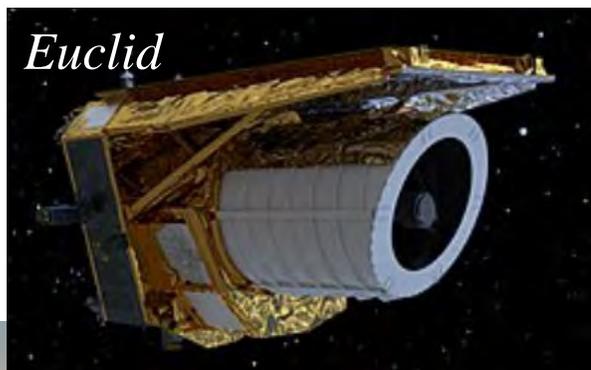




COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

Perspectives à dix ans



SKA



Rubin LSST



Françoise Combes



Observatoire
de Paris

| PSL 

Les principaux télescopes

→ Euclid, satellite ESA: lancé en 2023, **1.2m**

Principal but Energie noire Champ $0.5^{\circ 2}$

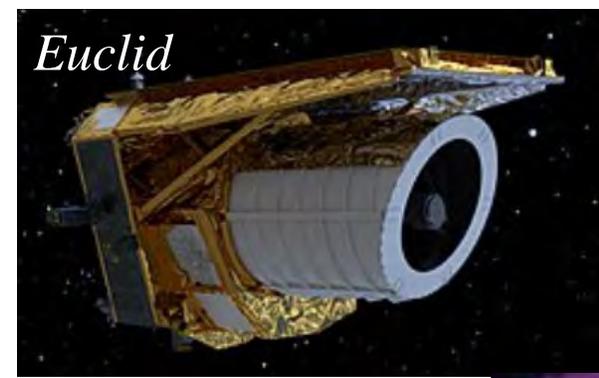
→ Nancy-Grace Roman (NASA): Energie noire et exoplanètes (~2027-32?) **2.4m**, VIS/NIR +Corono

Champ $0.3^{\circ 2}$

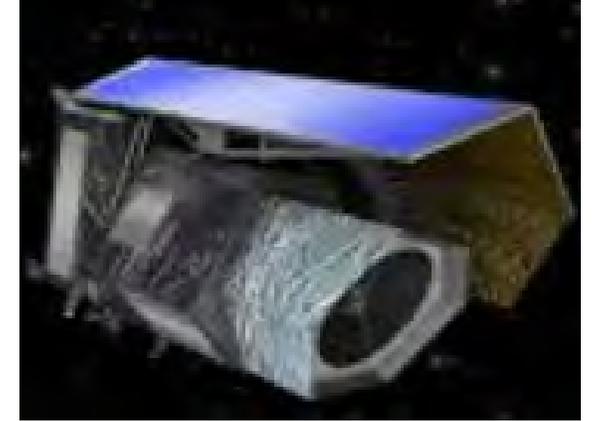
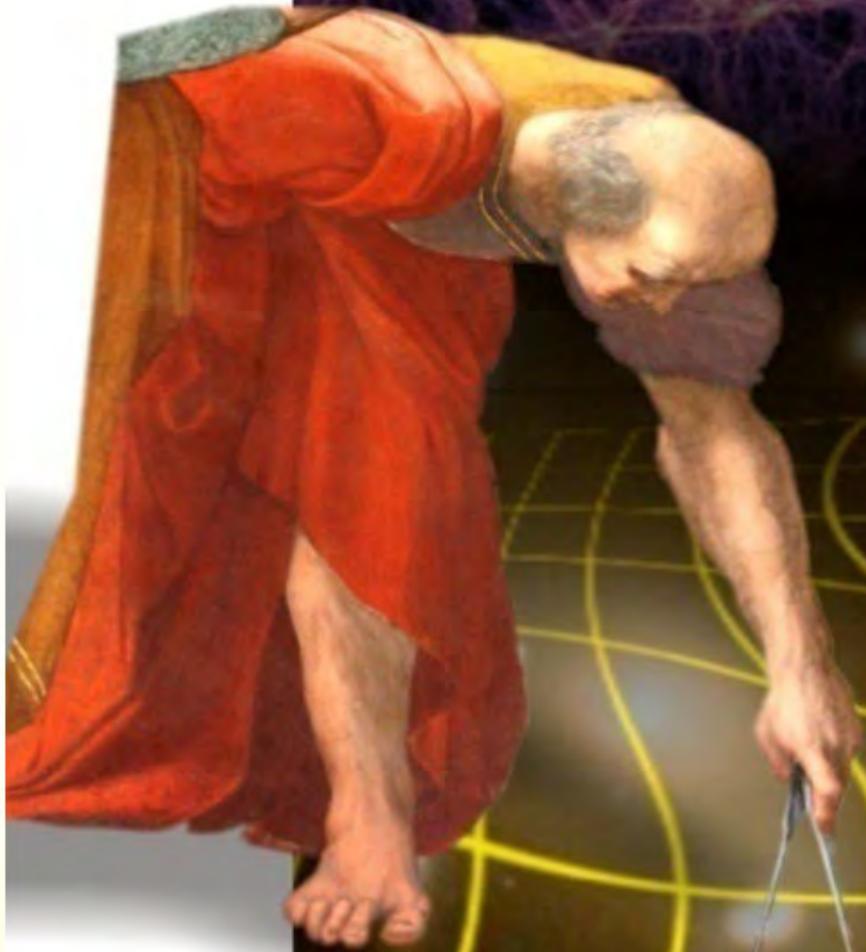
→ LSST, Vera Rubin: **8m** grand champ au Chili

Aspect temporel: Observer tout le ciel en 3 jours $\sim 10^{\circ 2}$

→ SKA: Square Kilometer Array: Réseau d'antennes, Australie ($\lambda=0.8-6\text{m}$), et Afrique du Sud ($\lambda=2-80\text{cm}$)



