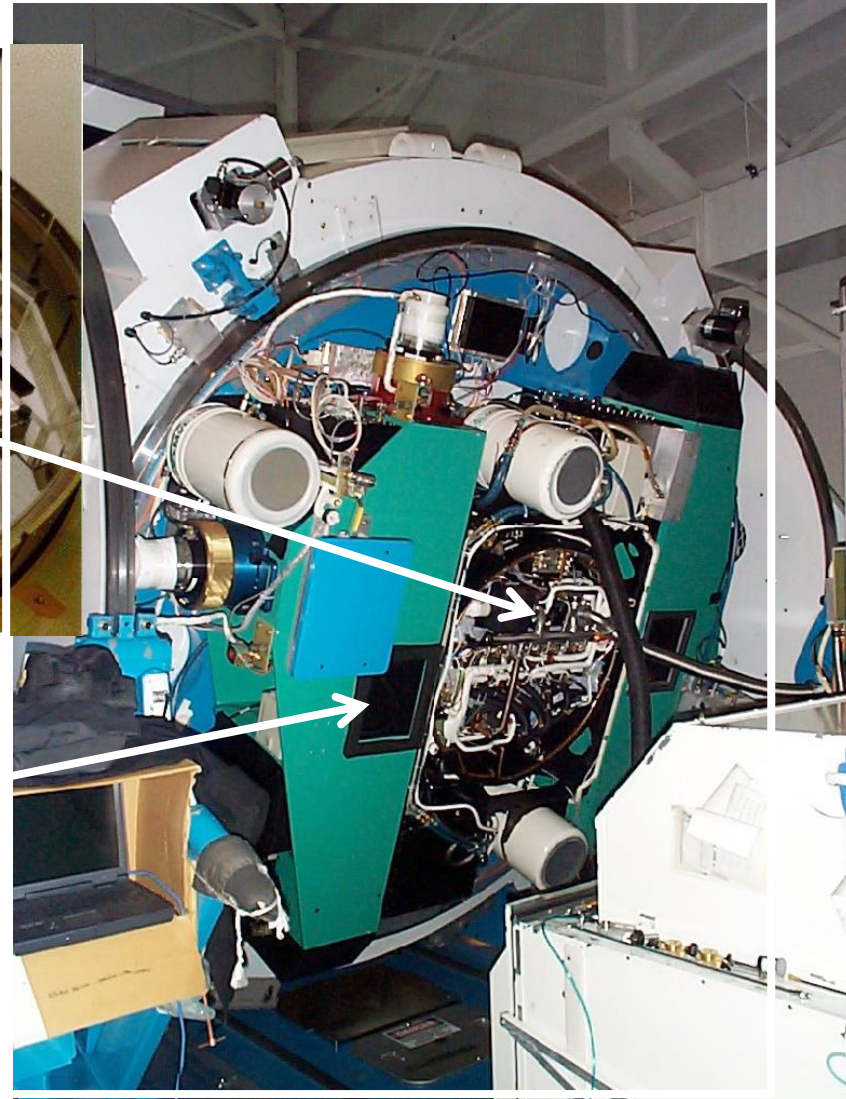
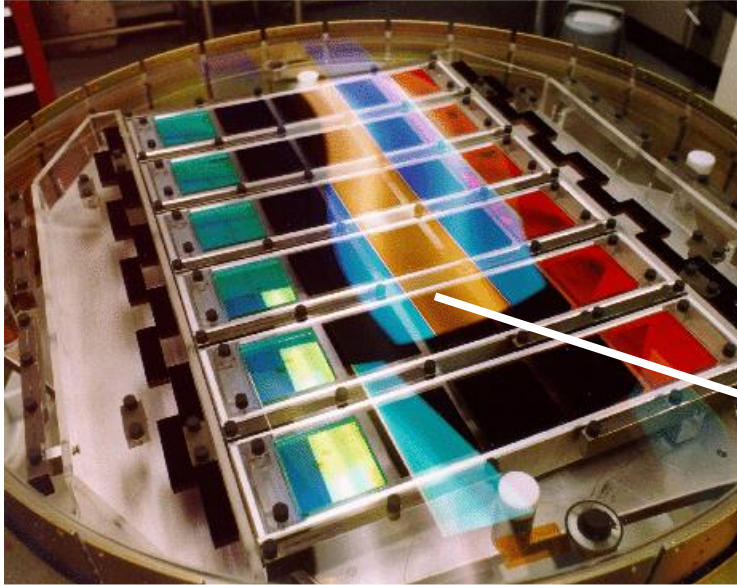
- 640 fibres /pose
- 6-9 poses/nuit