EUCLID et le secteur noir de l'Univers



Ecole d'Athènes
Raphael



Amas de Persée
VISP+NISP, 3 couleurs
8800x8800 pix

Lancement 1 Juillet 2023

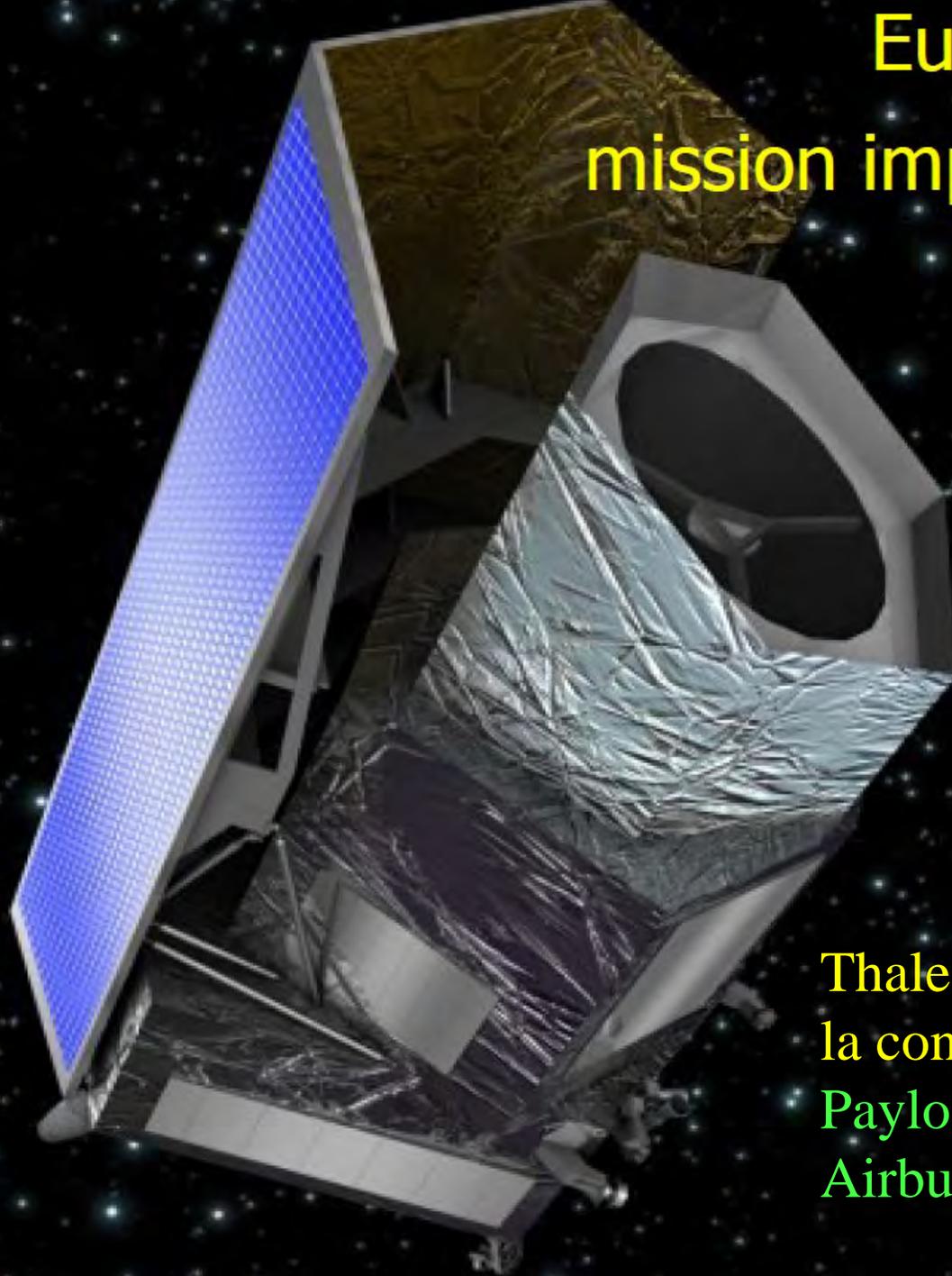


Galaxie IC342
VIS+NISP
8800x8800 pixels
3 couleurs

Galaxie invisible
en optique
Cachée par la Voie lactée



Euclid: mission implementation



Thales Alenia Space débute
la construction en 2013
Payload Module: Astrium
Airbus Defense and Space

Lancement réussi!

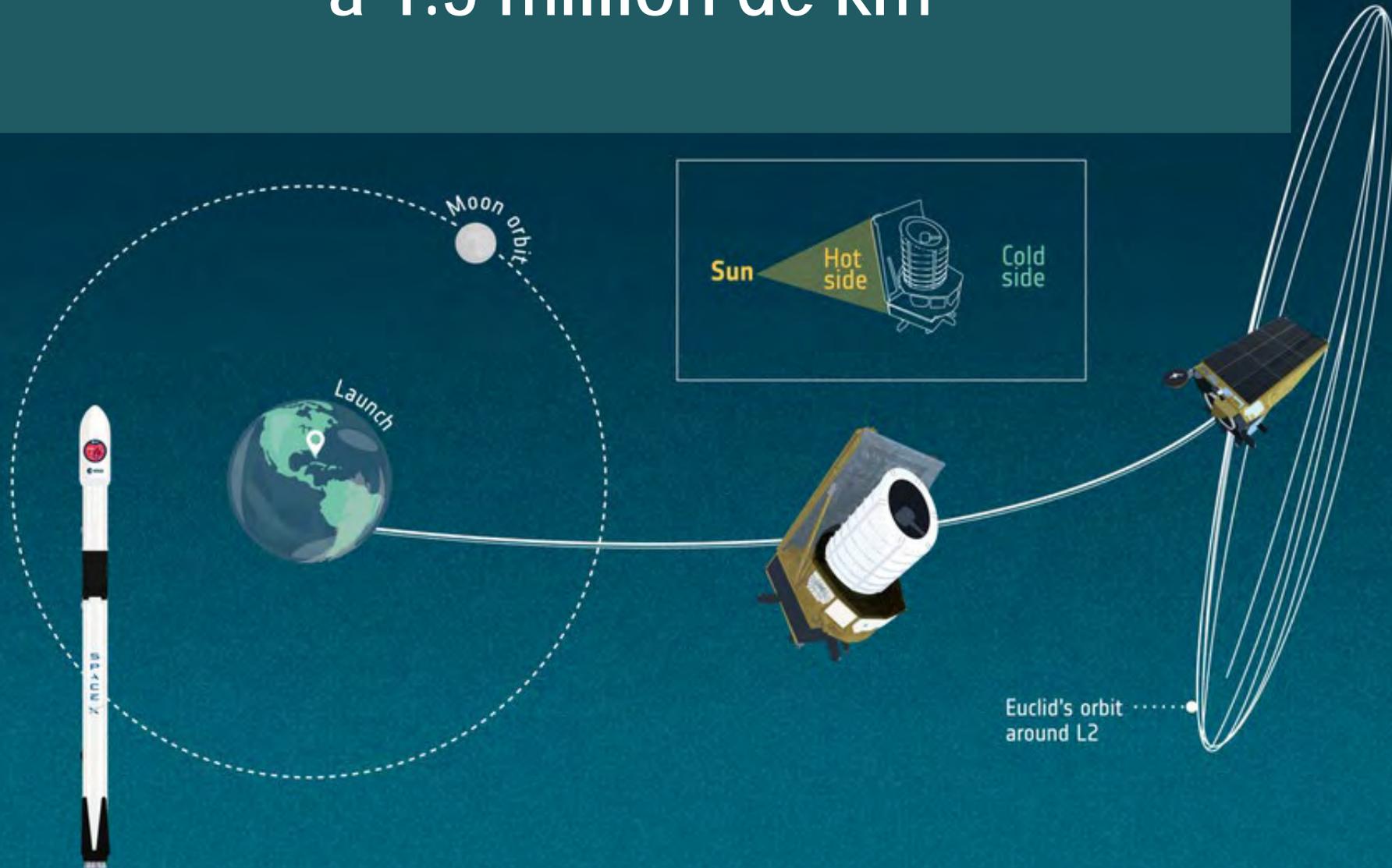
1 juillet, départ de Cap Canaveral, sur un Falcon 9 de Space X

Arrivée un mois plus tard à L2, et déploiement des instruments VIS et NISP, développés par le consortium Euclid, dont la France est le premier pays contributeur (CNRS, CEA, CNES..) Yannick Mellier responsable projet

12 Aout 2023: Vérification- Commissioning **2024**: Début des programmes



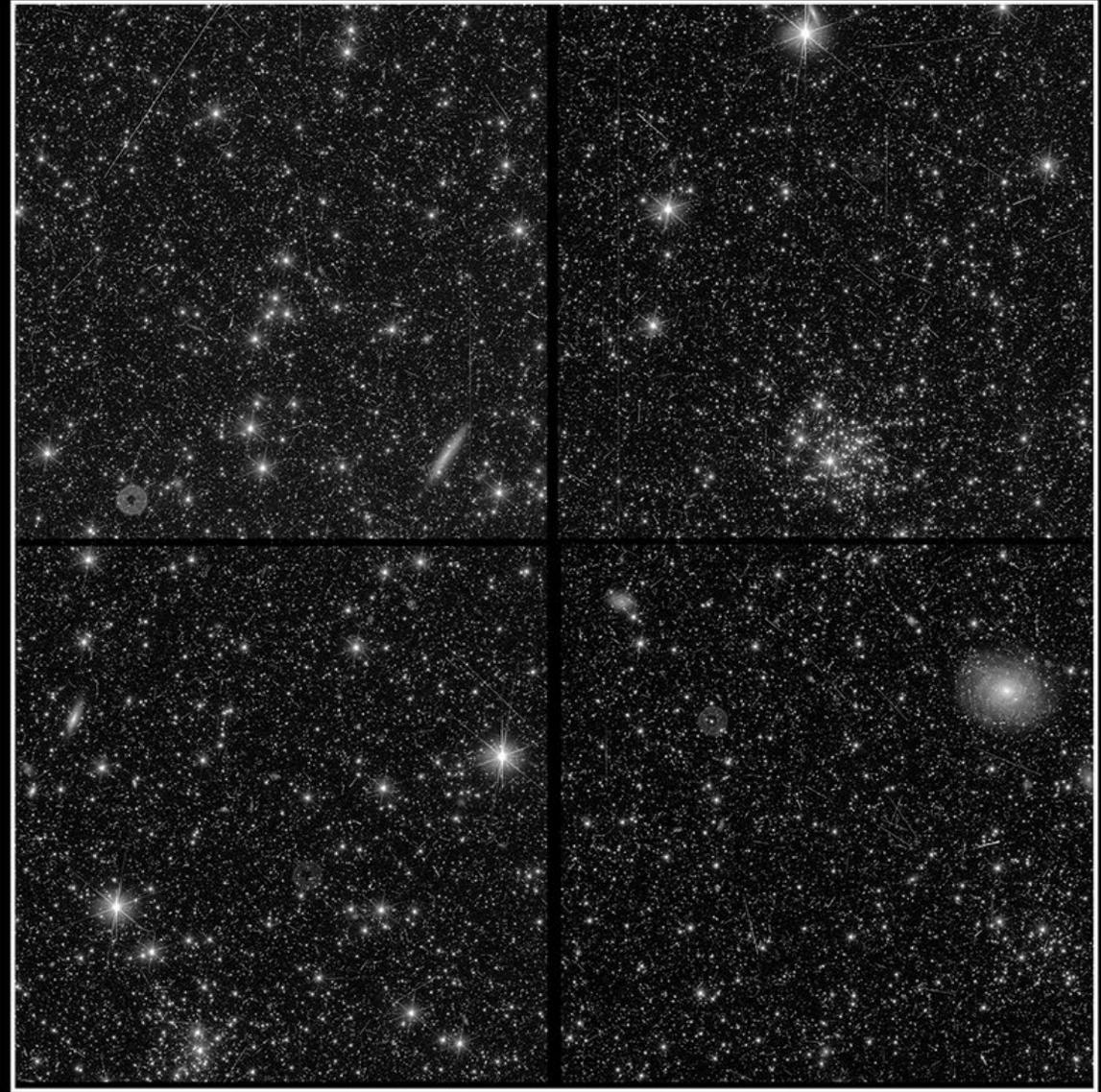
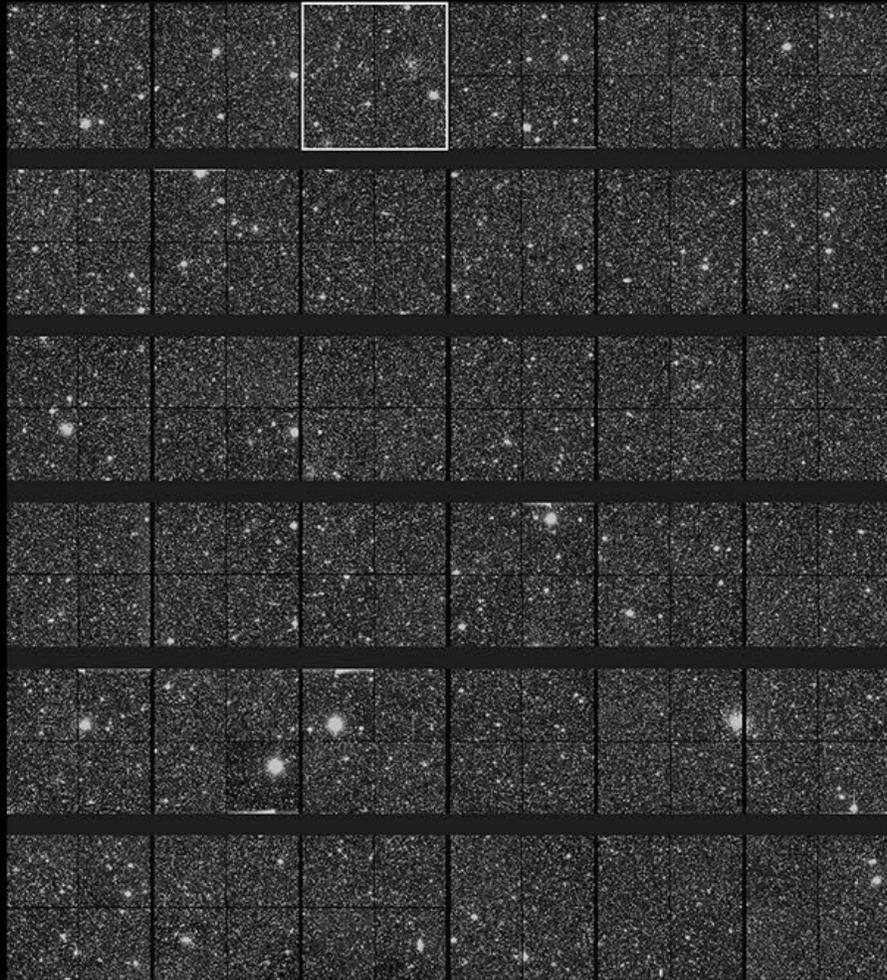
Orbite d'Euclid à 1.5 million de km



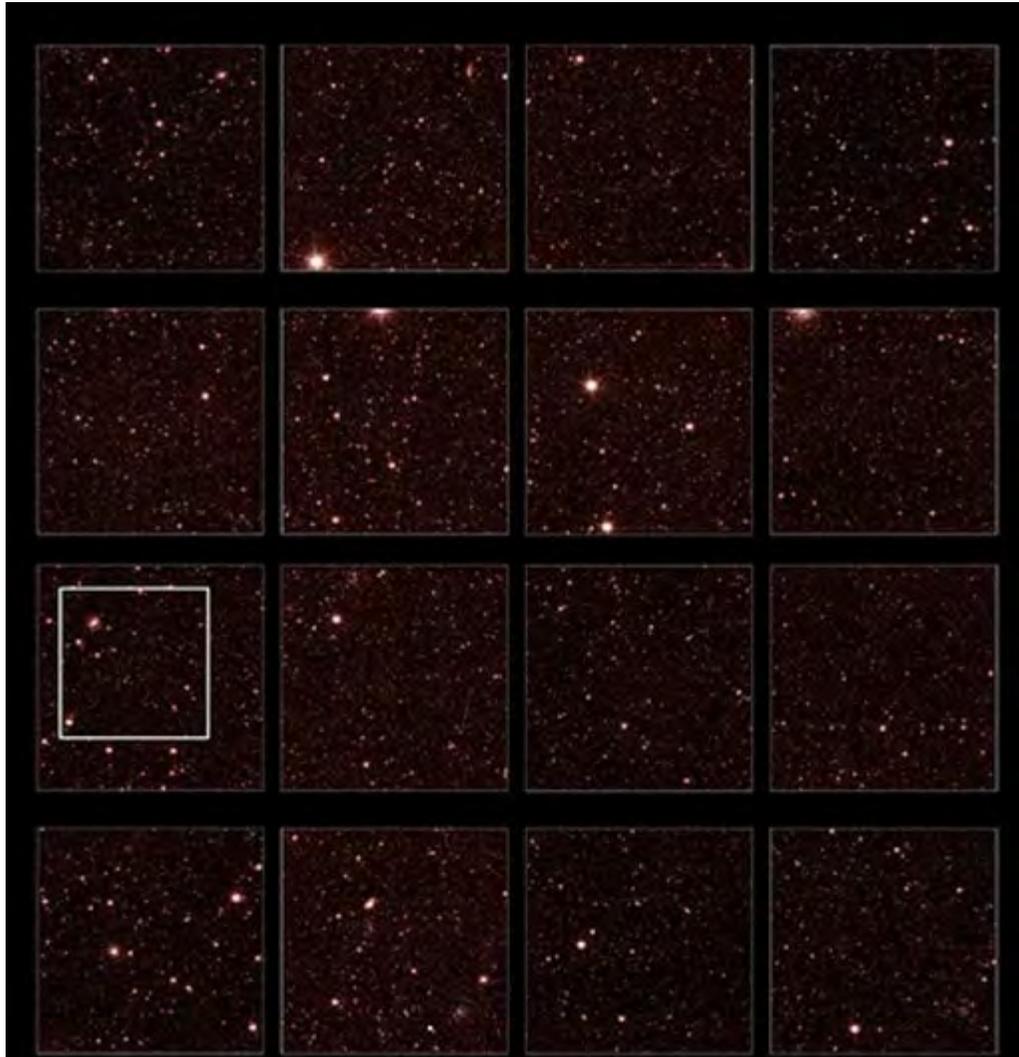
Les premières images

9min intégration, 36 détecteurs VIS, dans le visible

IMAGE DE TEST DE LA MISE EN SERVICE PRÉCOCE,
INSTRUMENT VIS



NISP proche infrarouge (16)