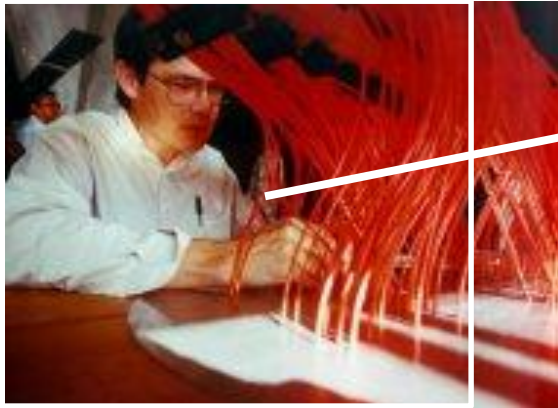
Télescope SDSS

Camera
5 couleurs

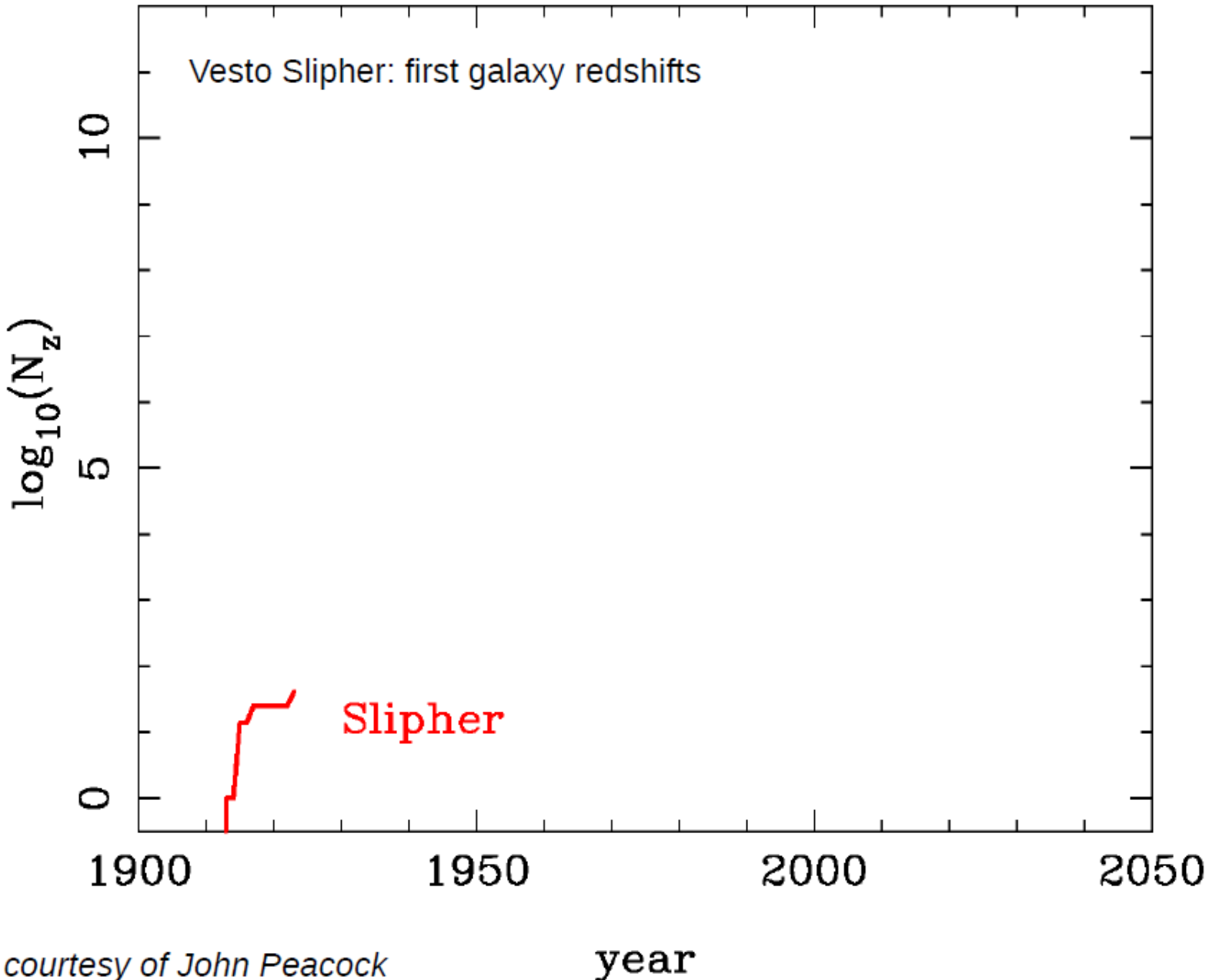
30 CCD



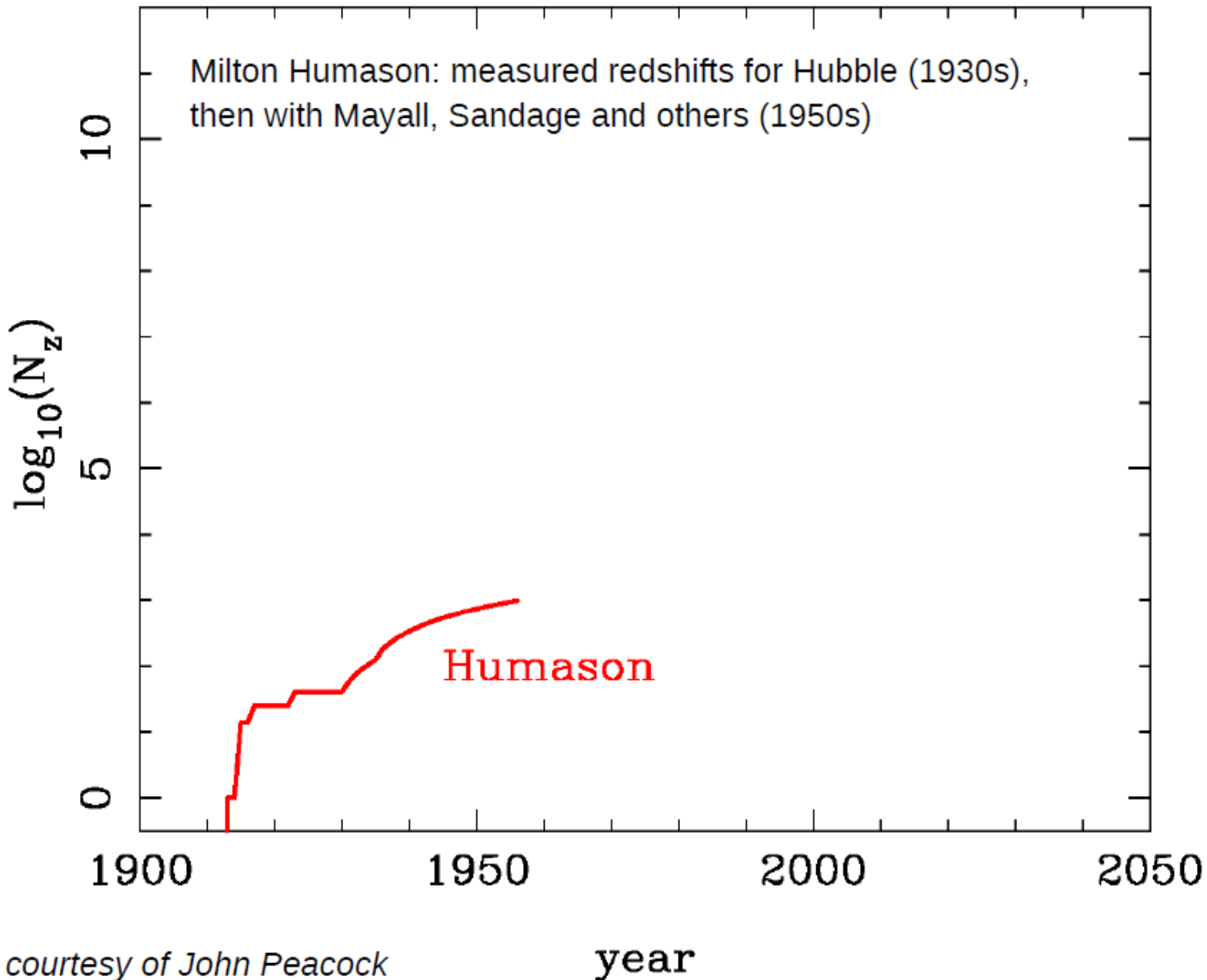
Spectro
à fibres



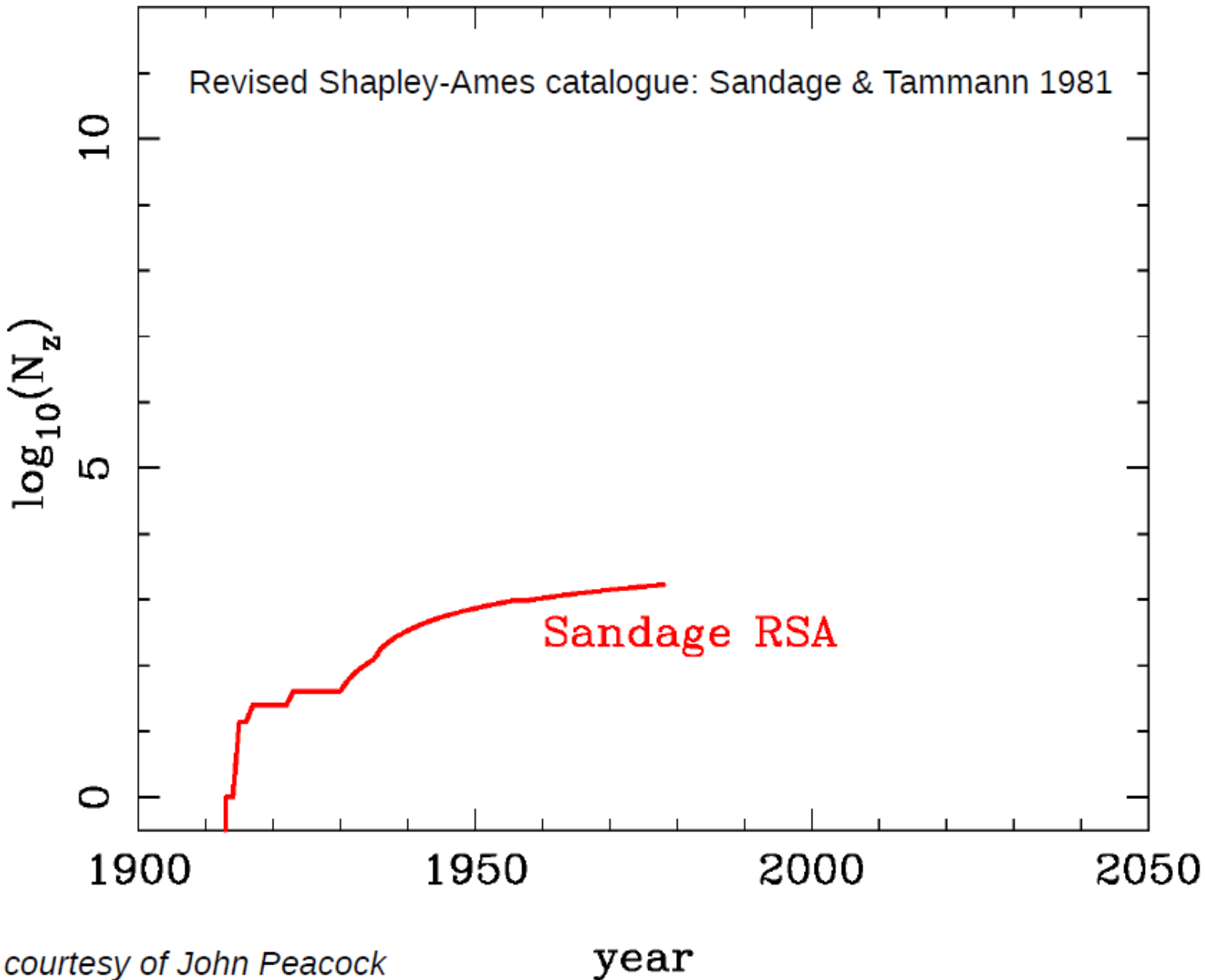
Un siècle de cartographie de galaxies



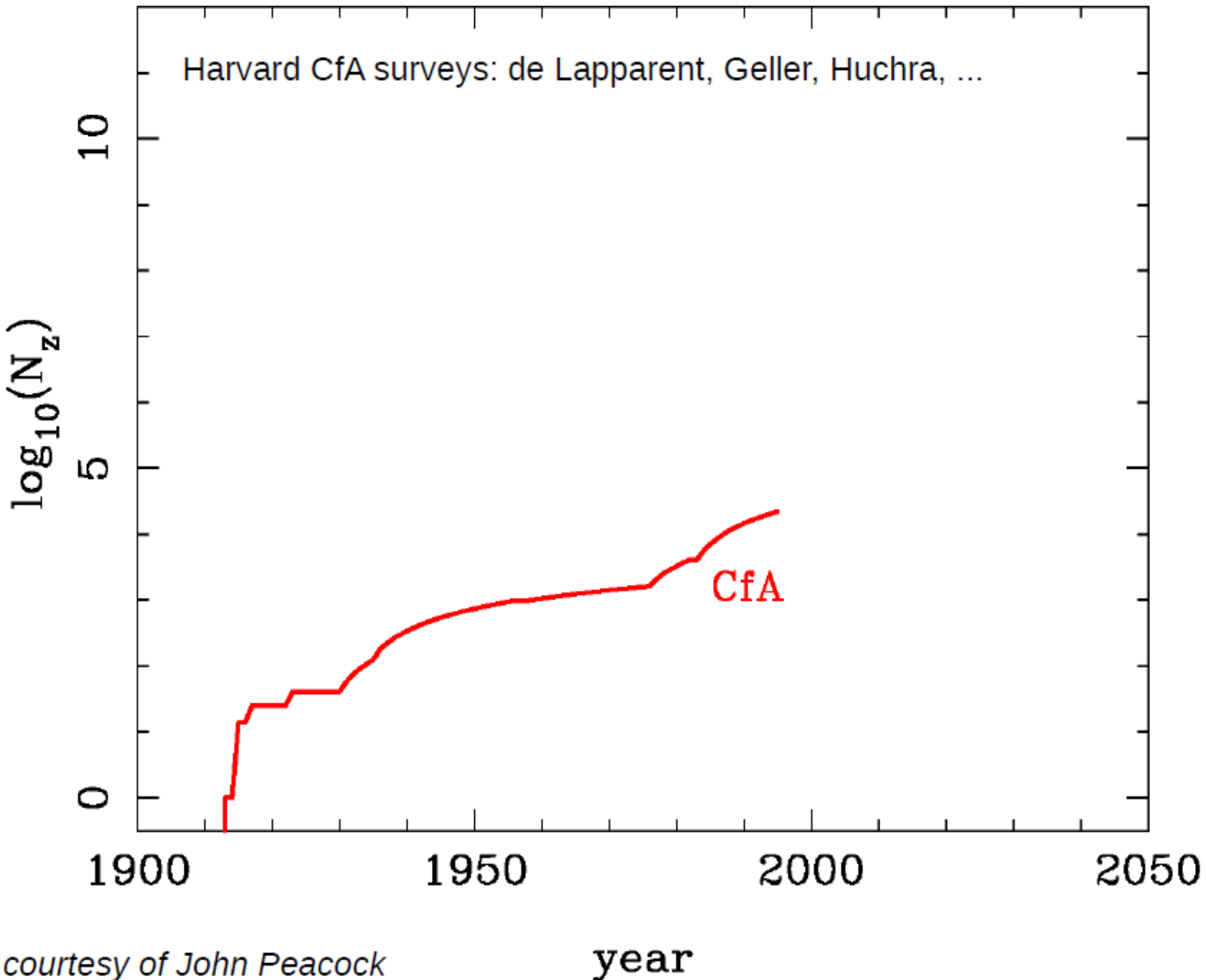
Un siècle de cartographie de galaxies



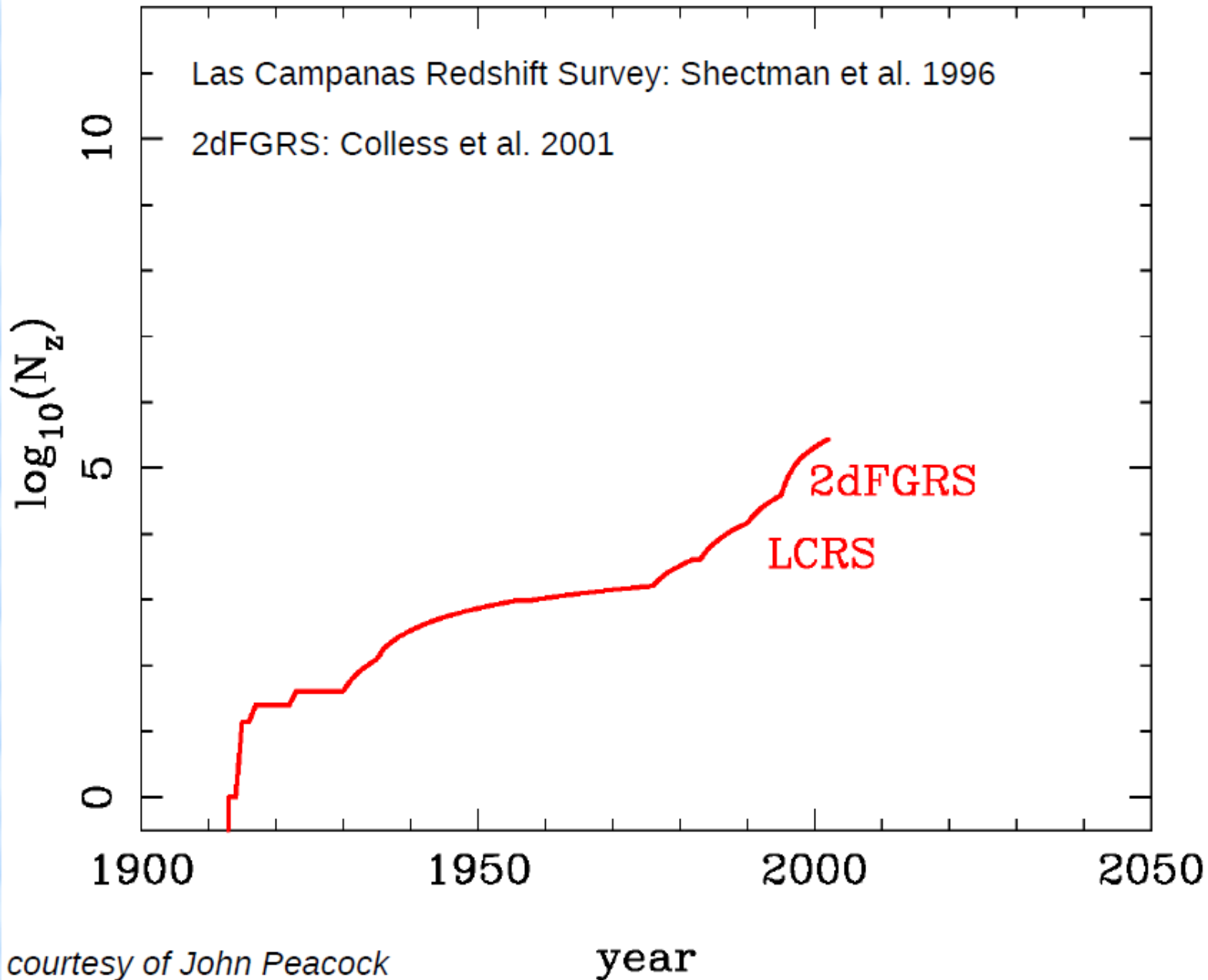
Un siècle de cartographie de galaxies



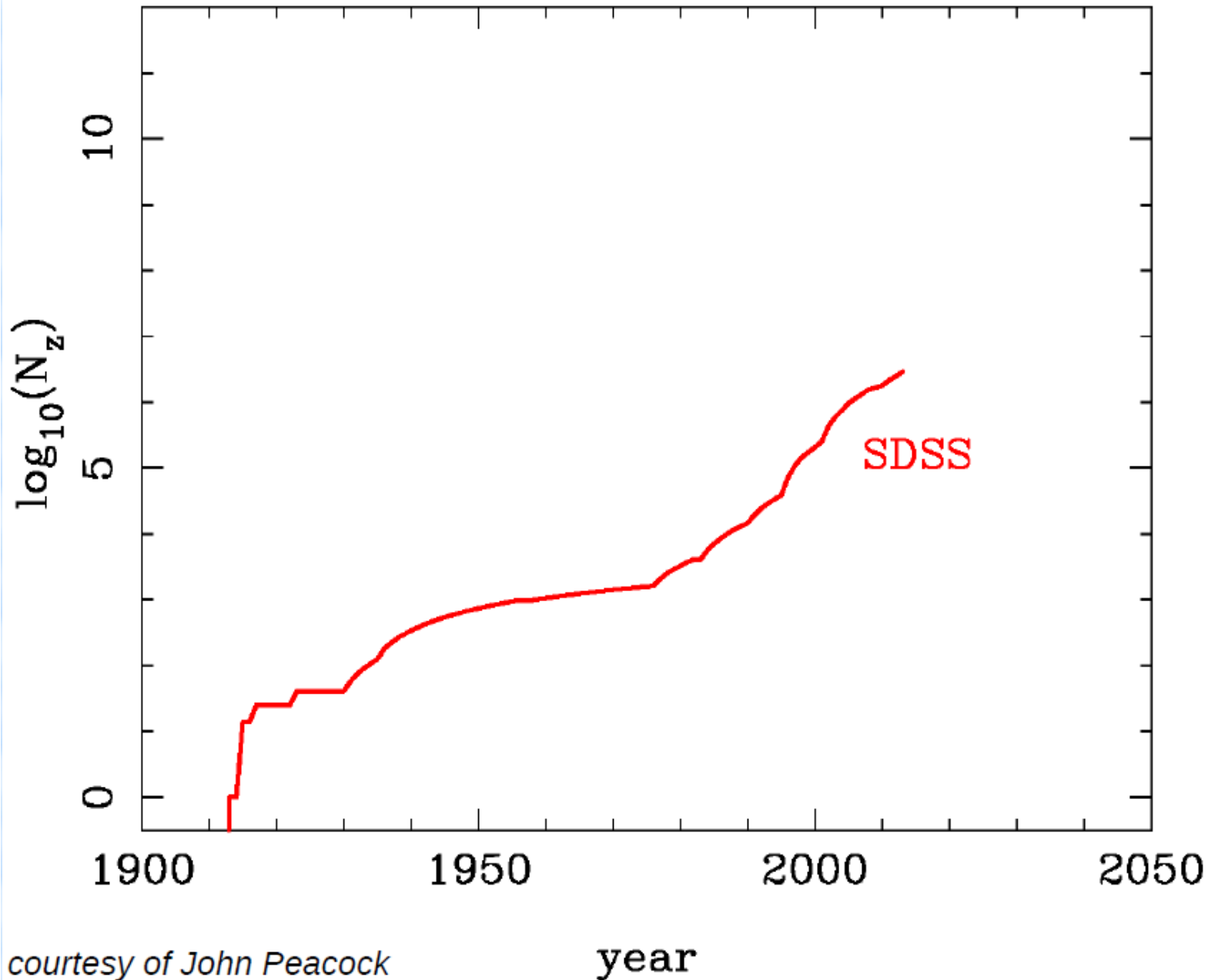
Un siècle de cartographie de galaxies



Un siècle de cartographie de galaxies



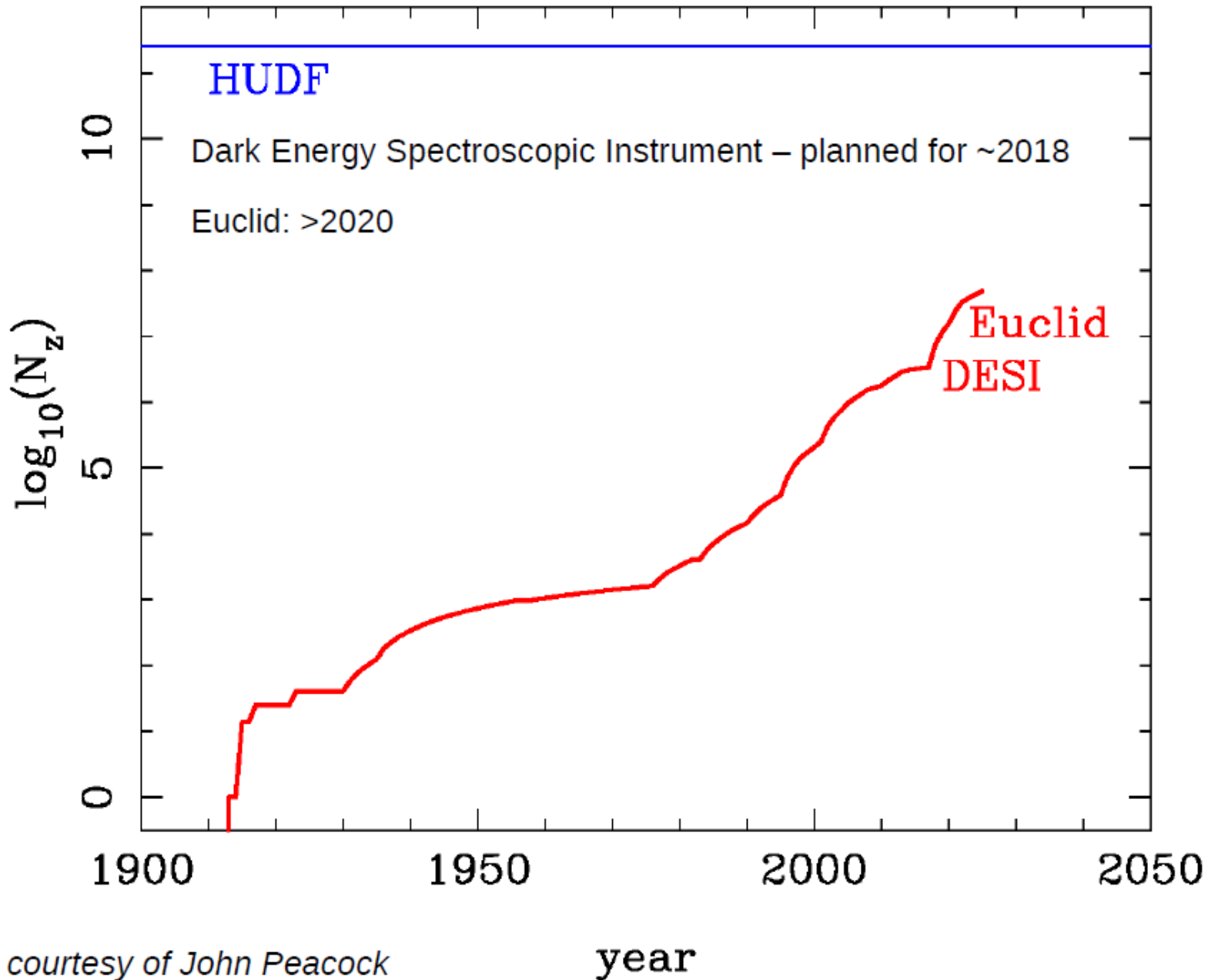
Un siècle de cartographie de galaxies



courtesy of John Peacock

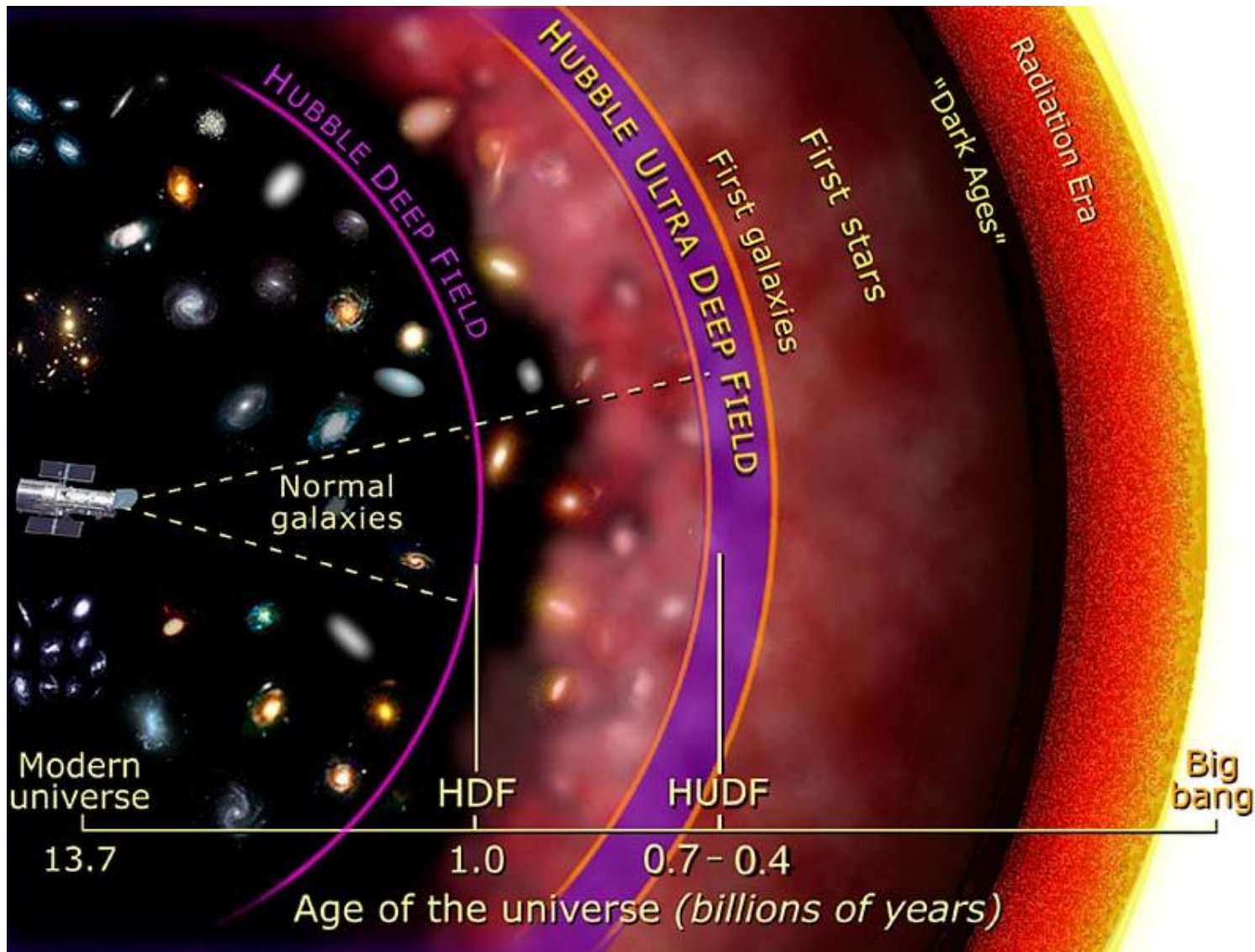
year

Un siècle de cartographie de galaxies



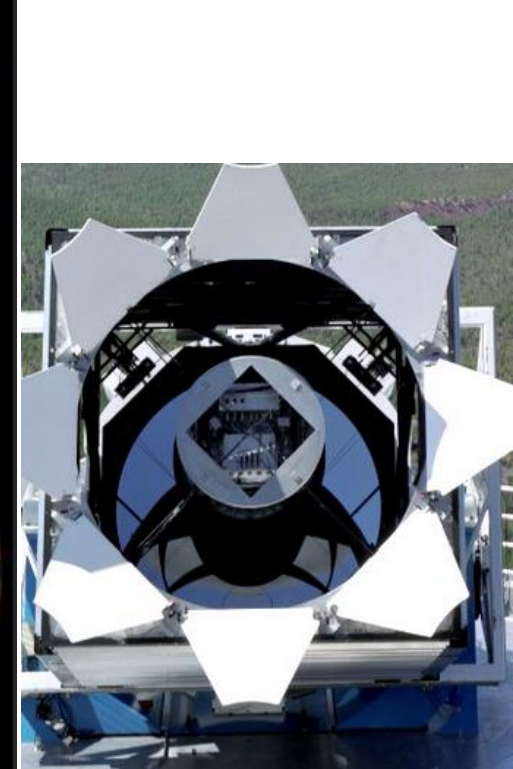
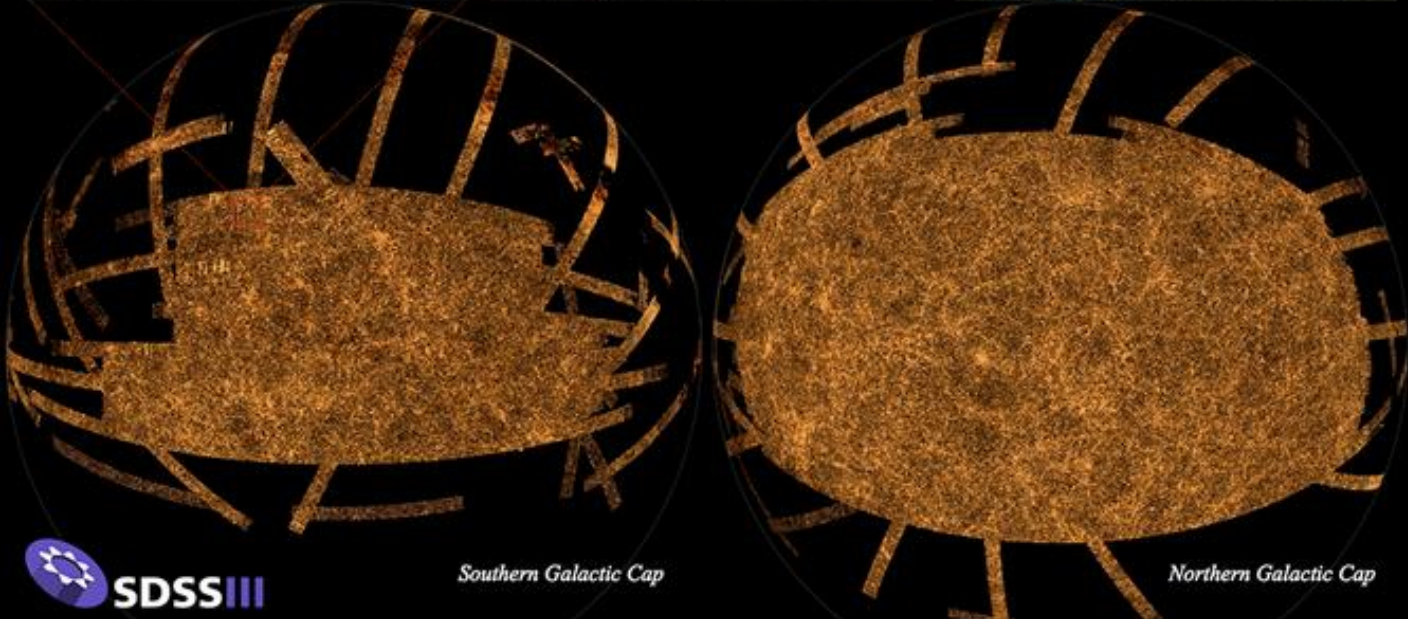
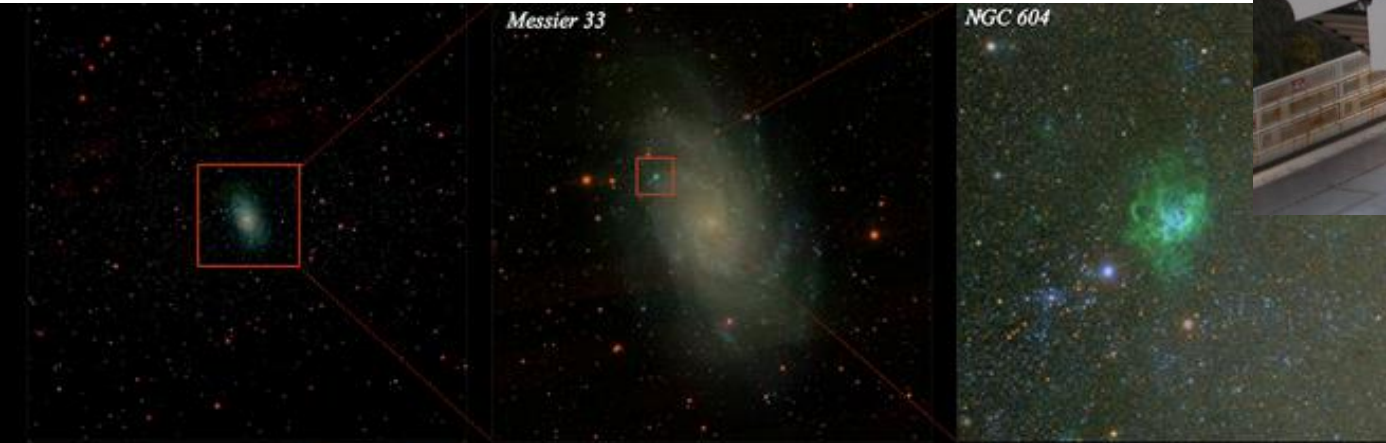
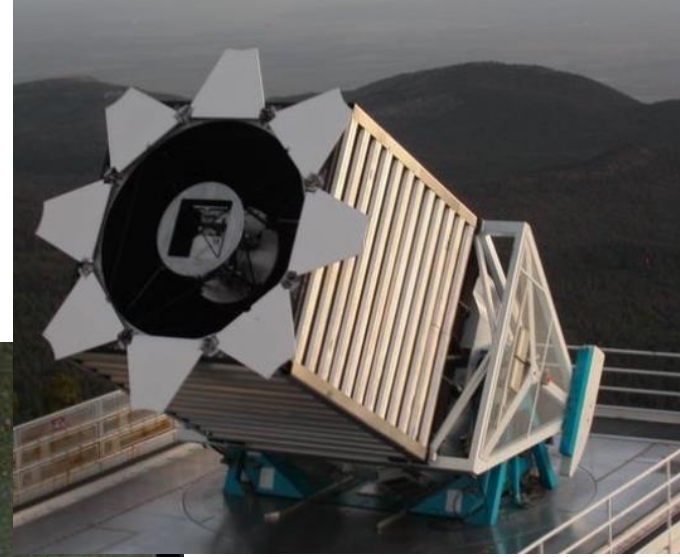
Jusqu'où peut-on explorer?