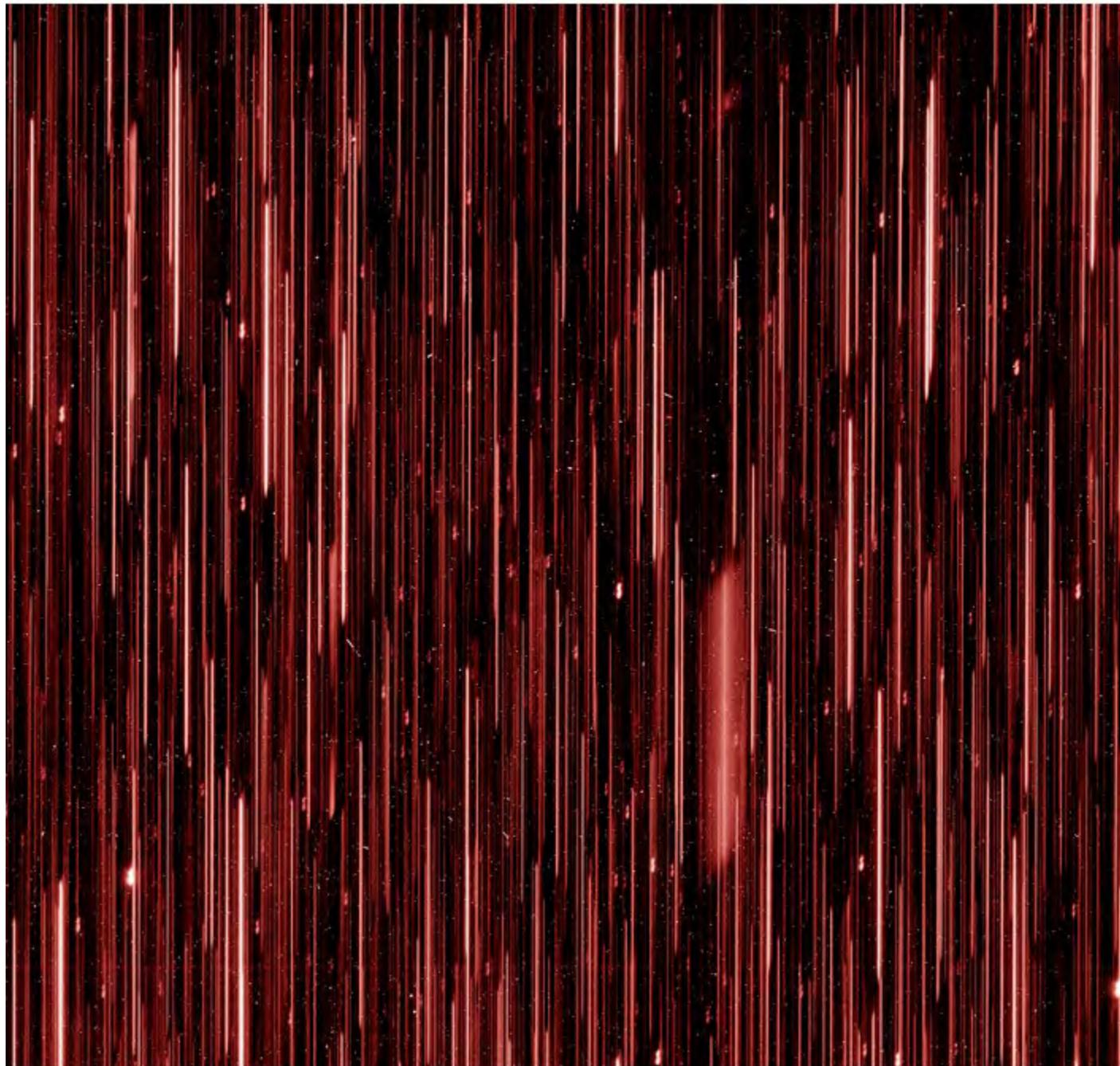


Early commissioning test image, NISP instrument

NISP-grism spectroscopie

Un grand nombre de z
obtenus directement

La plupart obtenus au sol
sur de plus grands
télescopes
4-10m



Early commissioning test image, NISP instrument (grism mode)

Principales caractéristiques d'Euclid

Une mission de l'ESA

Télescope de 1.2m

2 instruments:

--Grand champ optique **VIS** 36 x 4k x 4k CCD
576Mpixels, 0.11"/pix, 0.53 deg² FOV

--Proche IR **NISP** 64Mpix, 0.3 "/pix, Photomètre
+ Grism spectro sans fente

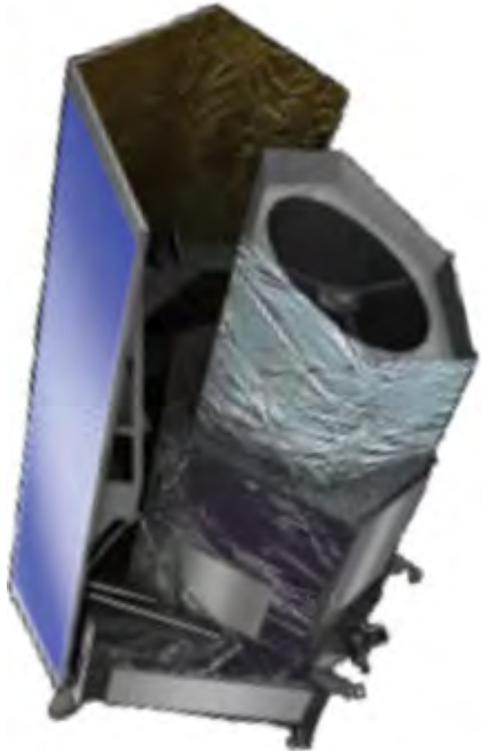
Orbite L2, Lancé en 2023

2 tonnes, 850 Meuros

Mission de 6.25ans + survey (exoplanètes, SN)

15 000 deg² + 40deg² 2 mag plus profond

12 milliard de sources, 50 million de redshifts



Les outils & diagnostics

Cinq tests complémentaires de l'énergie noire

Les **BAO**

Comme règle standard et mesure de la distance

Et se servant de la fraction universelle de baryons

Les **lentilles faibles**

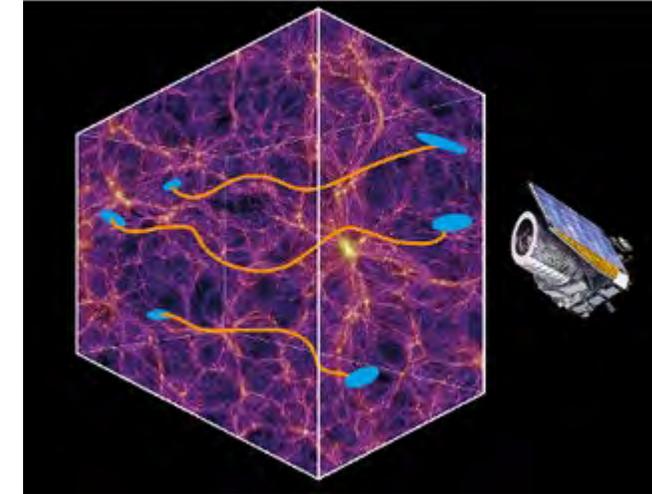
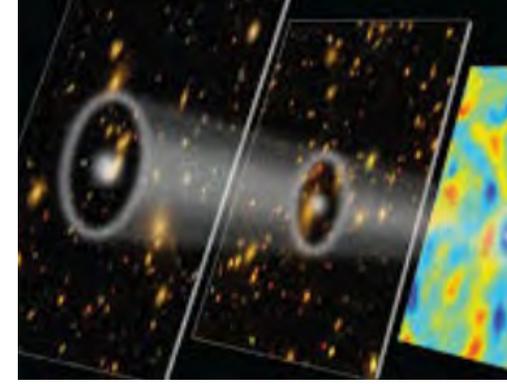
Les **amas de galaxies**

RSD Distorsions Redshift-espace

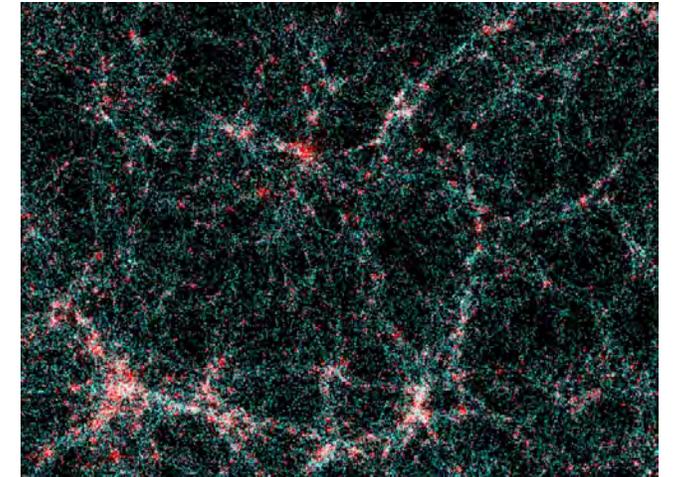
ISW Sachs-Wolfe Intégré

Taux de croissance des structures **$f\sigma_8$** , perturbé par la domination progressive de l'énergie noire, tests de **gravité modifiée**

Les grandes structures pourraient-elles contribuer à l'énergie noire? **back-reaction**

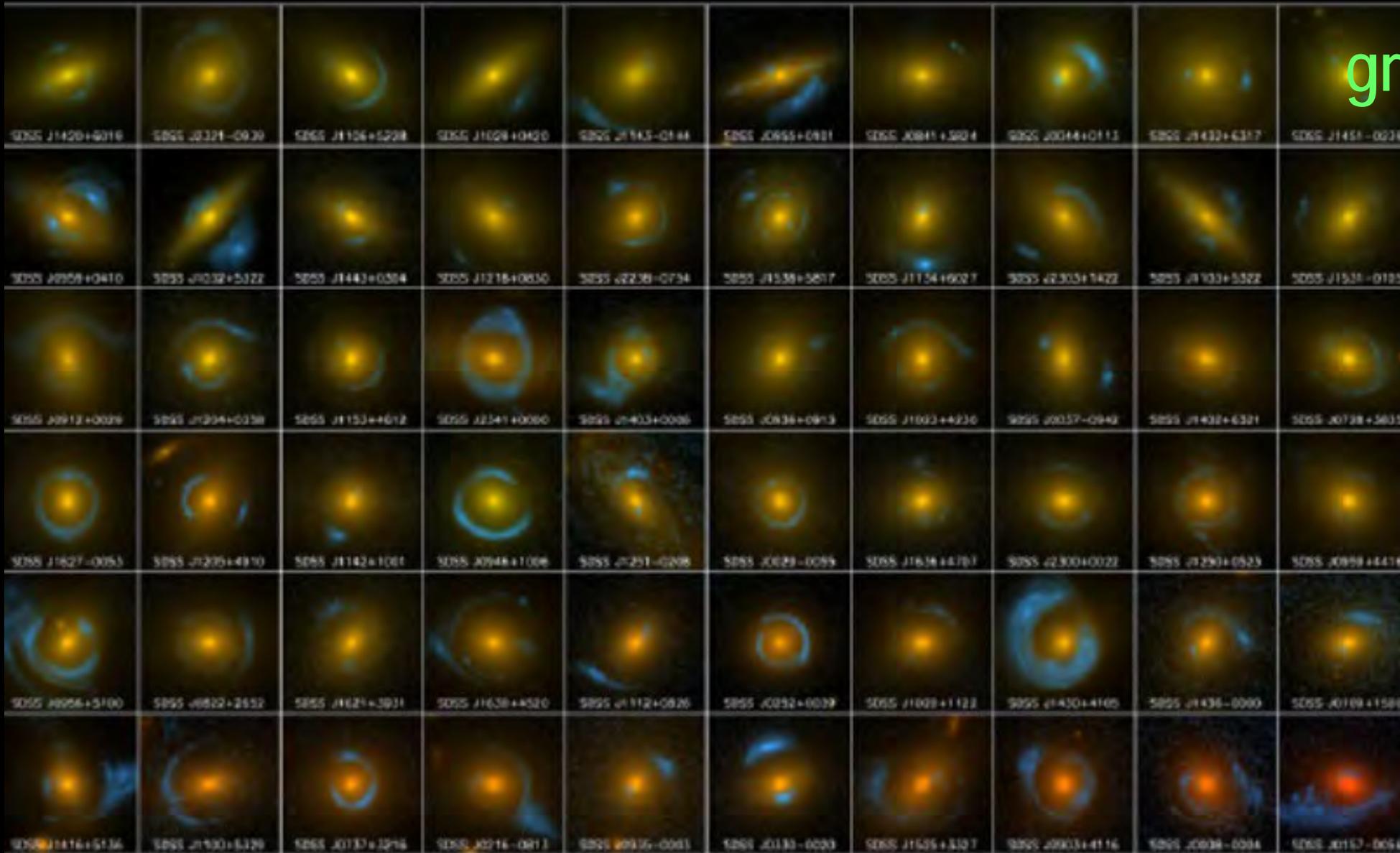


$$f = d \log (\delta) / d \log (a)$$



SLACS (~2010 - HST)

Lentilles
gravitationnelles
fortes



SLACS: The Sloan Lens ACS Survey

www.SLACS.org

A. Bolton (U. Hawai'i IIA), L. Koopmans (Kapteyn), T. Treu (UCSB), R. Gavazzi (IAP Paris), L. Moustakas (JPL/Caltech), S. Burles (MIT)