Des volumes de plus en plus grands → bcp plus de galaxies



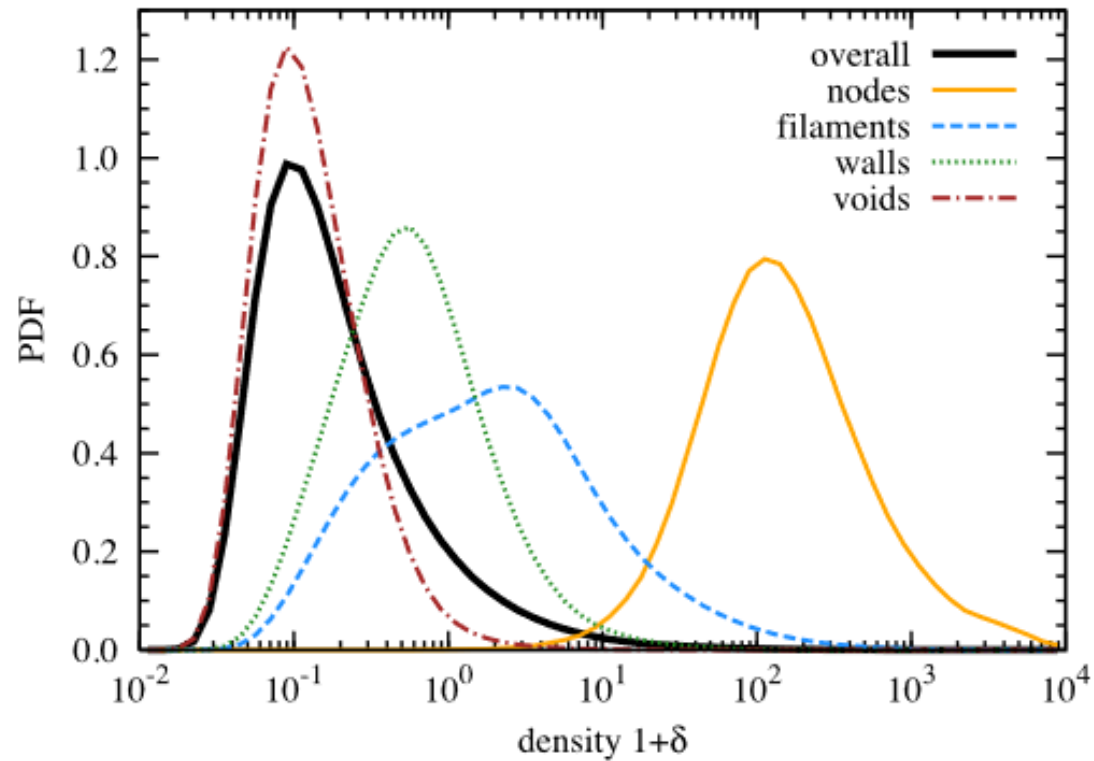
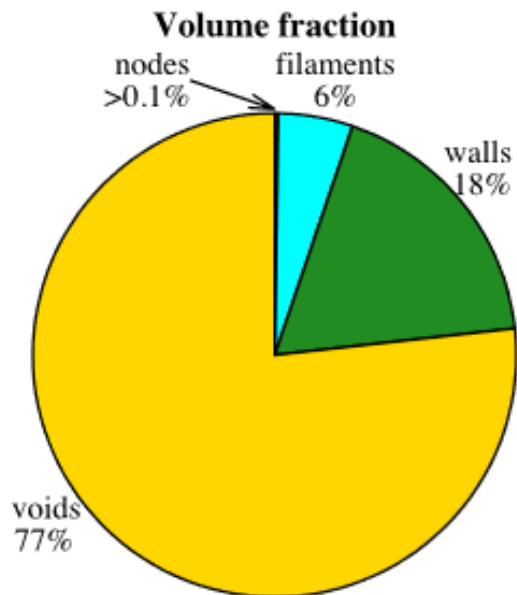
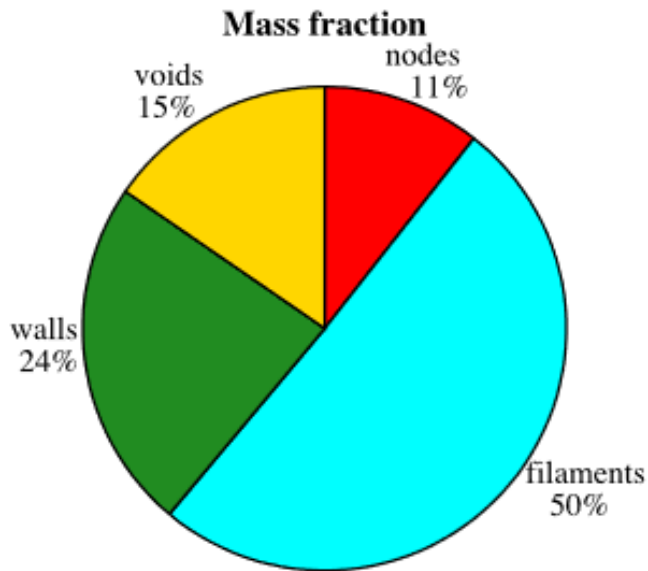
La cartographie Sloan

APO, complété par un 2.5m
au Chili (Du Pont telescope)



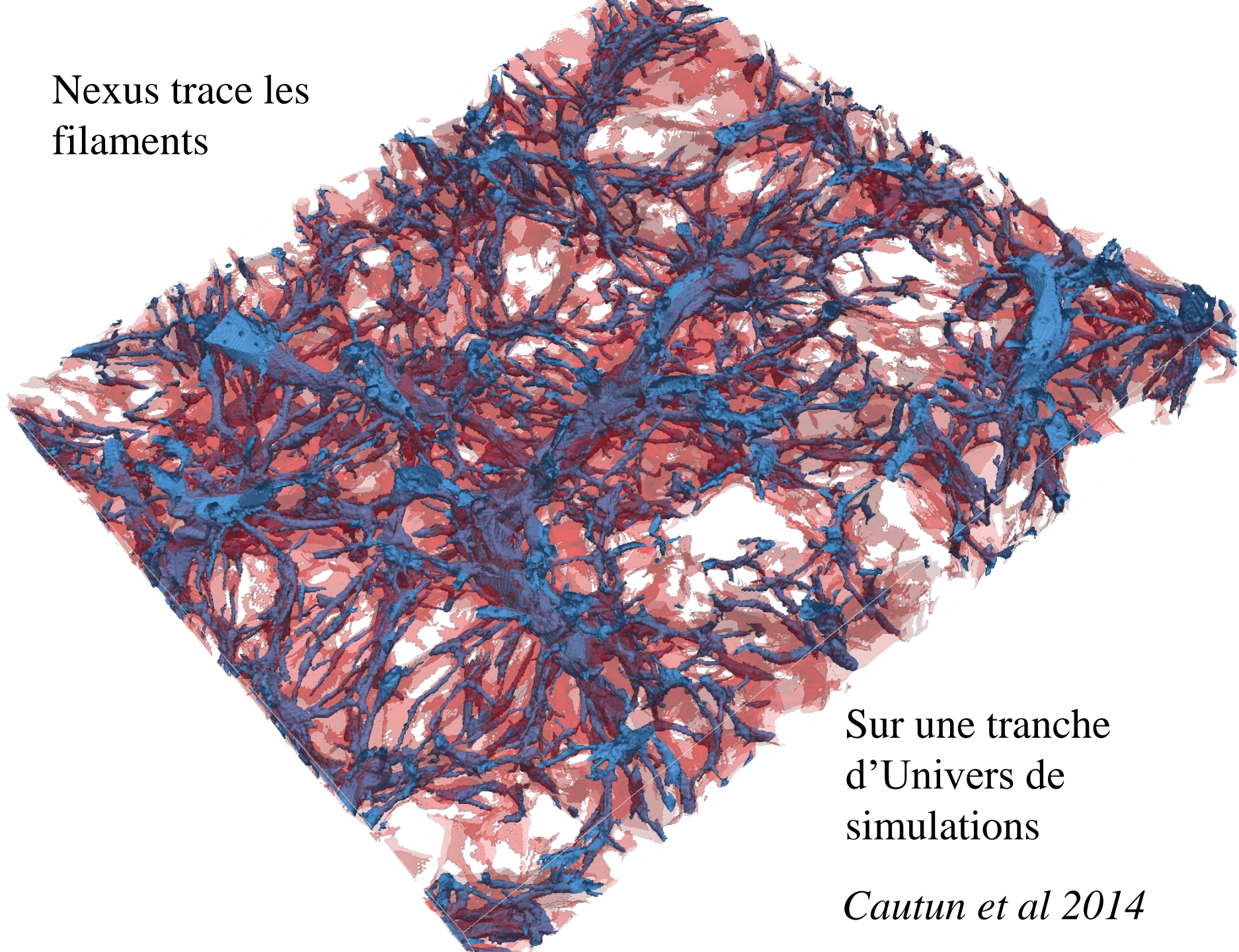
NEXUS: algorithme pour filtrage à toutes échelles