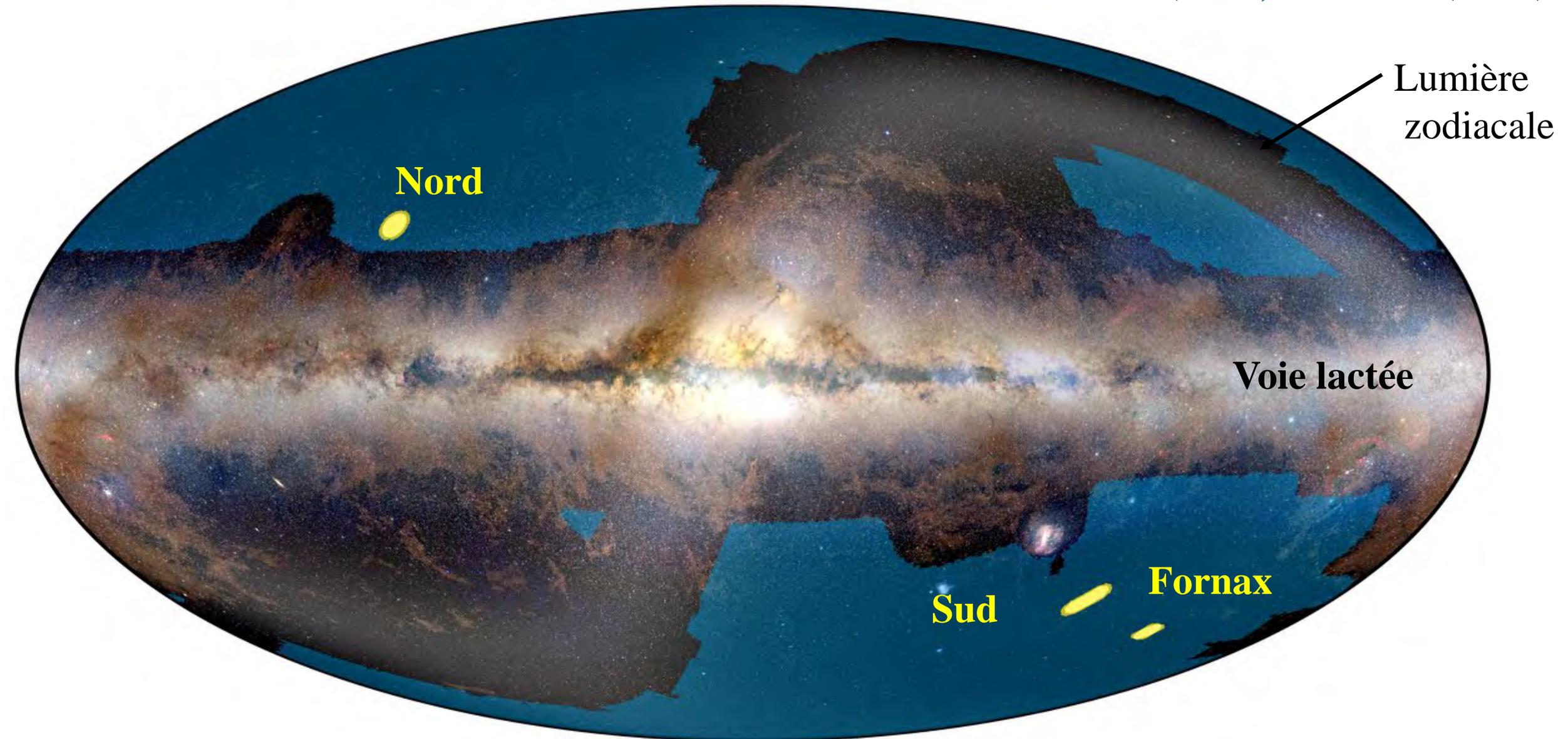
Va devenir une industrie

Etude des sous-structures: **contraintes sur la matière noire**

→ Étude des galaxies normales lointaines

Euclid Legacy : after 2 months
(66 months planned)

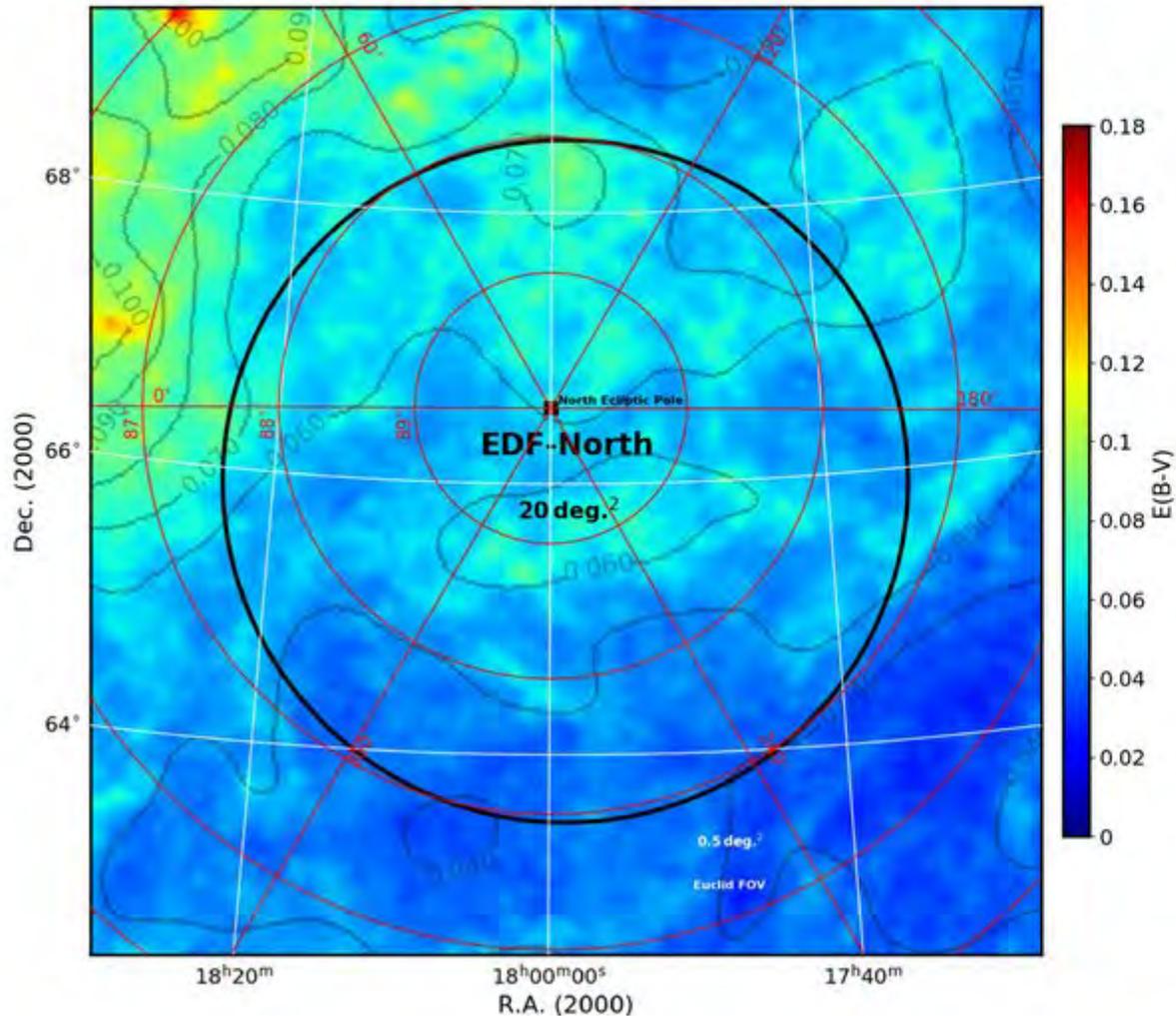
Deux Surveys: 1) Large $13\ 345^{\circ 2}$ en 6 ans 2) Profond Nord ($20^{\circ 2}$),
Sud ($23^{\circ 2}$, Fornax ($10^{\circ 2}$))