Application à des simulations cosmologiques



Cautun et al 2014

Nexus trace les
filaments



Sur une tranche
d'Univers de
simulations

Cautun et al 2014

SDSS-I/II

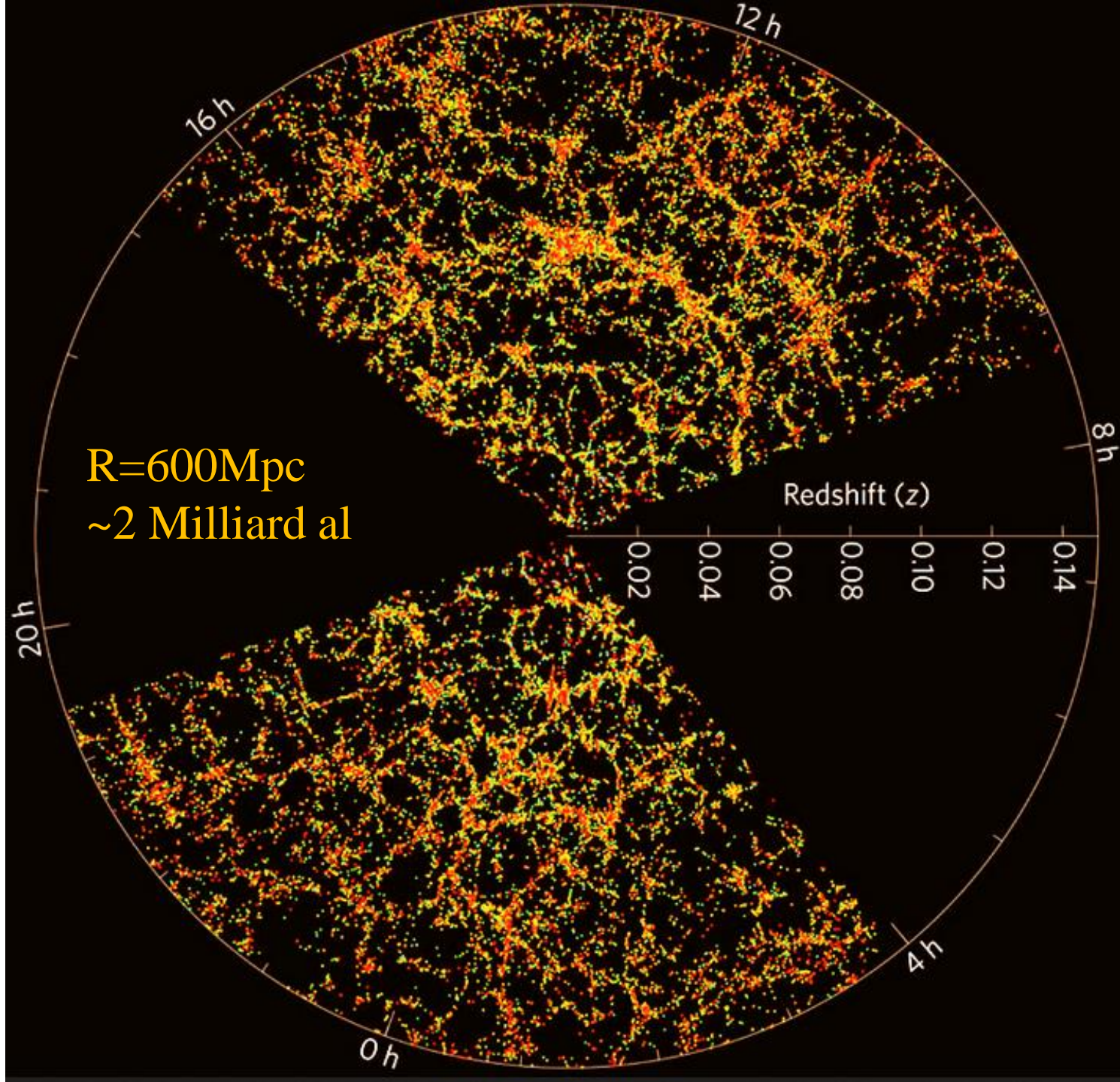
1 million
de galaxies
 $z=0-0.2$

Contraste
 $\delta\rho/\rho \sim 10^6$

SDSS-IV
200 millions
Imagerie

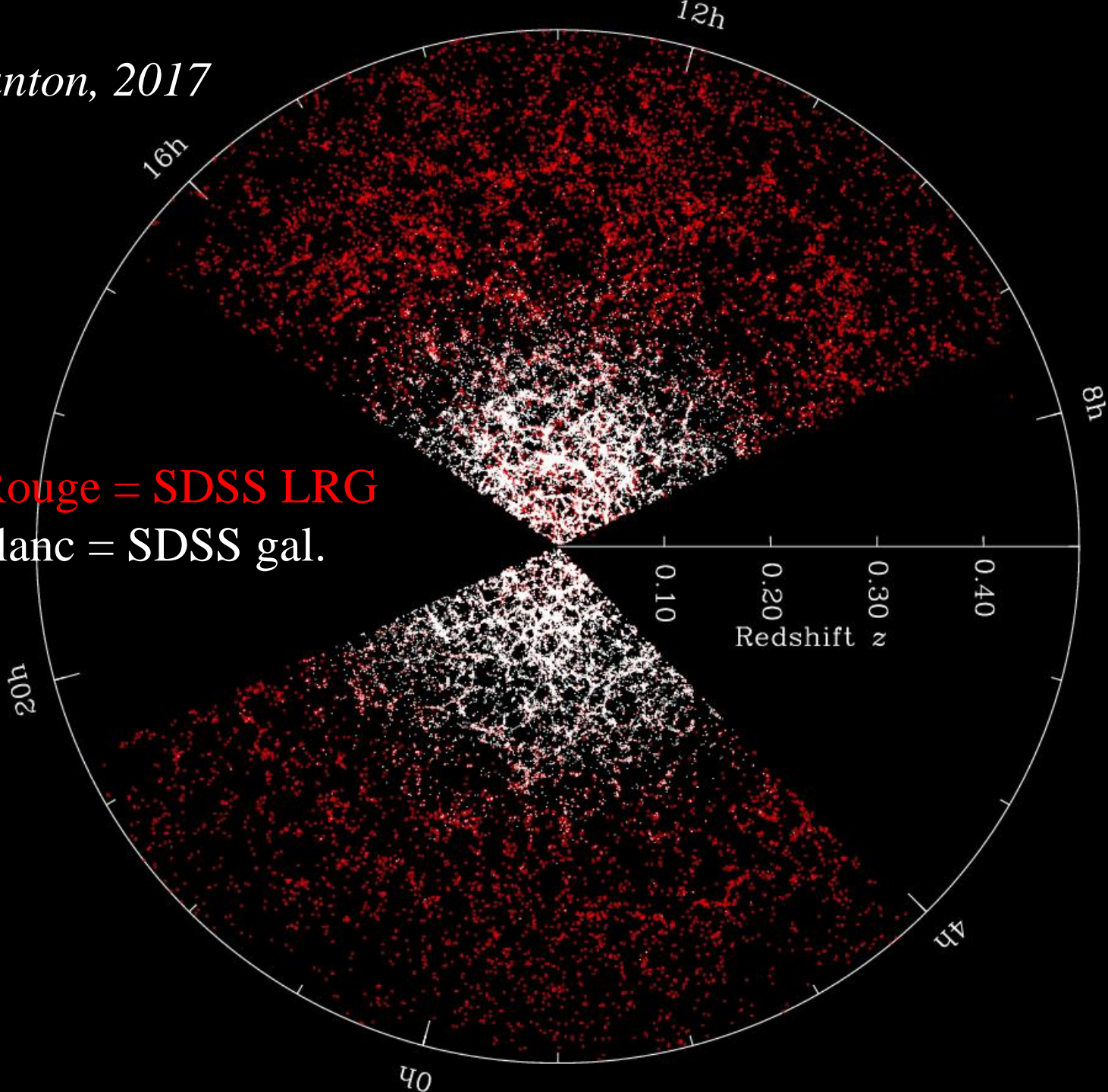
2.4 millions
de redshifts

500 000 QSO

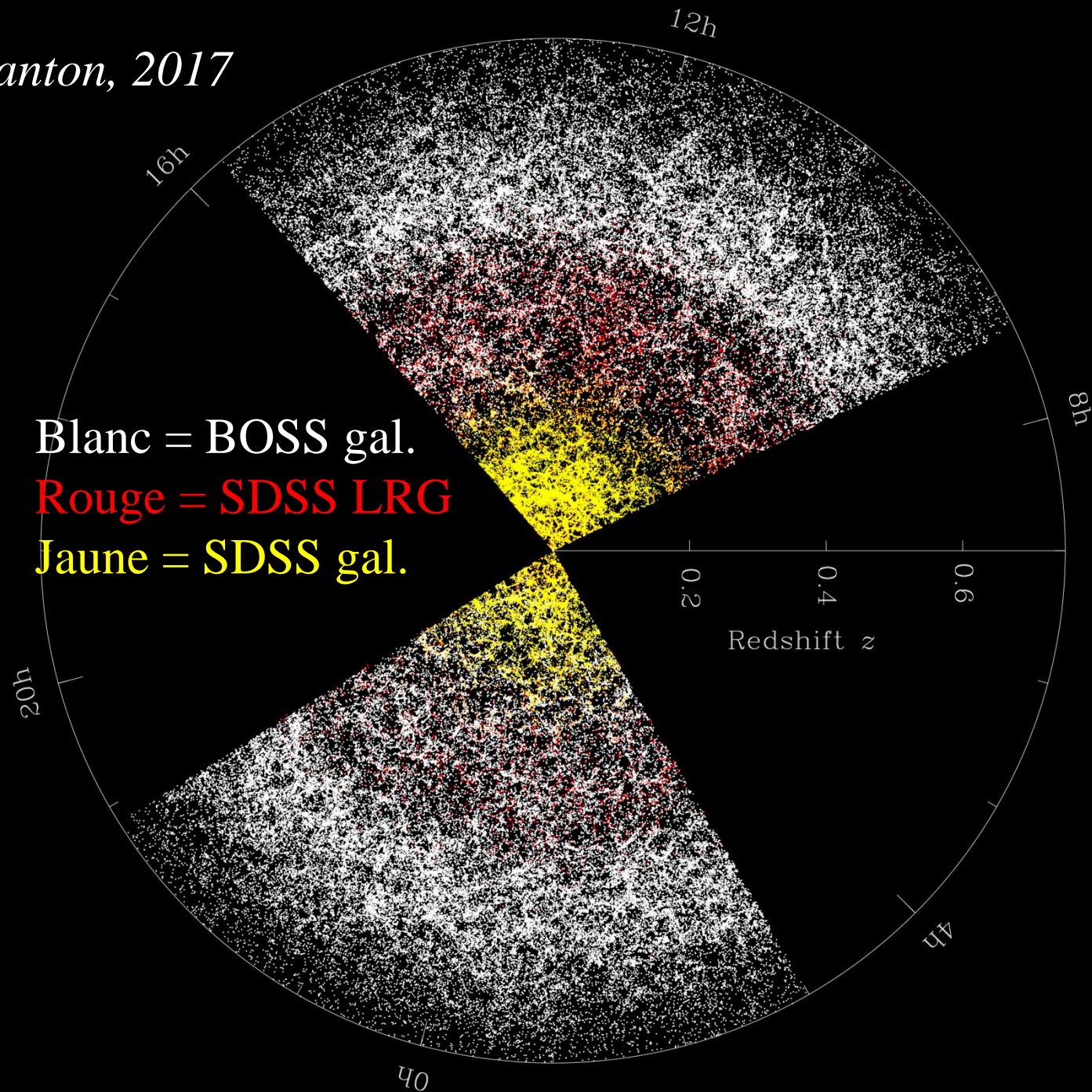


M. Blanton, 2017

.Rouge = SDSS LRG
Blanc = SDSS gal.

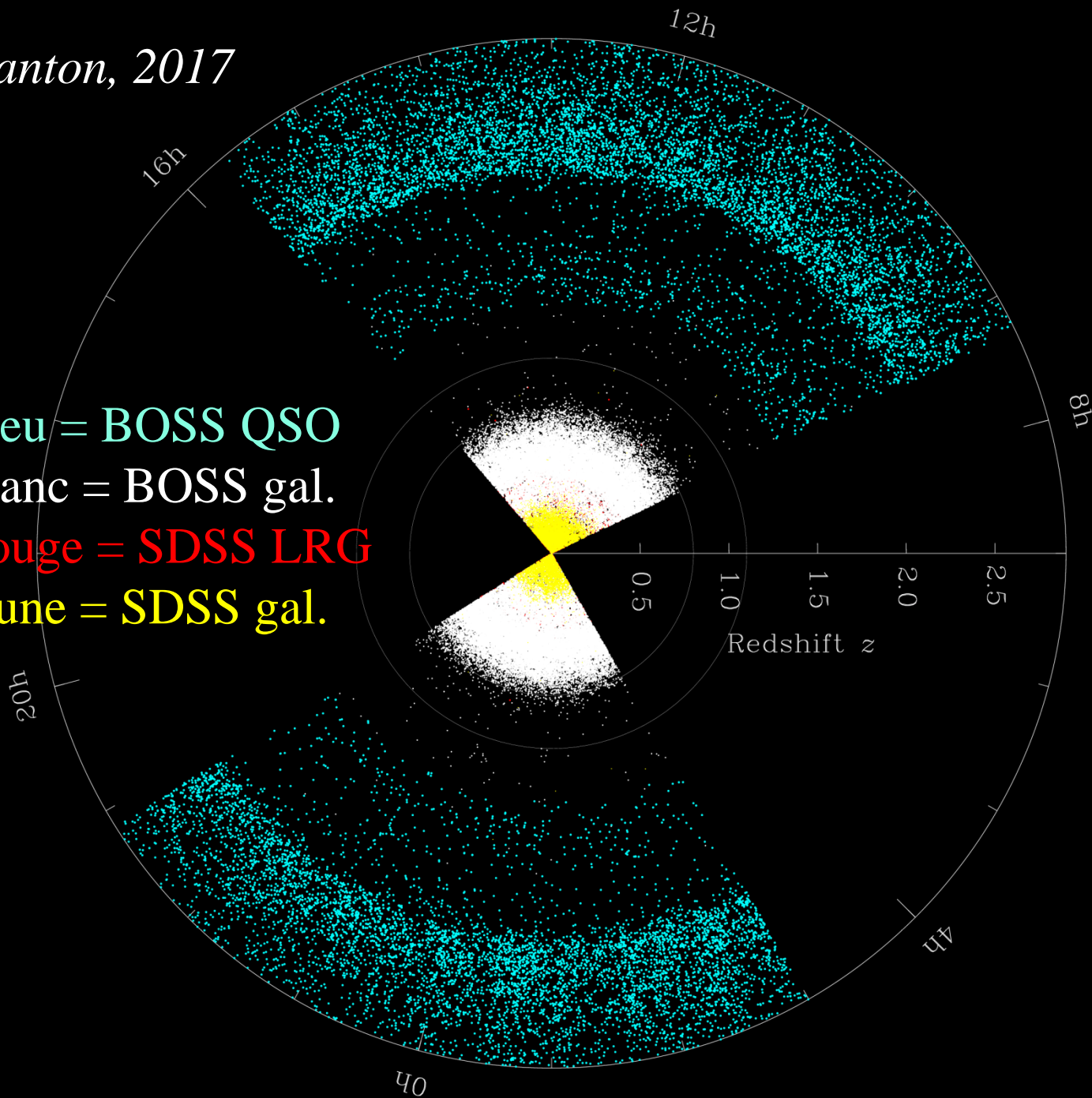


M. Blanton, 2017



M. Blanton, 2017

Bleu = BOSS QSO
Blanc = BOSS gal.
Rouge = SDSS LRG
Jaune = SDSS gal.



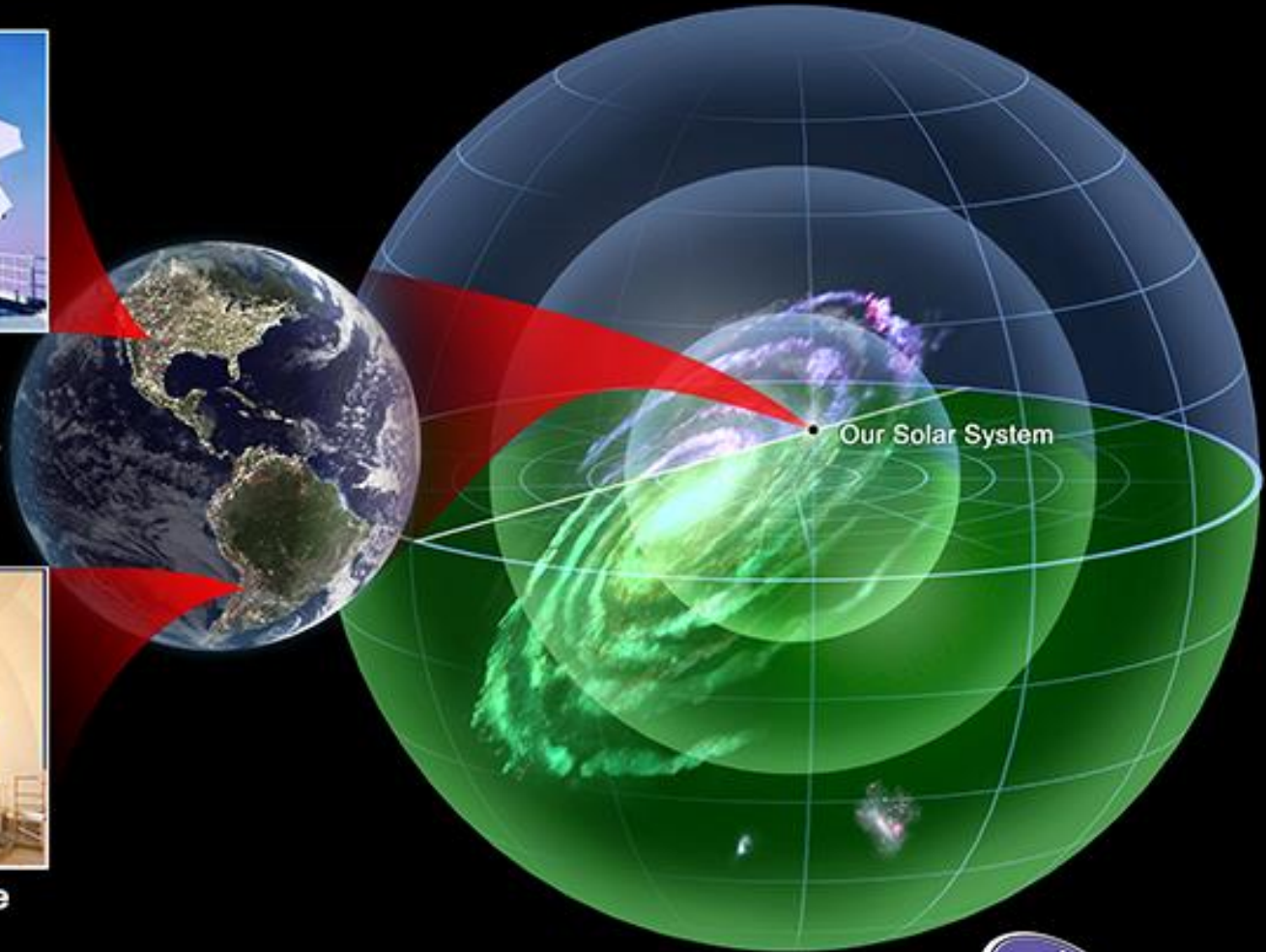
SDSS-IV peut voir toute la Voie lactée



Sloan Foundation
Telescope
New Mexico, U.S.A.

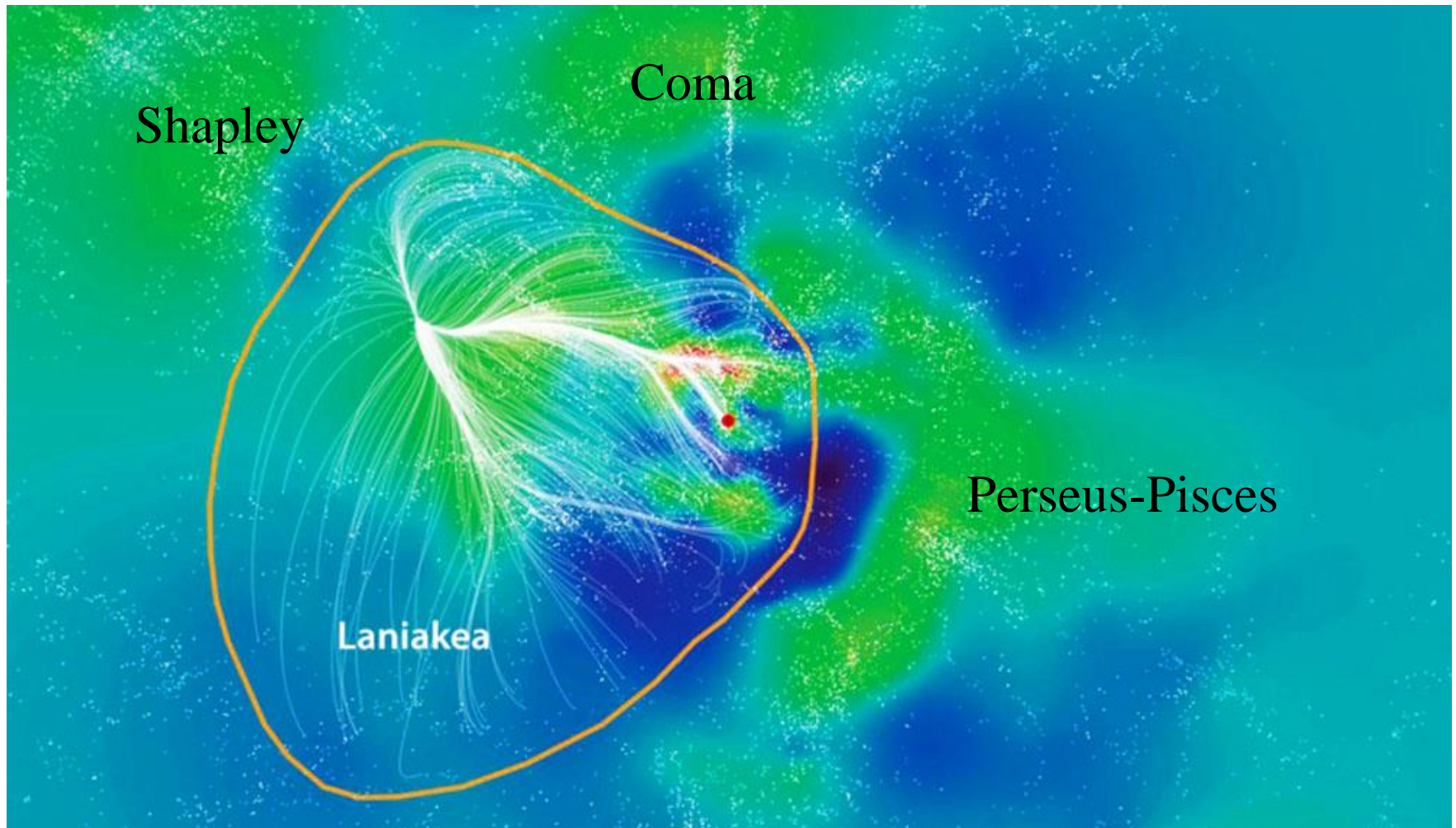


du Pont Telescope
Chile

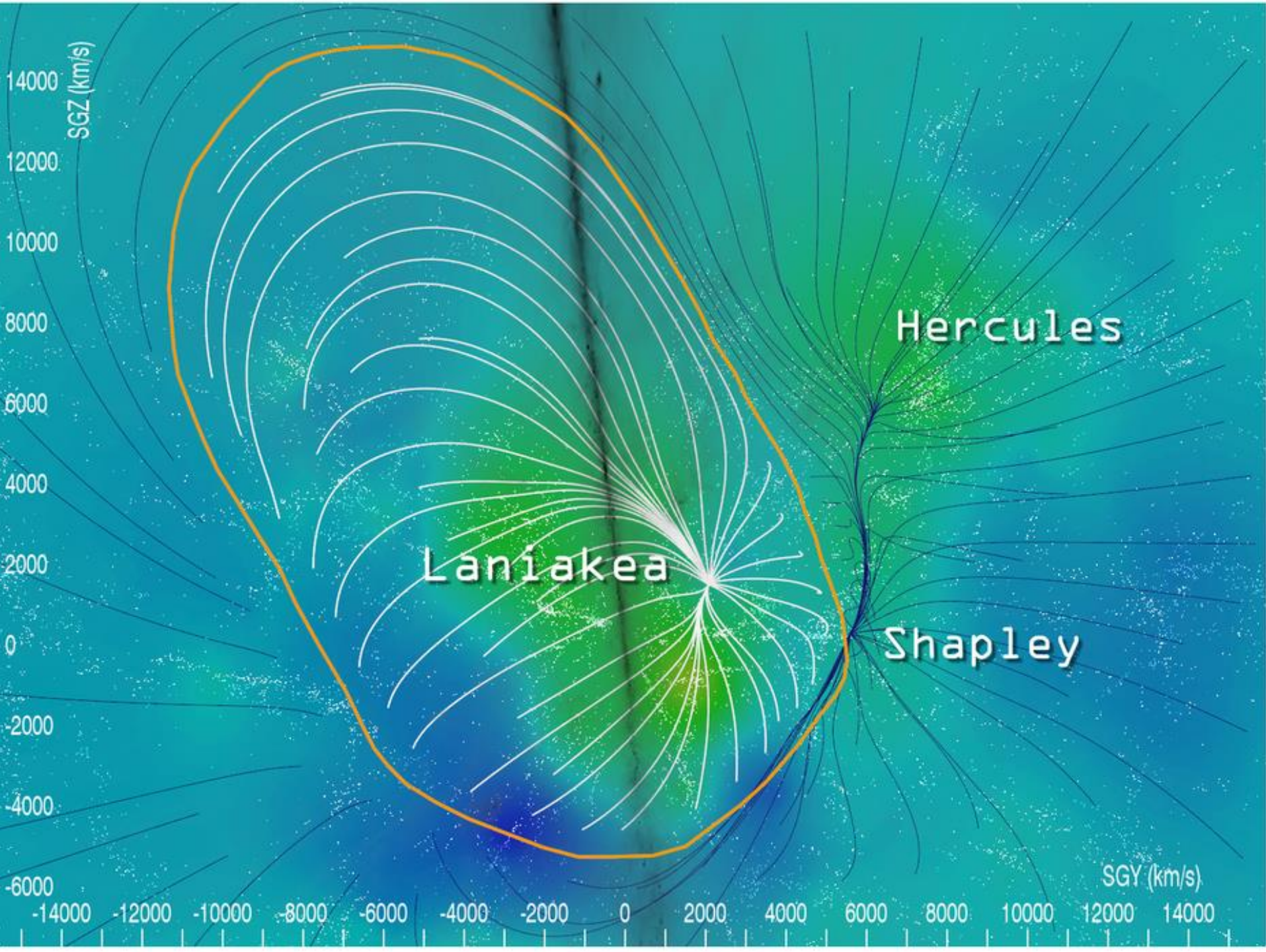


Nous sommes au bord d'un superamas

Contient les super-amas de la Vierge, de Hydre-Centaure, Paon-Indien
Structure en train de se diluer (160Mpc, $10^{17}M_{\odot}$)



Tully et al 2014



Définition des bassins d'attraction (film)

In Hawaiian, Lani — sky, heaven

akea — broad, wide, spacious, immeasurable

Laniakea Supercluster

R. Brent Tully, University of Hawaii, USA

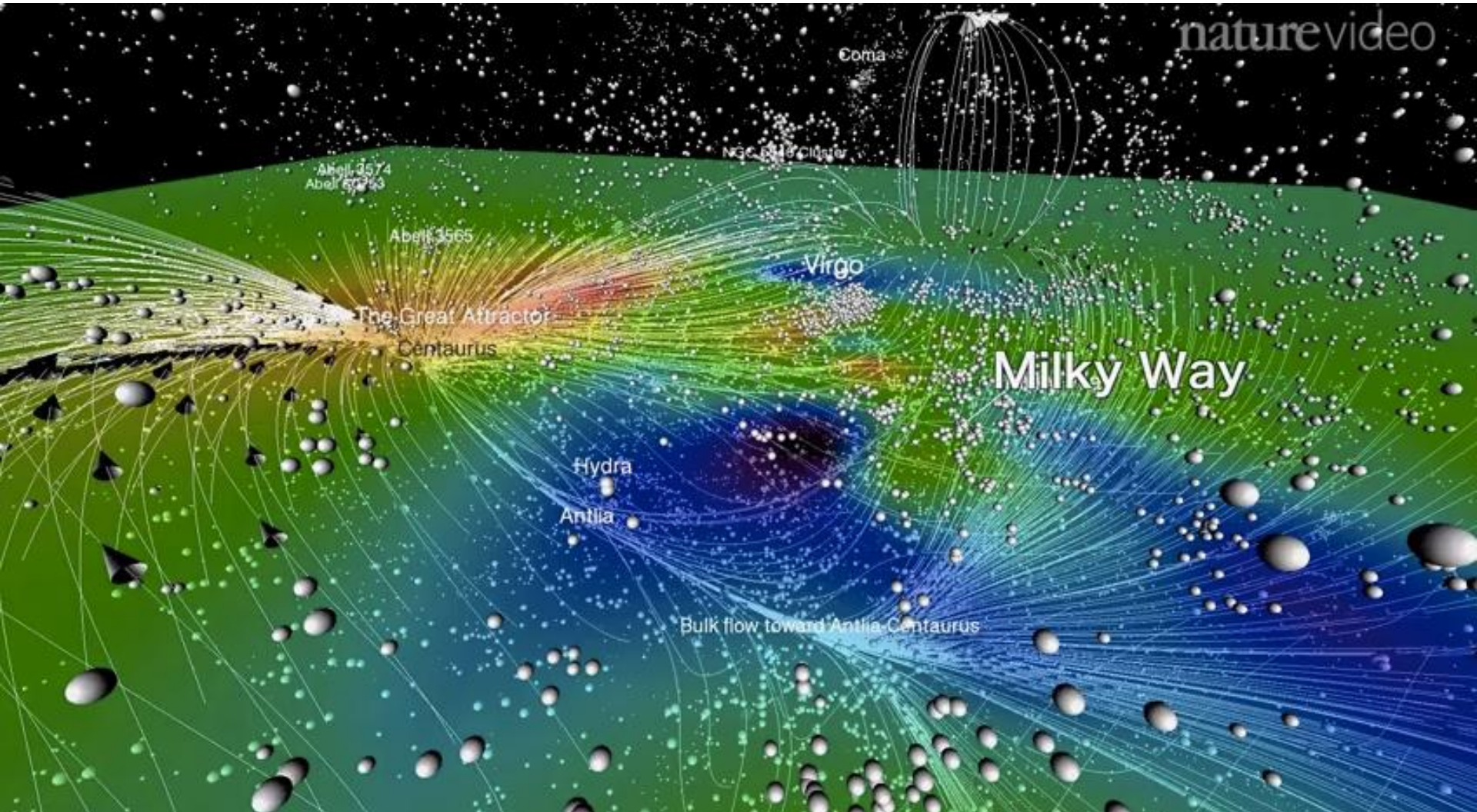
Hélène Courtois, University of Lyon 1, France

Yehuda Hoffman, Racah Institute of Physics, Hebrew University, Israel

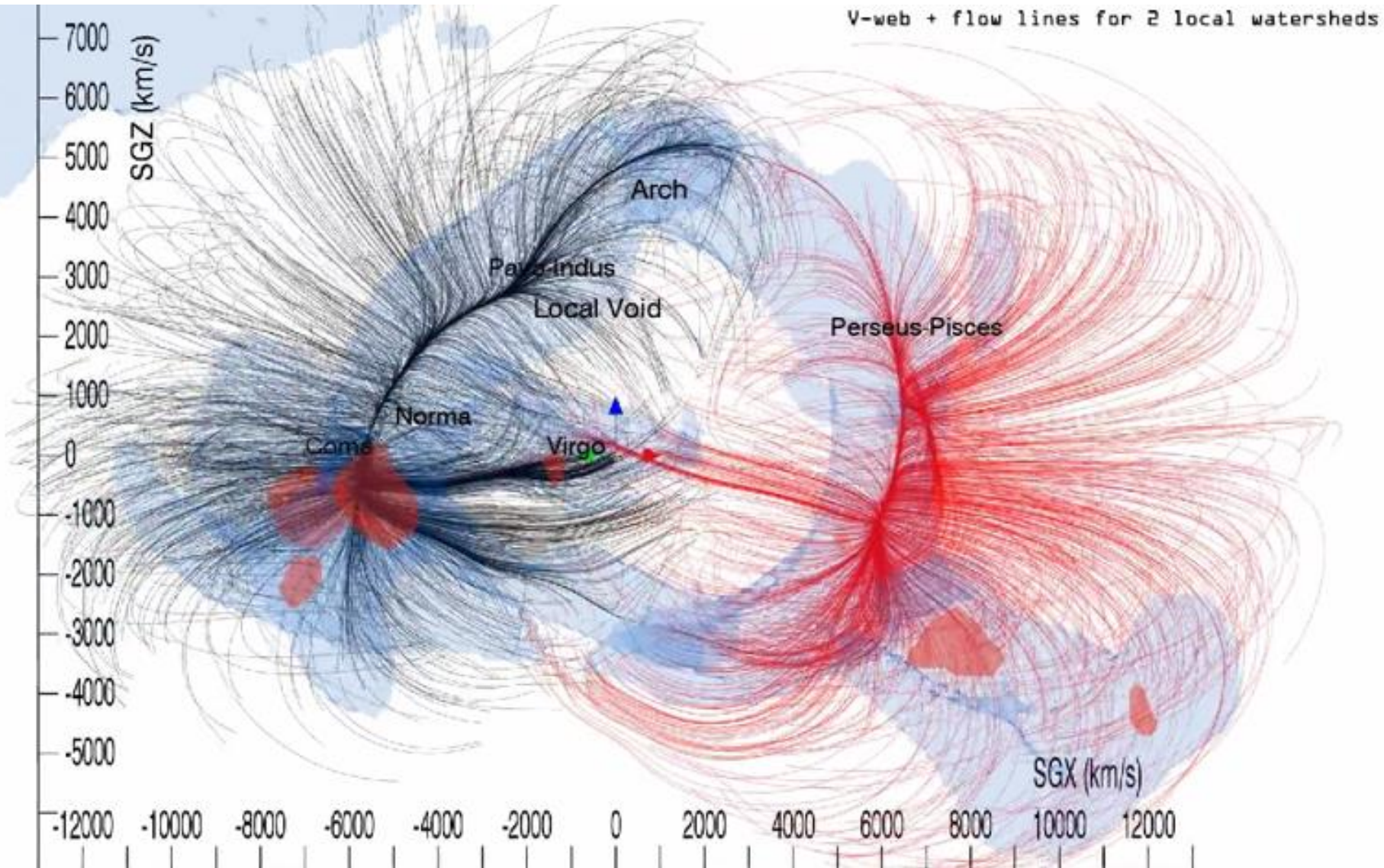
Daniel Pomarède, Institute of Research into the Fundamental Laws of the Universe, Saclay, France

Flots cosmiques

Echantillon de 8000 galaxies, dont on connaît la distance, et les vitesses
Distances par Céphéïdes, SN-Ia, Tully-Fisher, brillance de surface, etc.
→ Dédution des vitesses particulières

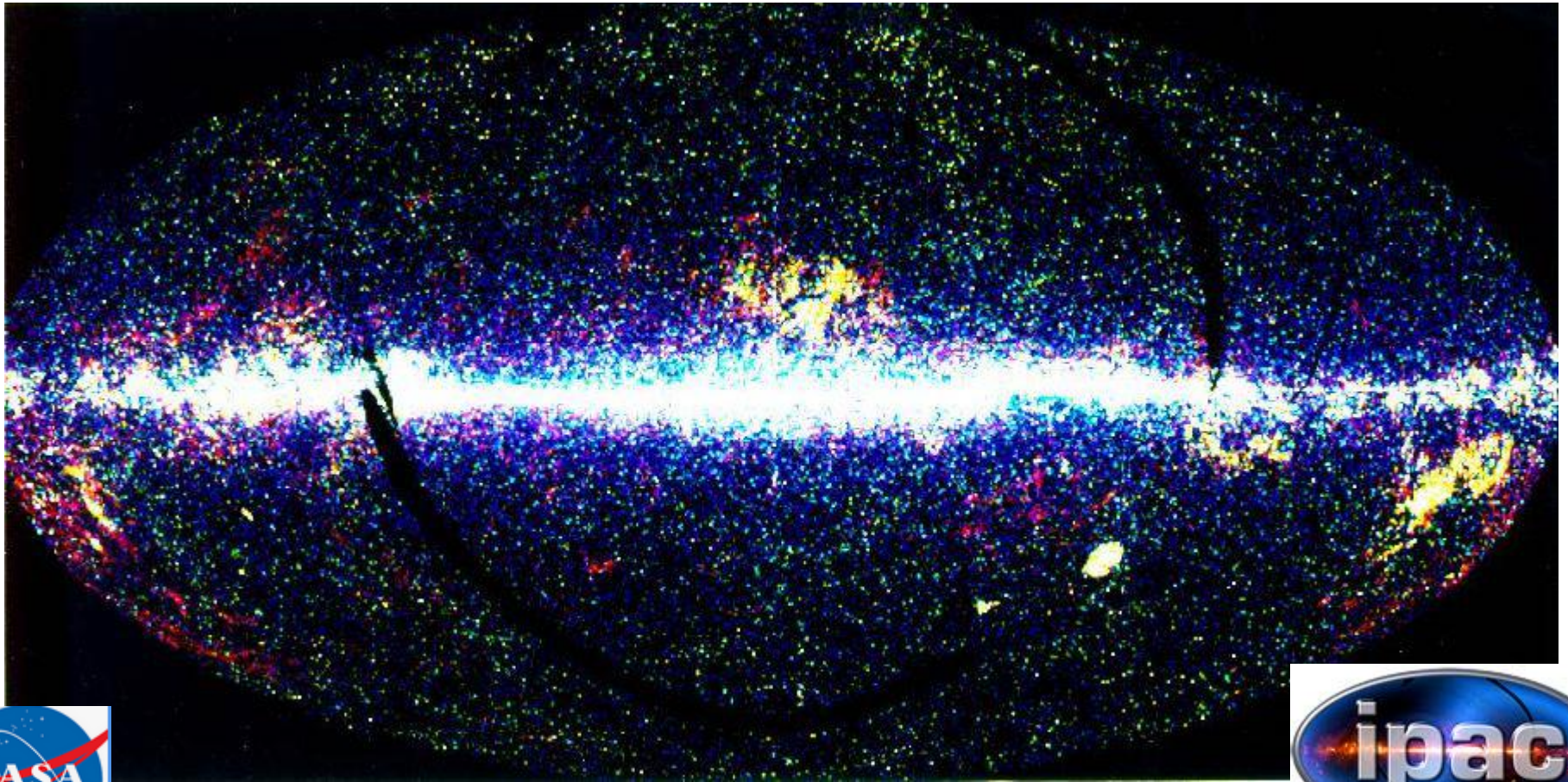


Laniakea, un super-amas, au-delà du super-amas local (La Vierge, mais pas Coma)



Tout le ciel en infrarouge

IRAS, télescope spatial de 60cm, 12, 25, 60 et 100 μ m (1983)
350 000 sources extragalactiques -- Starbursts!



z par identification

Aujourd'hui WISE plus profond



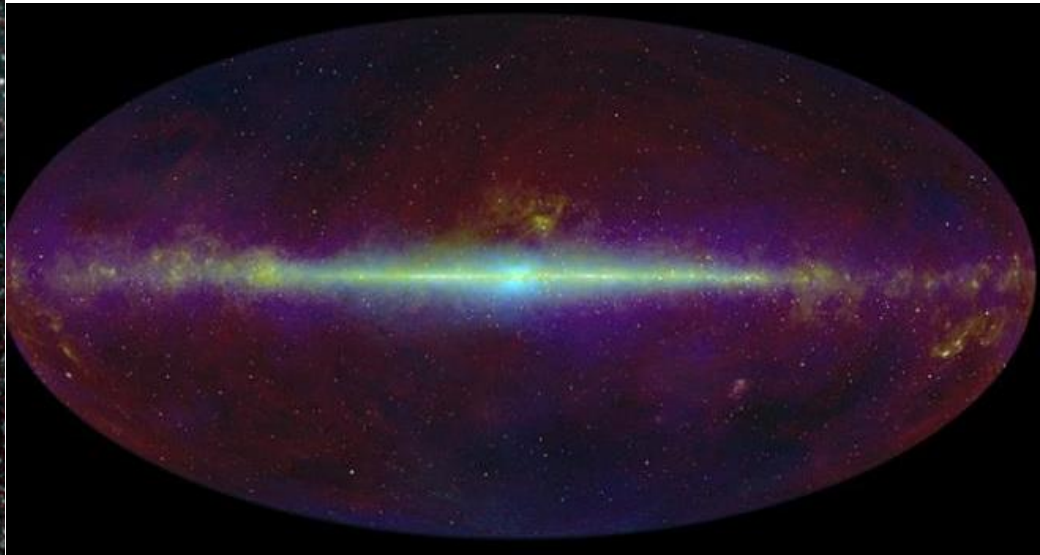
“Wide-field Infrared Survey Explorer”, WISE

2010-11 -- telescope de 40cm

3.5 – 23 μm

750 millions sources, dont 100 millions de galaxies
et ~3 million quasars

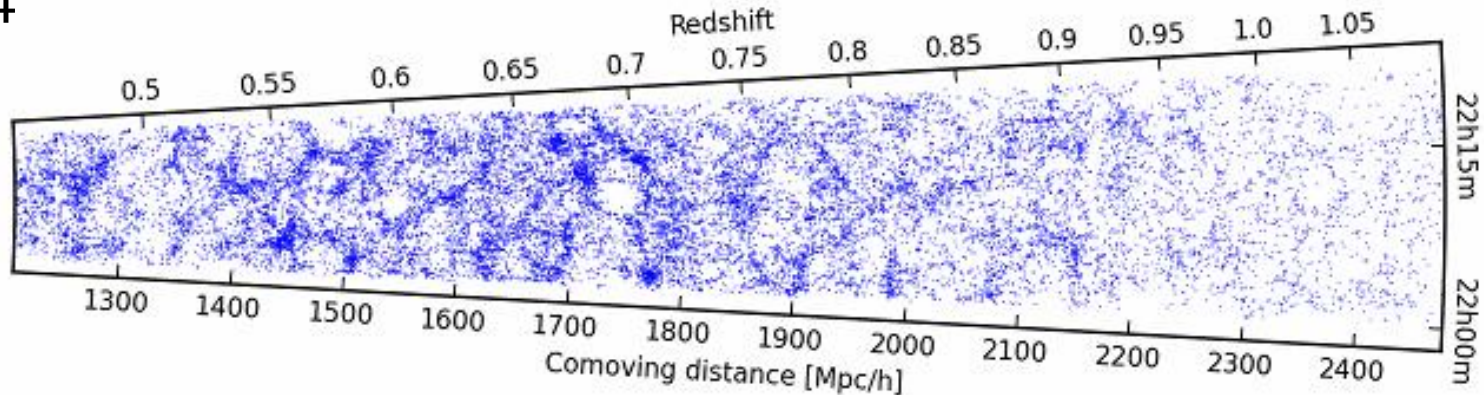
Faible resolution ($>5''$) rend difficile l'identification
Techniques d'apprentissage profond!



Toile Cosmique à grand z: VIPERS

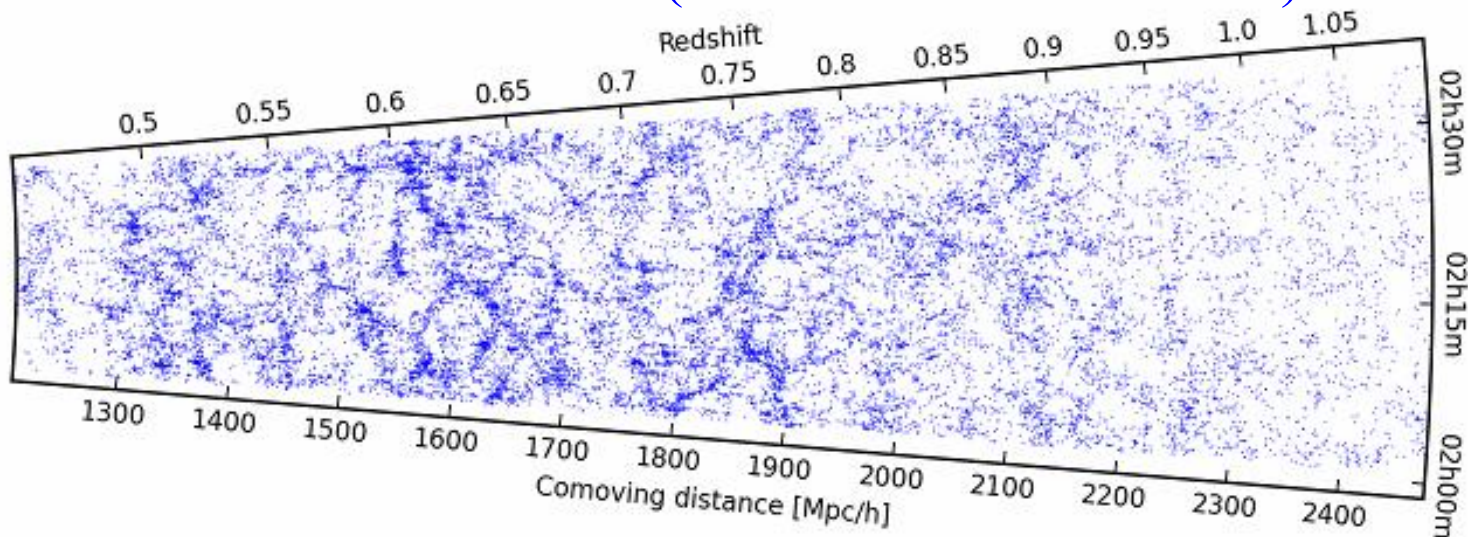
VIMOS au VLT: 90 000 redshifts (24°)

Champ 4



Tranches d'univers à $0.5 < z < 1.2$ (1^{ère} moitié de l'Univers)

Champ 1



Toile Cosmique à grand z: VIPERS

Field W1



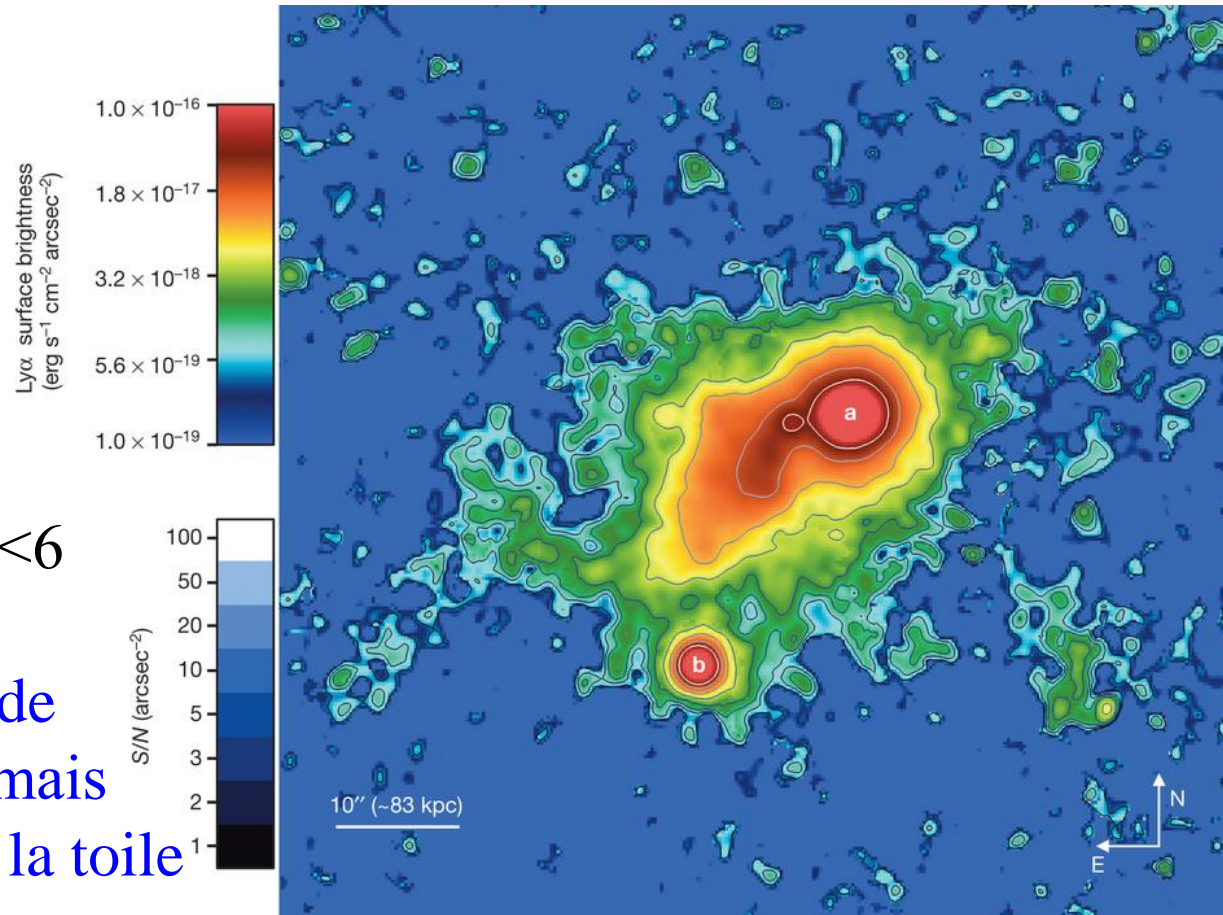
Field W4

Toile Cosmique à grand z avec Ly α

La raie Ly α est facile à détecter dans le milieu inter-galactique ionisé

L'hydrogène atomique absorberait la raie, mais l'univers est réionisé à $z < 6$

Ici fluorescence à partir de l'émission d'un quasar, mais extension ~ 500 kpc dans la toile cosmique



Filaments de gaz plus froid?