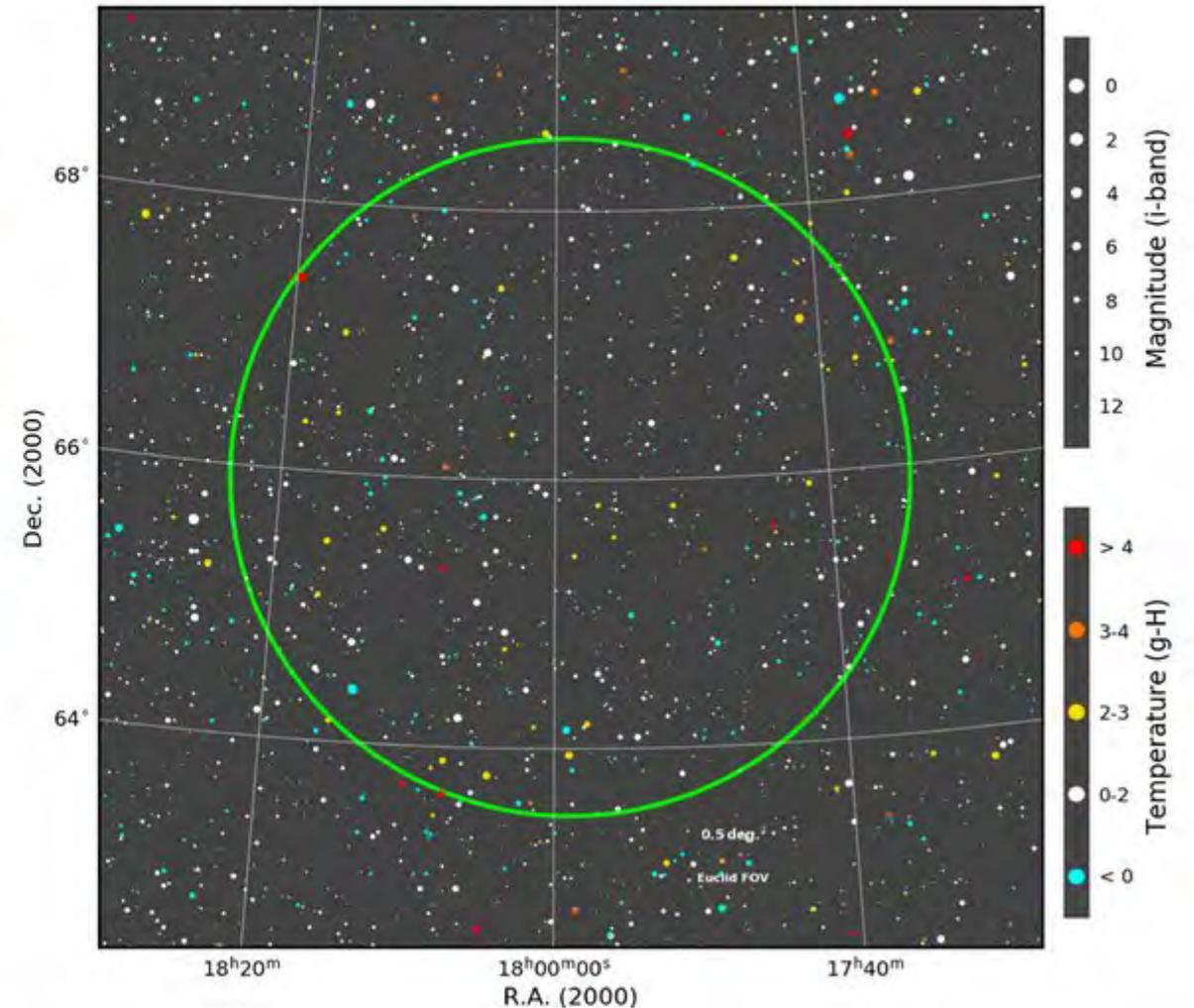
Champ profond du Nord EDF-N

Reddening: E(B-V)

Ecliptic

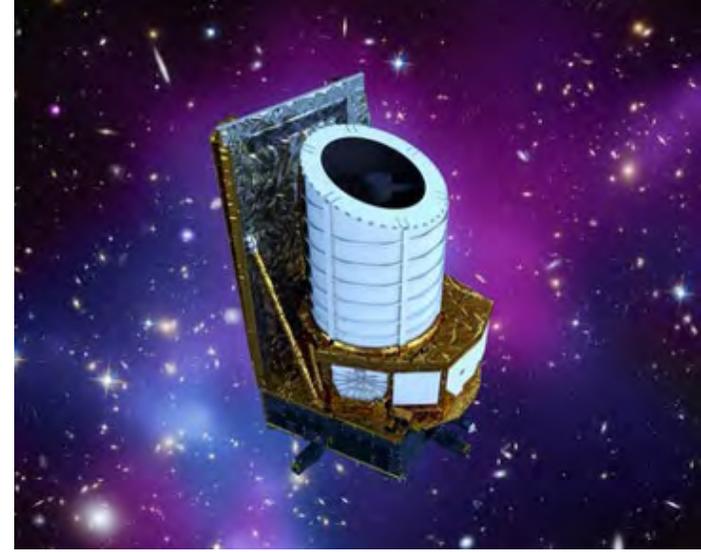


Field stars properties



Résumé

Succès du lancement d'Euclid le 1 Juillet 2023!



- **Principal but:** énergie noire avec 5 tests cosmologiques: lentilles, RSD, BAO, amas de galaxies, ISW
avec 2 méthodes indépendantes: géométrie et taux de croissance

- **Europe en position dominante**

- **Héritage d'Euclid = 12 milliard de sources, 50 million redshifts**

- Une mine d'images et de spectres pour la communauté

- Un réservoir de cibles pour JWST, VLT, E-ELT, TMT, ALMA, etc..

Vera Rubin – LSST (Legacy Survey of Space and Time)

L'observatoire Vera Rubin 8.4m → Première lumière début 2025

Le Grand relevé à partir de fin 2025 pour une durée de 10 ans

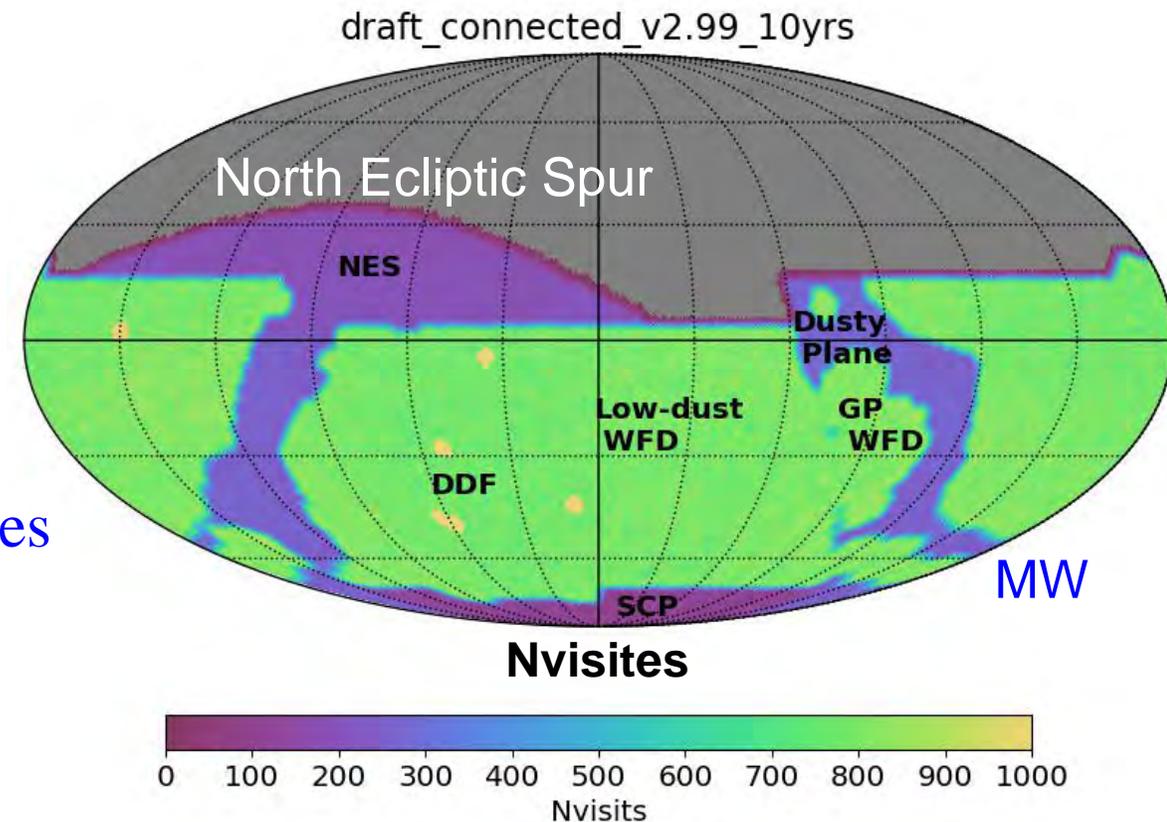
Cerro Pachón Chili 2647 m , **Champ de vue $9.6^{\circ 2}$**