Emission de l'hydrogène : raie de recombinaison Ly α
(Cantalupo et al. 2014)

Champ profond HUDF avec MUSE

270 halos Ly α entourant les galaxies à $3 < z < 6$



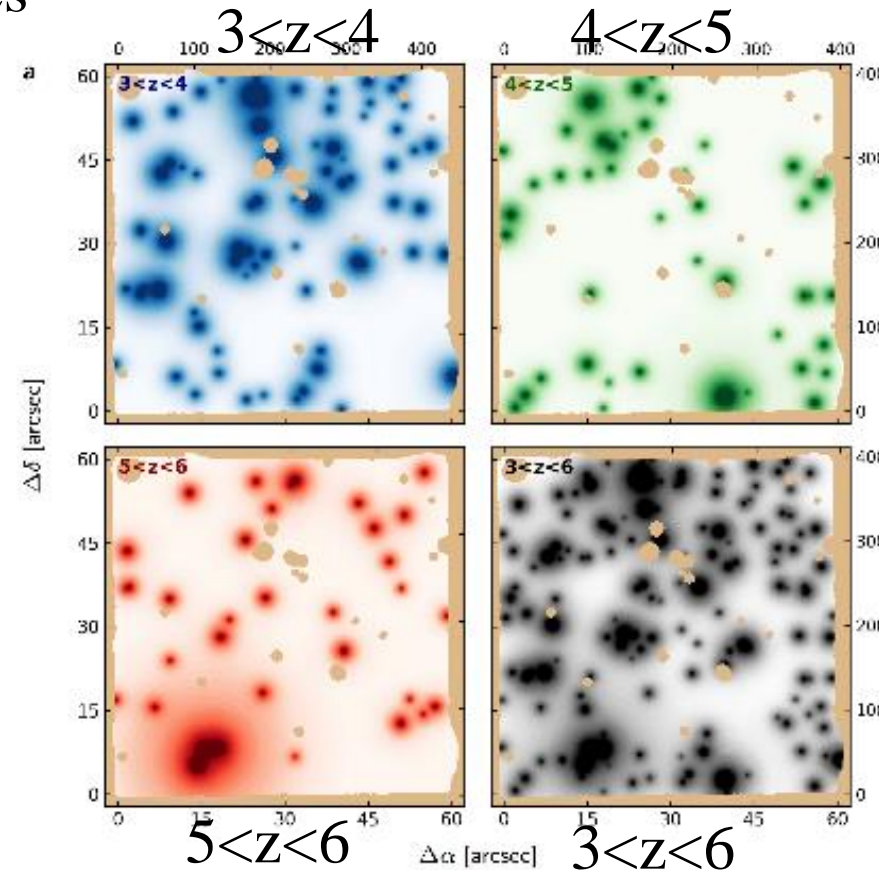
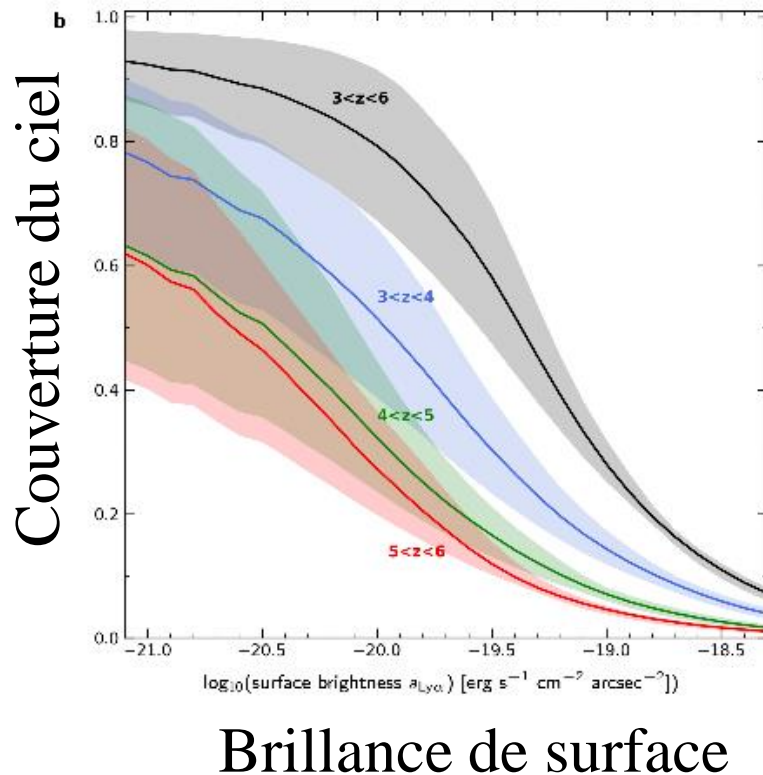
Wisotzki et al 2018

Halos Ly α

Wisotzki et al 2018

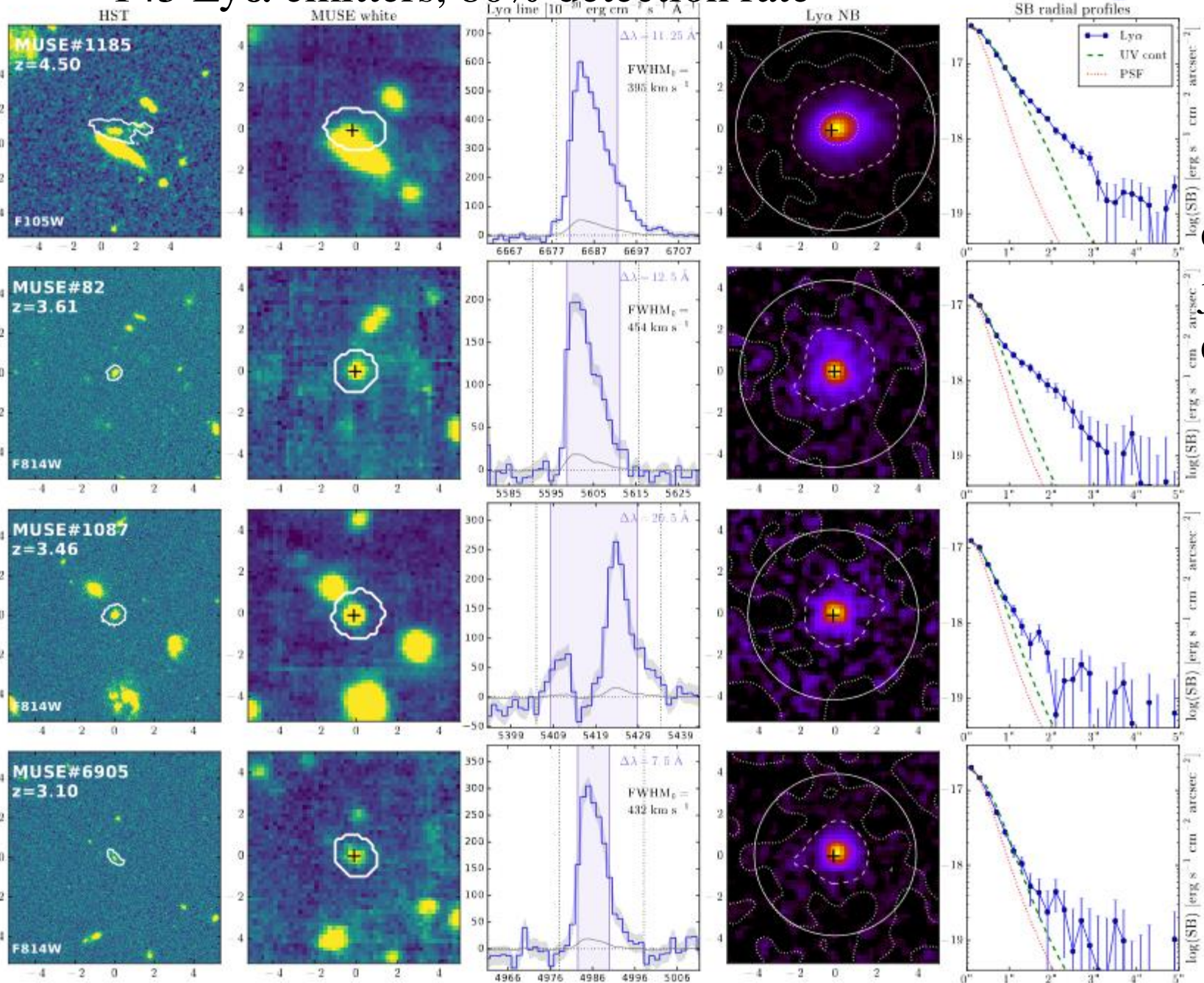
Au-dessus de $N_{\text{HI}} = 10^{18} \text{cm}^{-2}$, l'hydrogène atomique s'auto-protège contre l'ionisation

En absorption, on détecte des raies saturées, ou juste sous-saturées avec $N_{\text{HI}} = 10^{19} \text{cm}^{-2}$, l'hydrogène forme donc des réservoirs de gaz atomique, pouvant alimenter les galaxies



145 Ly α emitters, 80% detection rate

Leclercq et al 2017

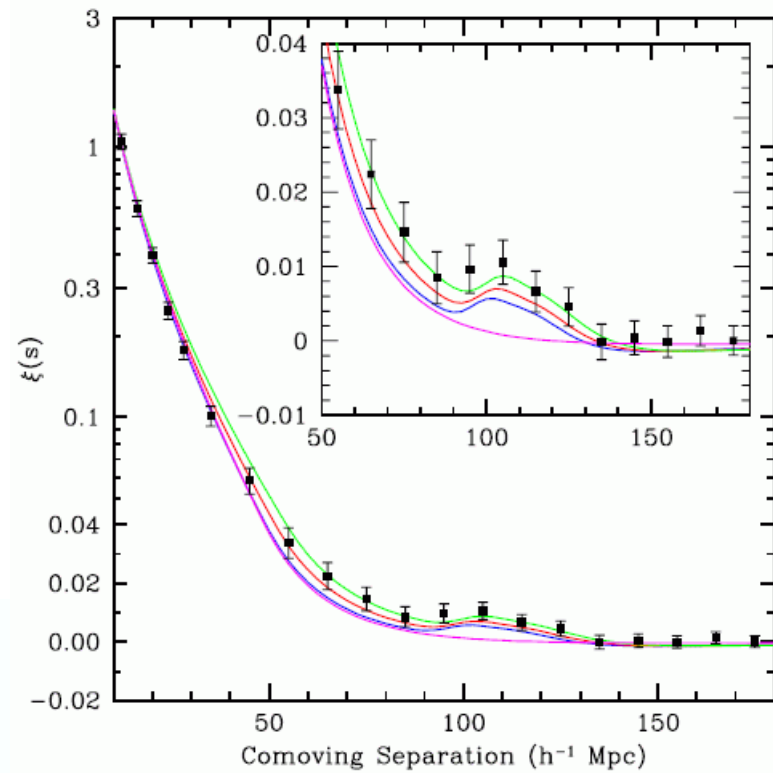
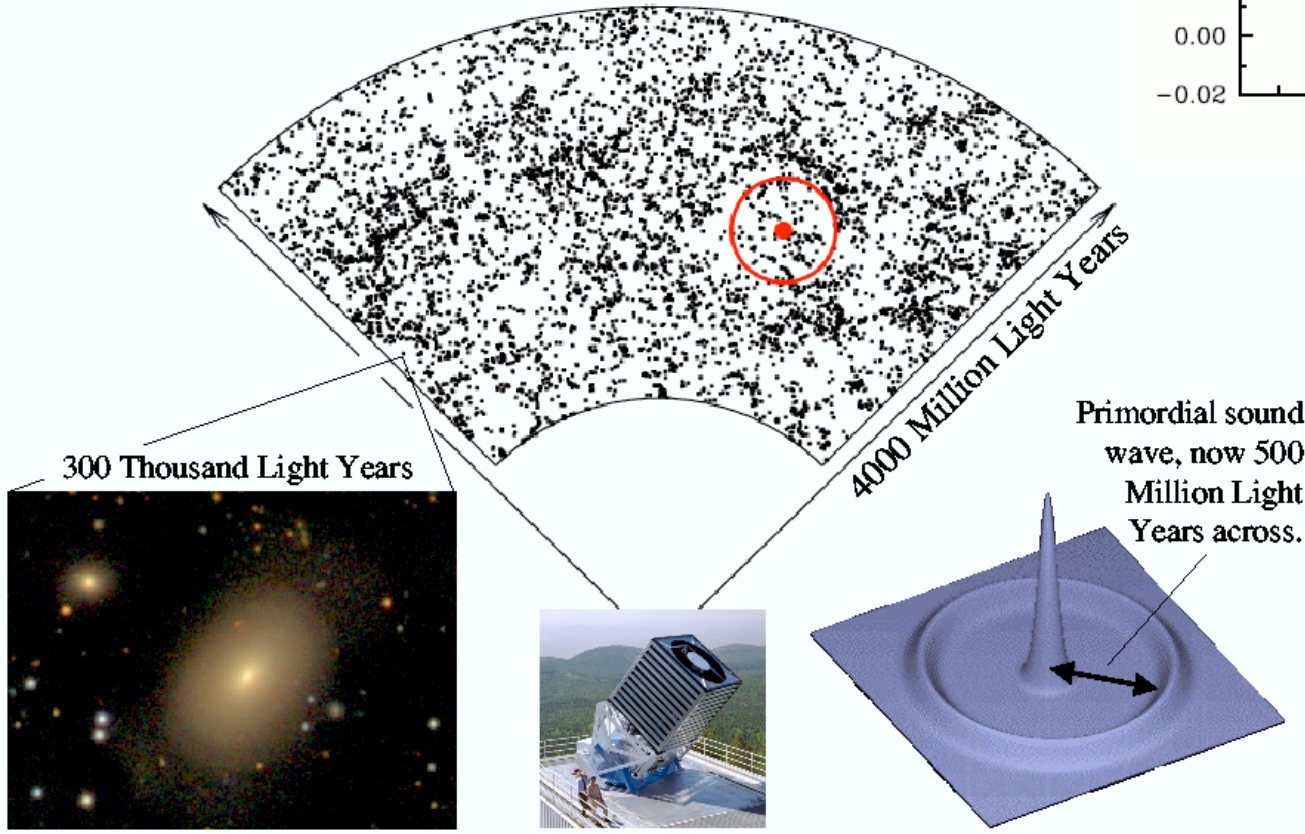


18kpc
diffusion
jeunes
étoiles

Pic acoustique baryonique

BAO: Ondes détectées aujourd'hui dans la distribution des baryons

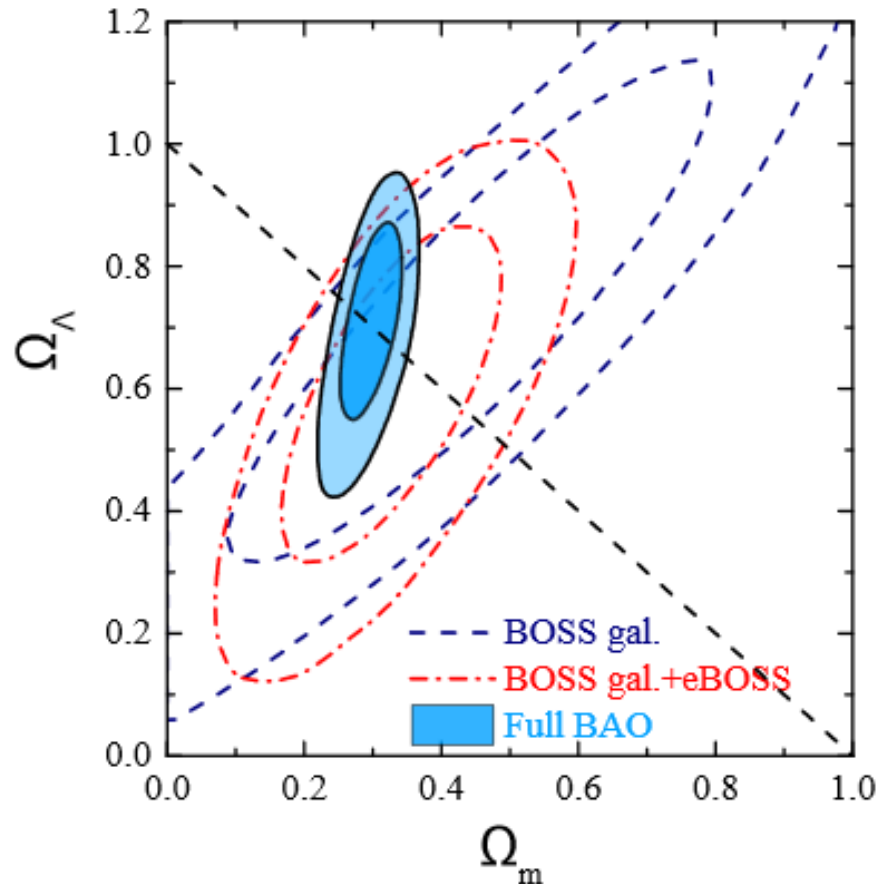
50 000 galaxies SDSS



Eisenstein et al 2005

BAO $z=0.8-2.2$ des quasars e-BOSS

(dernière release DR14 SDSS-IV)



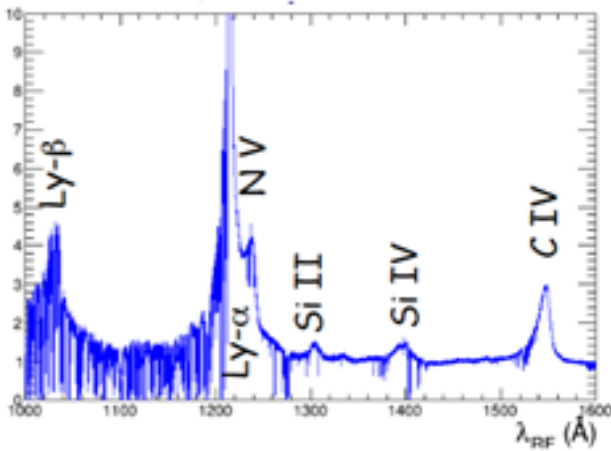
147 000 quasars
sur $2040^\circ 2$

Compatible avec Λ CDM
 $\Omega_m = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7$

Les QSO sont de bons
Traceurs!

Ata et al 2017

Survey en absorption Ly α

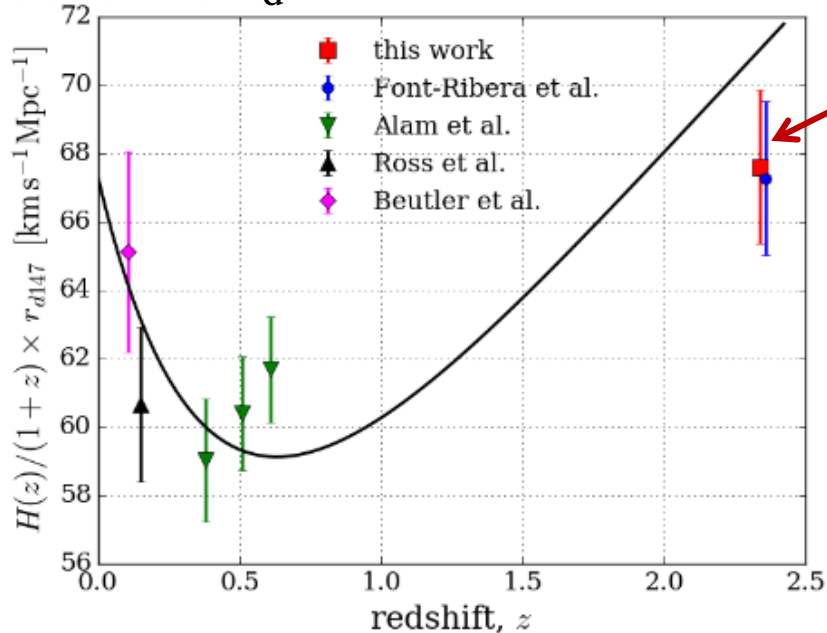


Absorption de la raie Ly α $z=2.3$

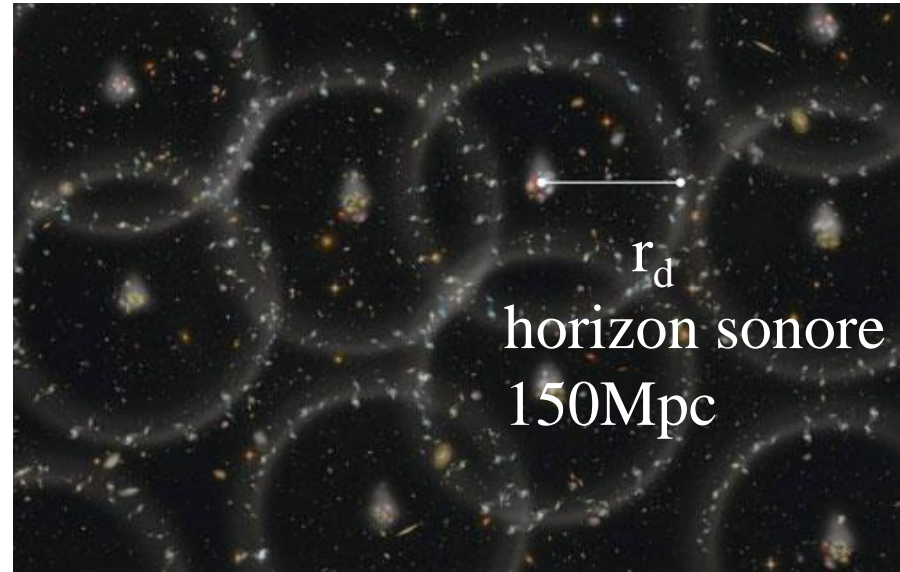
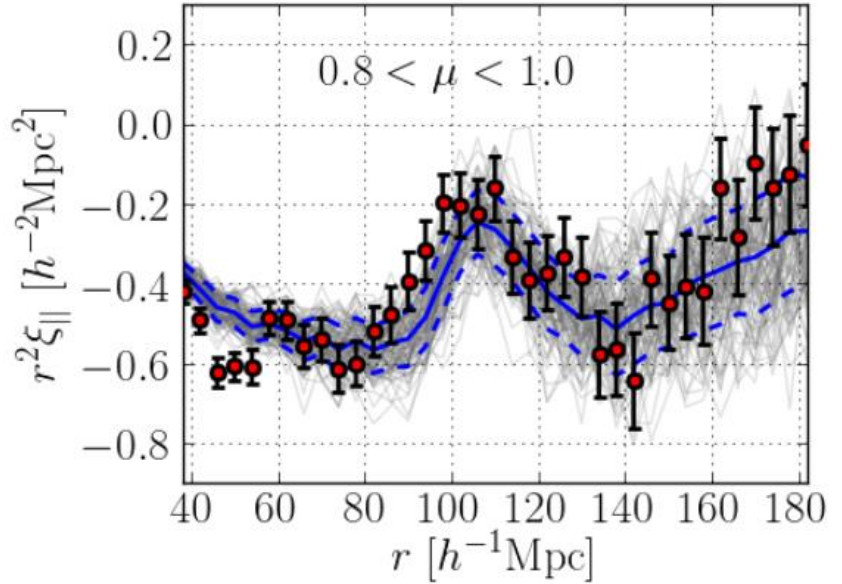
Delubac et al 2014

Points rouges versus QSO simul (gris)

$H(z)/(1+z) r_d$

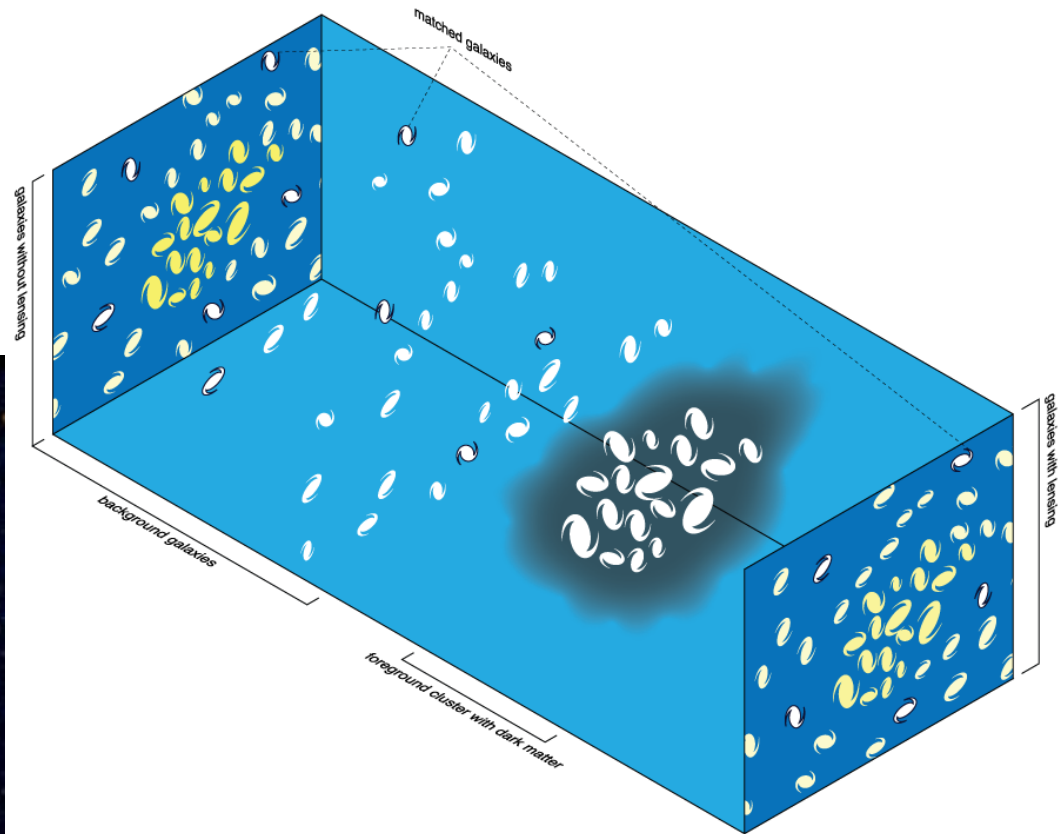


Bautista et al 2017



Cisaillement gravitationnel

Les futurs surveys seront assez précis pour distinguer la déformation due à chaque époque, par la masse distribuée à chaque redshift



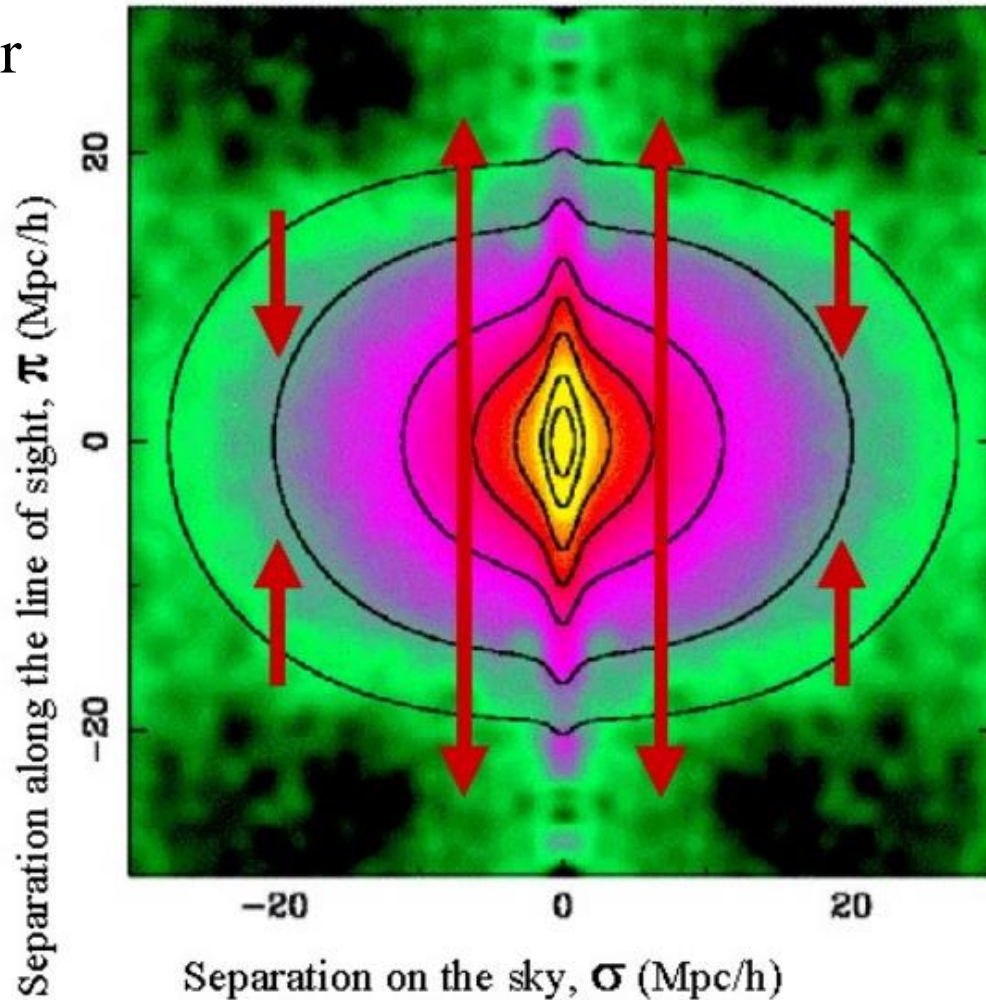
RSD « Redshift space distortions »

Distortions dues aux vitesses particulières sur la ligne de visée (doigts de Dieu!)

Effet Kaiser dans les amas: accréation systématique

Non aléatoire; permet de déterminer

$\beta = \Omega_m^{0.6}/b$
biais $\delta_{\text{galaxies}} = b (\delta_{\text{mass}})$
et σ_{gal}

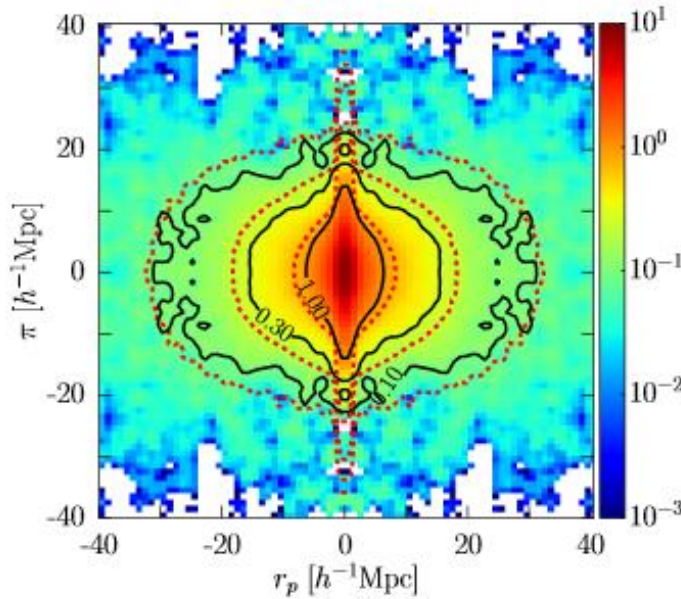
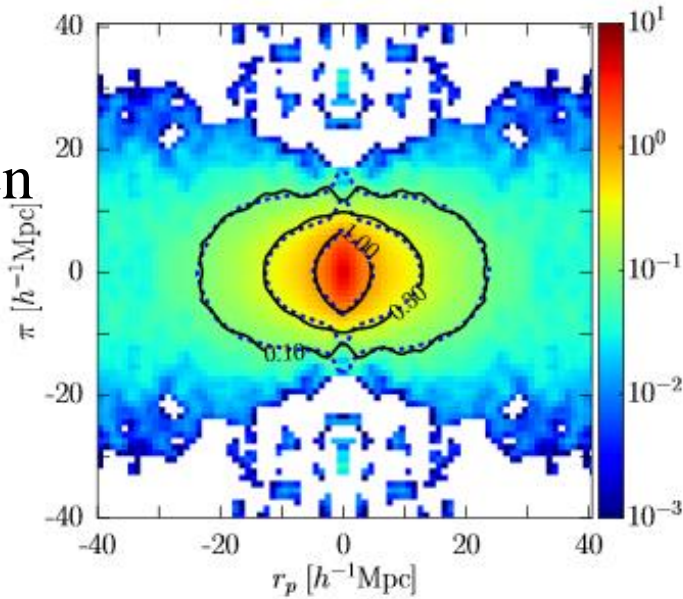


The 2dF Galaxy Redshift Survey Team (2001)

VIPERS Blue galaxies

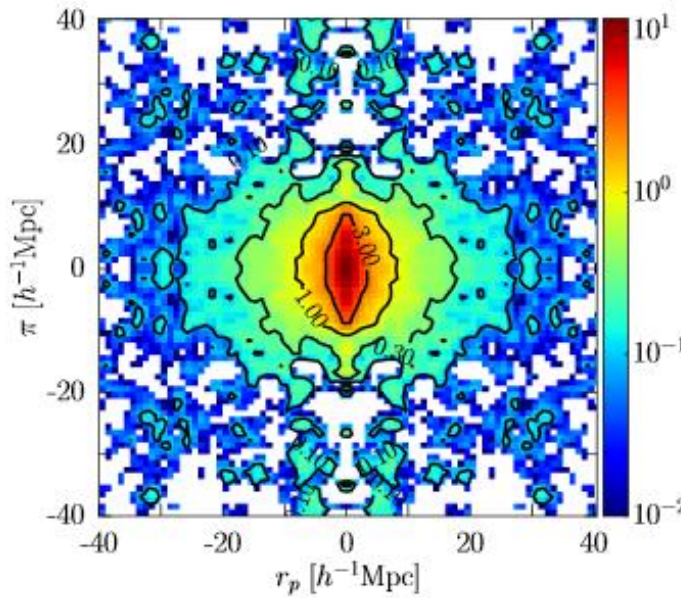
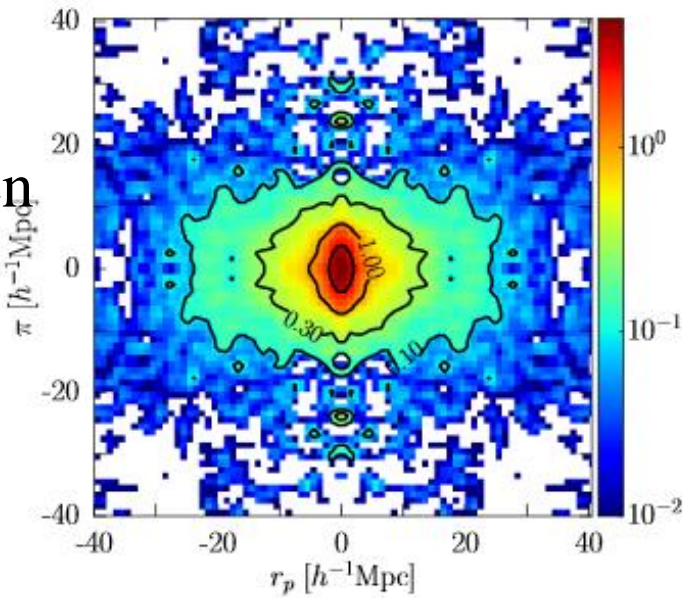
Red galaxies

Limité en flux



+ allongé en rouge
--- simul

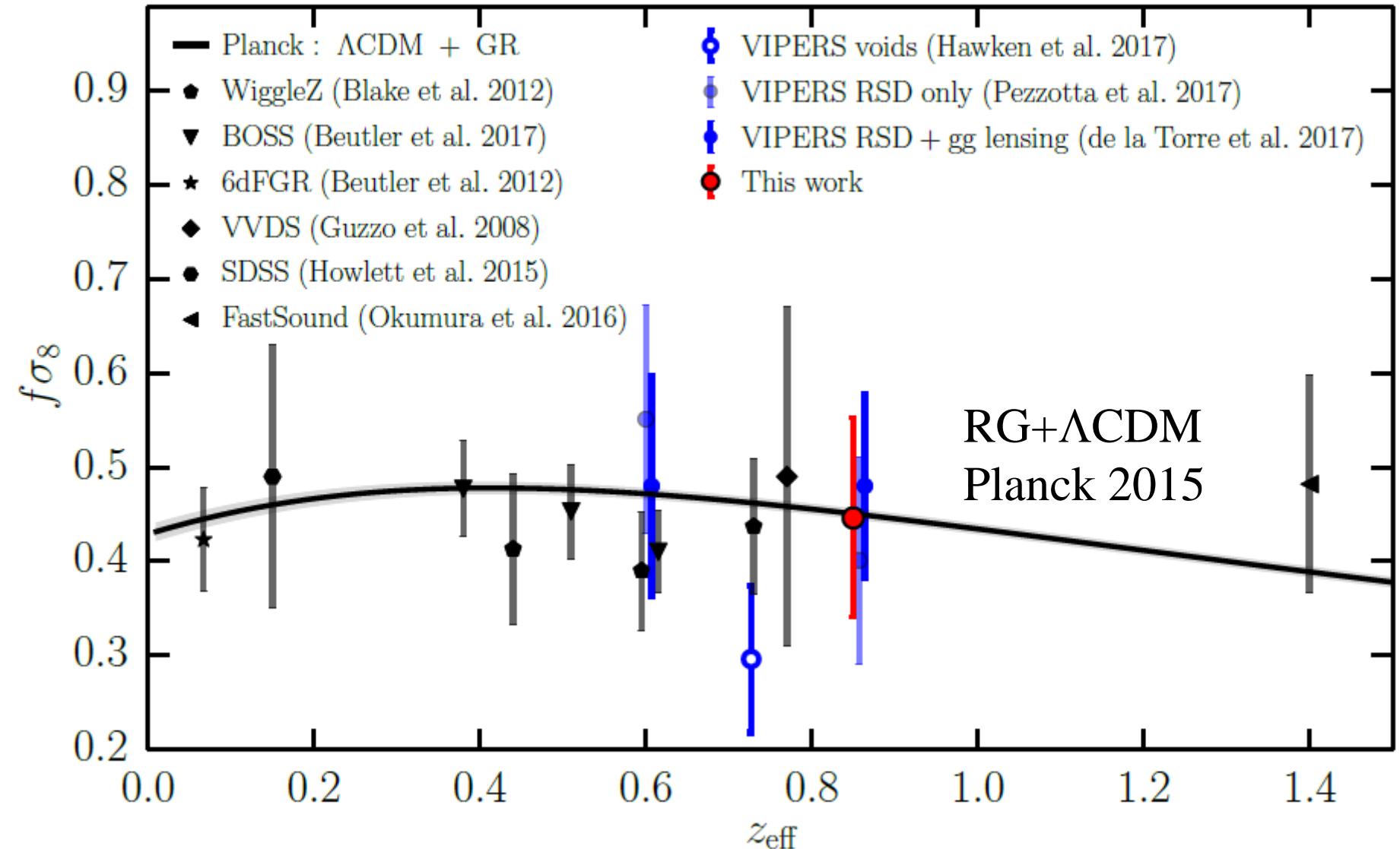
Limité en volume



Test de gravité modifiée

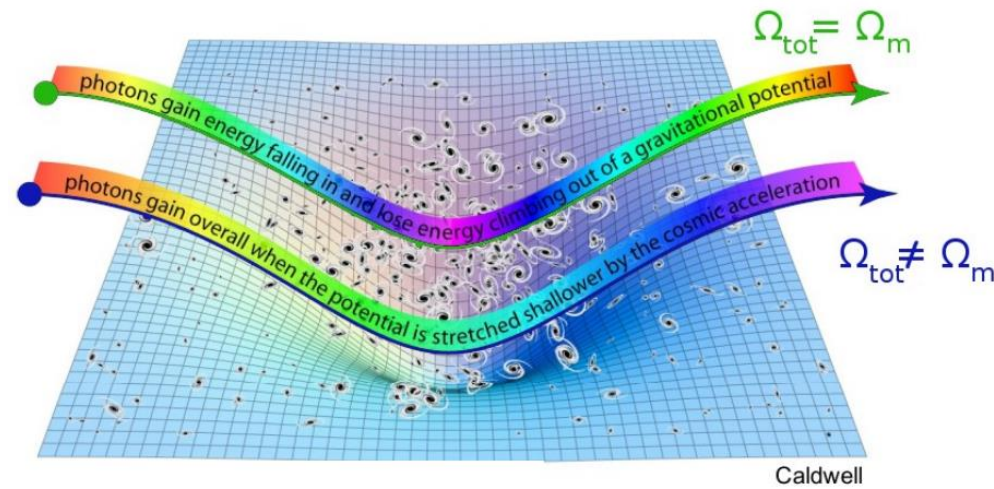
Mohammad et al 2018

Taux de croissance linéaire des structures $f(z) \times \sigma_8$



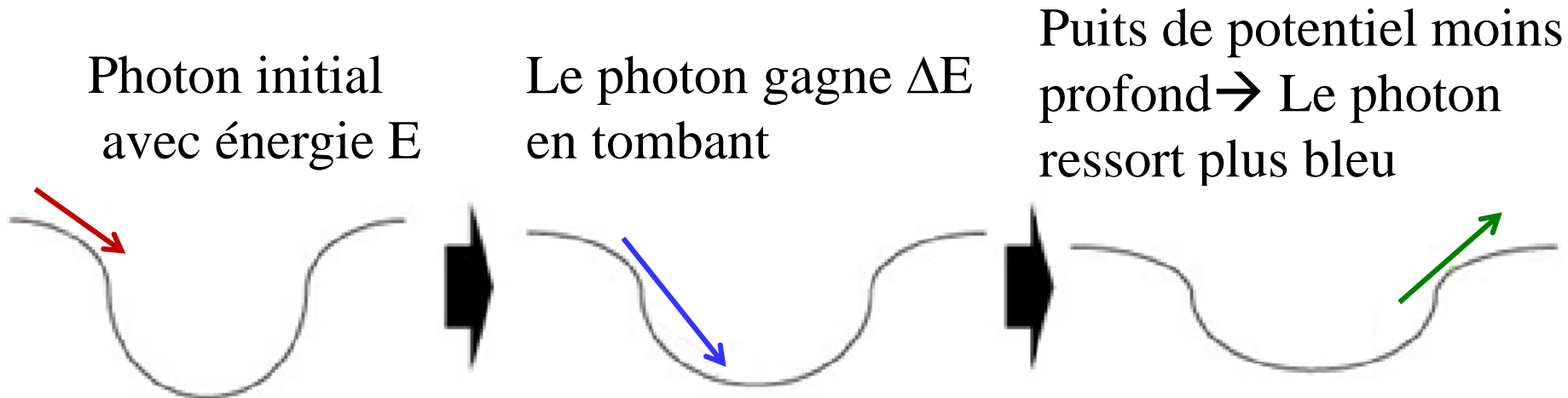
Effet ISW

« Integrated Sachs-Wolfe »



En présence de Λ (énergie noire) les super-amas et vides voient leur contraste de densité diminuer

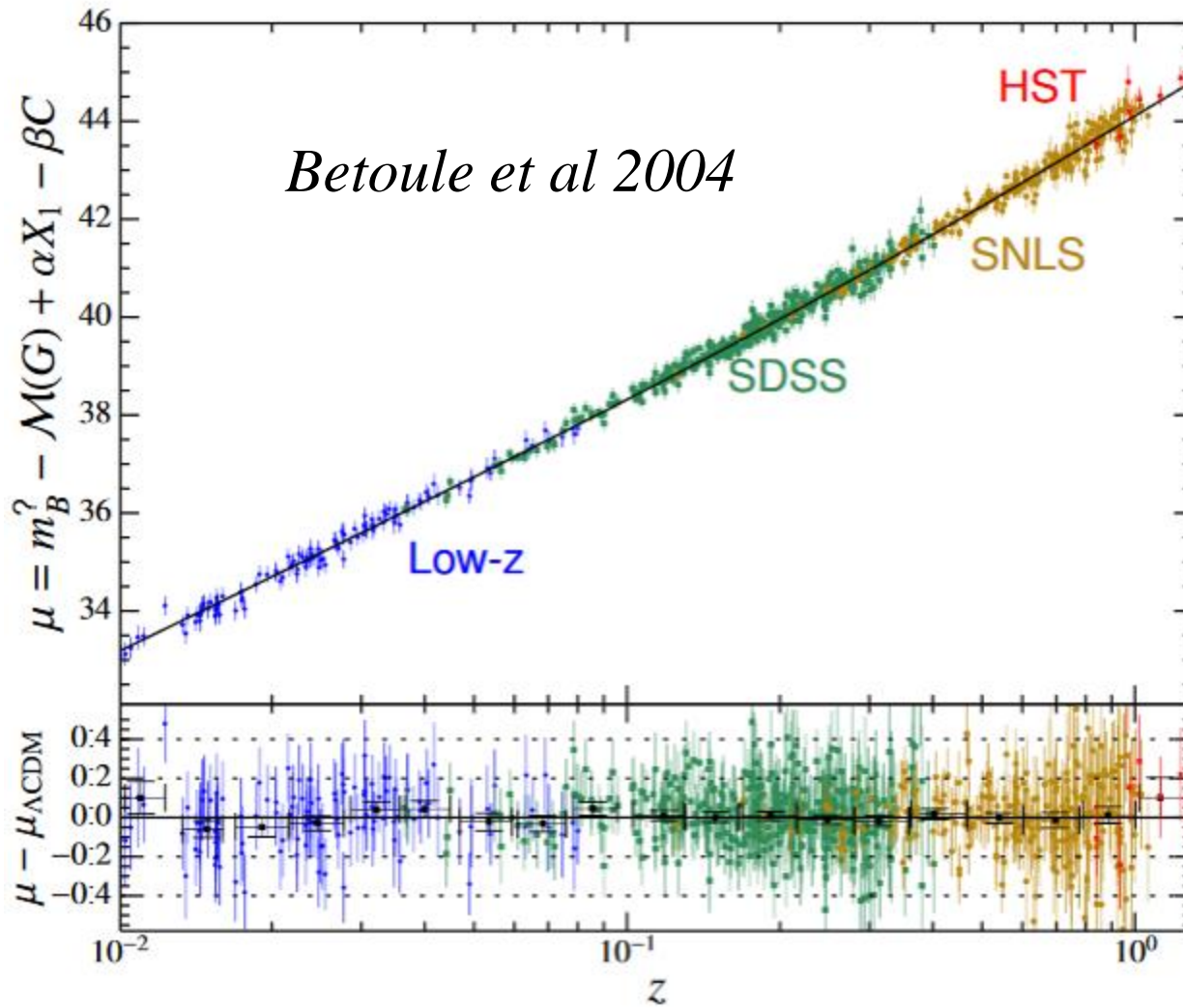
→ Les photons micro-onde sortent plus bleus (plus énergiques) des super-amas (et le contraire des vides)



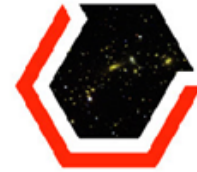
Le puits de potentiel du superamas devient moins profond avec Λ

Corrélation croisée entre les divers surveys

Aussi les SN-Ia, contraignent la nature de l'énergie noire (distance versus z , pour $H=70\text{km/s/Mpc}$) $\rightarrow w = -1 \pm 0.06$



Et dans le futur



DARK ENERGY
SURVEY

KiDS

Proche, quelques surveys en cours:

- Dark Energy Survey (**DES**): z-photométrie optique 5000 °²
- Kilo-Degree Survey (**KiDS**): optique et proche IR (VIKING)
z-photometrie sur 1500 °² (ESO)
- Vista Hemisphere Survey (**VHS**): proche infrarouge
sur la moitié du ciel (ESO)



Terabytes de données



Plus lointain:

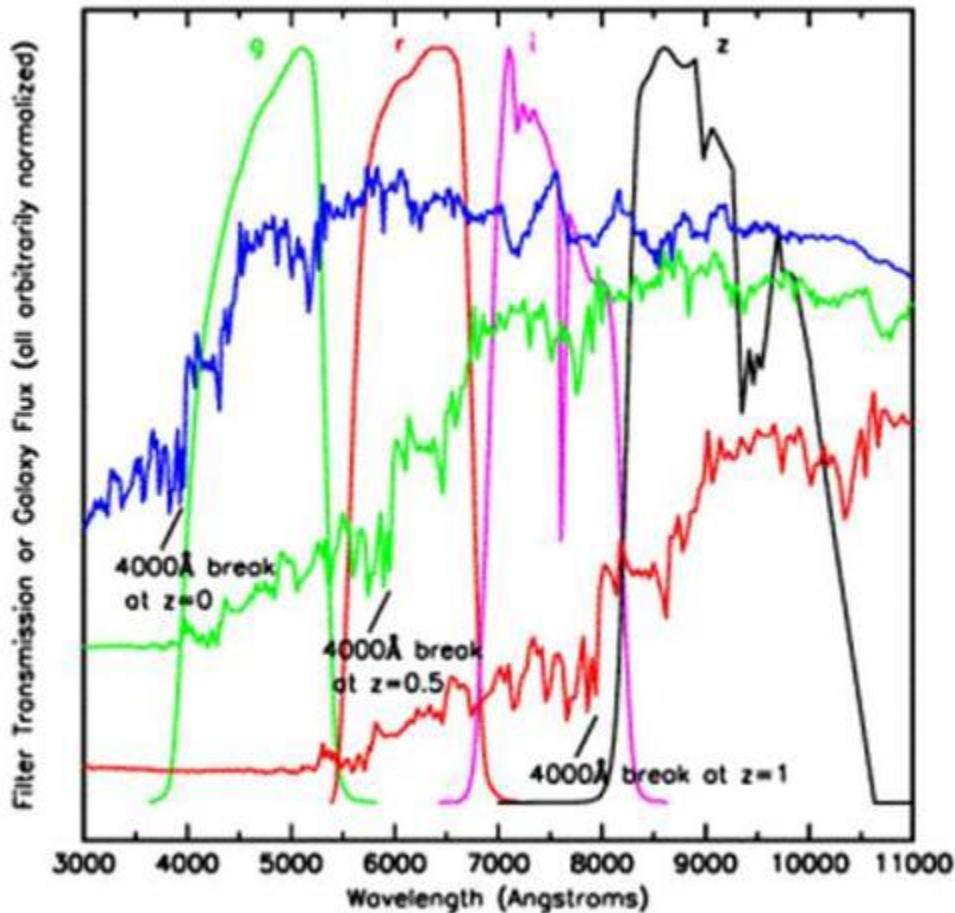
- **Euclid** – ESA spectro et z-phot ~1/3 du ciel- 12 milliards de galaxies
- **Large Synoptic Survey Telescope (LSST)** – z-phot ~40 milliards
- Square Kilometer Array (SKA)** – **Australie & Afrique du Sud**
Milliards de galaxies continuum & 21 cm

Petabytes de données



Redshifts photométriques

De plus en plus de surveys seront photométriques, avec 5 couleurs
Ou plus

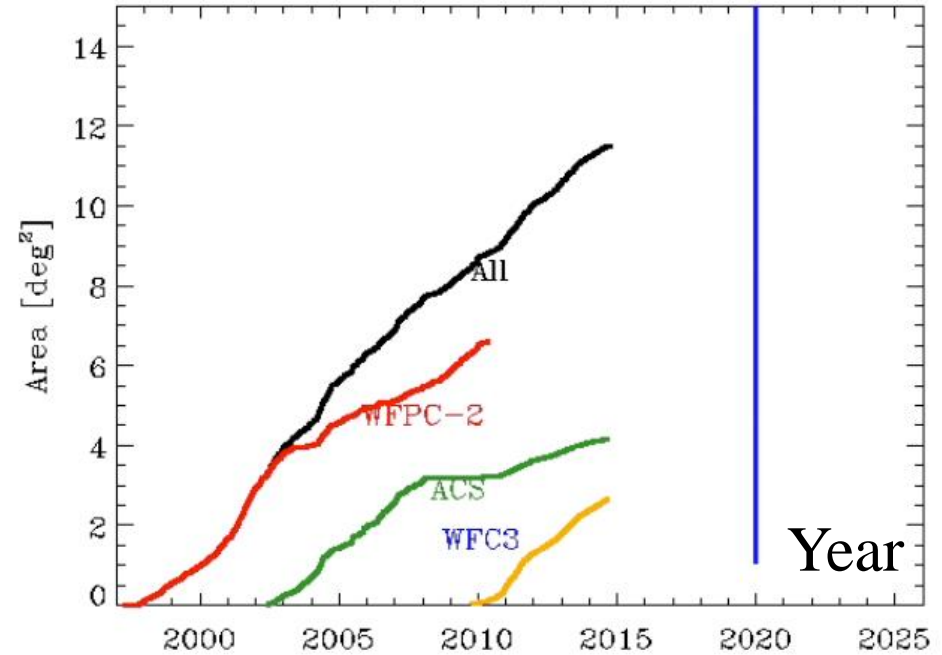
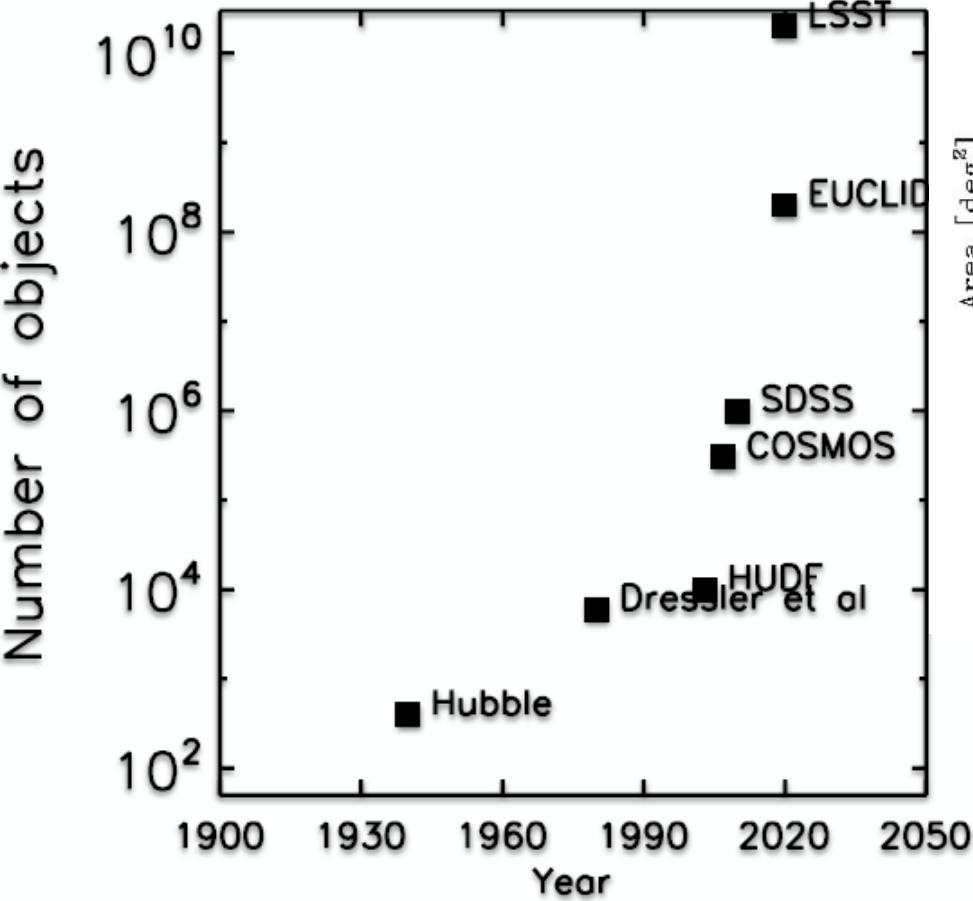


Jusqu'à présent le traitement
faisait appel à une modélisation
des SED (distribution spectrale)

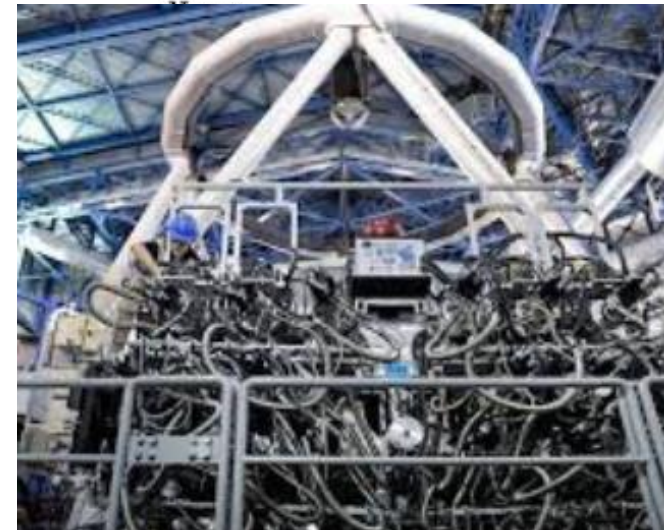
Aujourd'hui, les réseaux de
Neurones et l'apprentissage
Profond font mieux et plus vite!

Accroissement exponentiel des données

Area of surveys



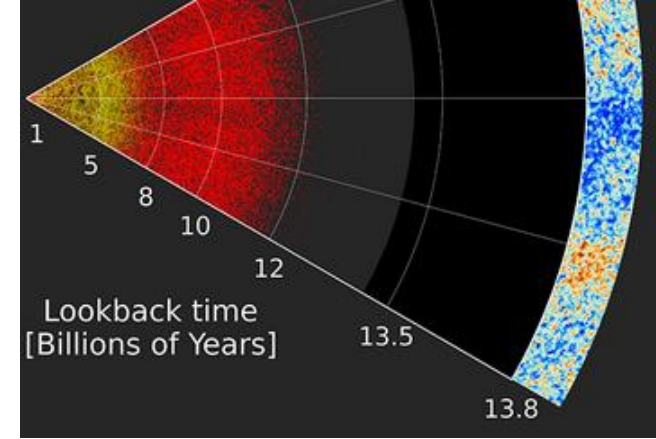
+ IFUS
MUSE



Brinkman, Huertas-Company

Résumé

- La cartographie de l'Univers progresse de façon **exponentielle** (imagerie, spectro, ..)



- Depuis ~2000, des millions de redshifts, jusqu'à un milliard de sources
- Compromis entre une cartographie très vaste, mais peu profonde, ou bien très profond (HUDF), peu étendu comme un cône de lumière
- Premiers résultats (BAO, SN-Ia, cisaillement, etc.) compatibles avec Λ CDM, à ~10% près. Mais il faut **plus de données** pour améliorer les contraintes!