Seeing 0.7''

Un relevé optique/proche IR de la moitié du ciel dans des bandes ugrizy basé sur 825 visites

- 90 % du temps, relevé uniforme : toutes les 3 à 4 nuits, tout le ciel observable est scanné deux fois par nuit
- 100 Pb de données : environ un milliard d'images de 16 Mpix permettant des mesurer **40 milliards d'objets !**



LSST « Legacy Survey of Space and Time »

LSST observe tout le ciel austral à $\delta=+15^\circ$ avec des poses de **~10 sq.deg**

Deux surveys planifiés:

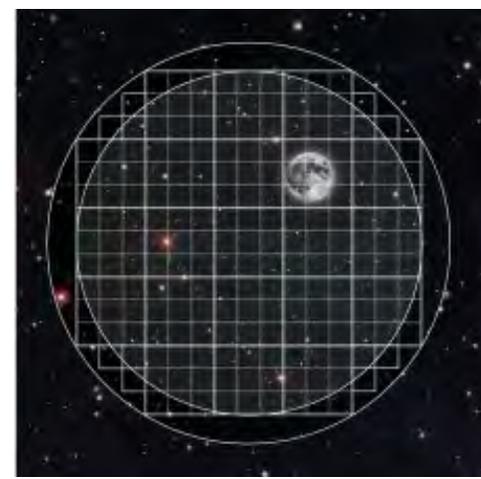
Le principal

Survey étendu profond: 18 000 degrés carrés à une profondeur de
u: 26.1 g: 27.4 r: 27.5 i: 26.8 z: 26.1 y: 24.9 magnitudes

Surveys très profonds, focalisés

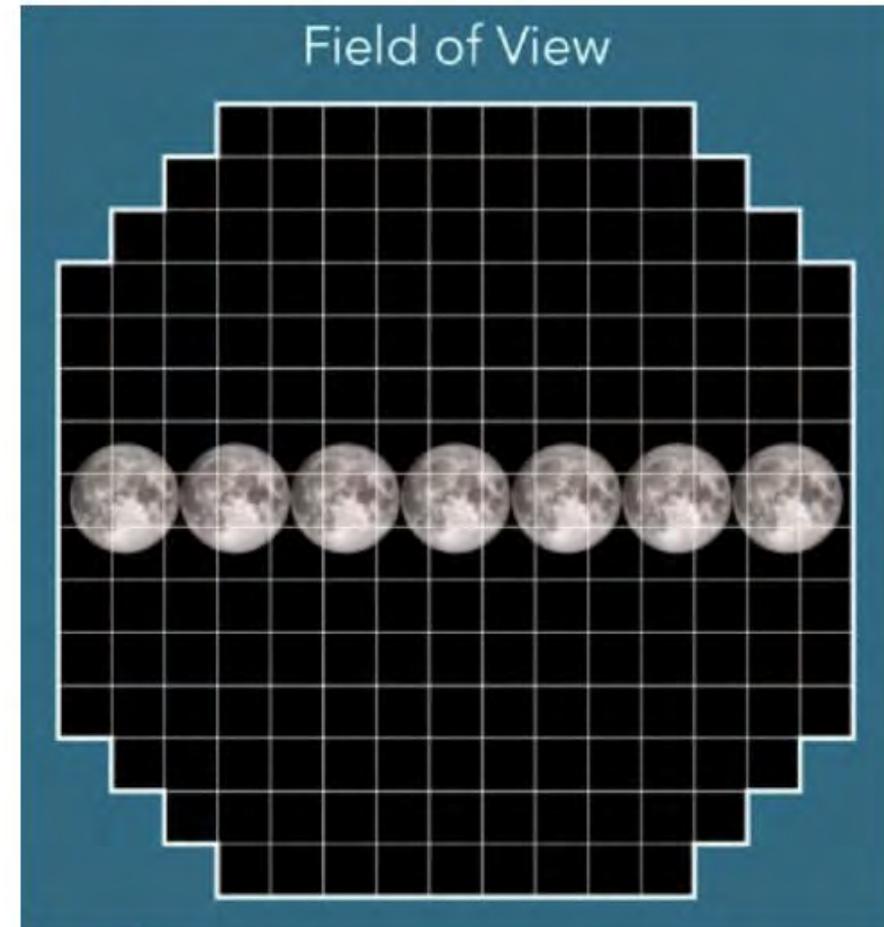
10% du temps: ~30 champs sélectionnés $300^{\circ 2}$
Continuellement poses 15sec/30sec. 1heure/nuit

Tout le ciel visité **825 fois** avec des poses de 30s
Alertes sur les objets variables relayées partout dans les 60s.



La vitesse du survey est proportionnelle à **l'étendue**, proportionnelle au produit de la surface du miroir et du champ de vue $\rightarrow 319 \text{ m}^2 \text{ deg}^2$
Rapide pour passer en 2sec d'un champ à l'autre

Credit: Aaron Roodman



Camera du LSST

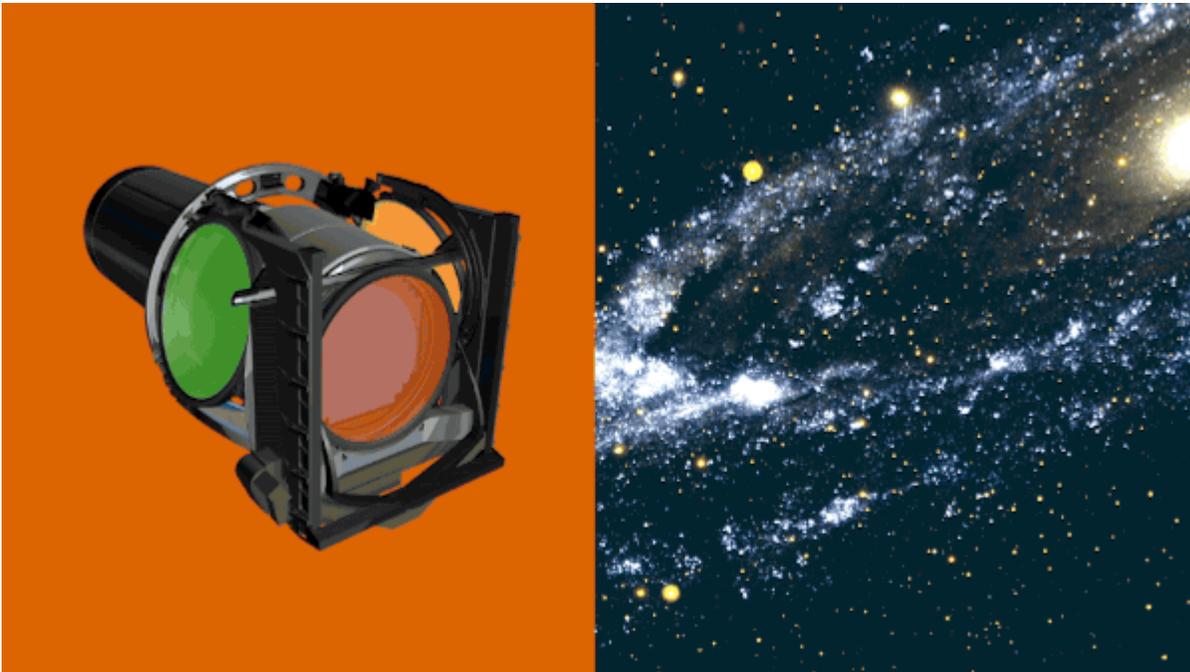
3 milliards de pixels; 8.2 GB par pose

– Poids de 3 tonnes

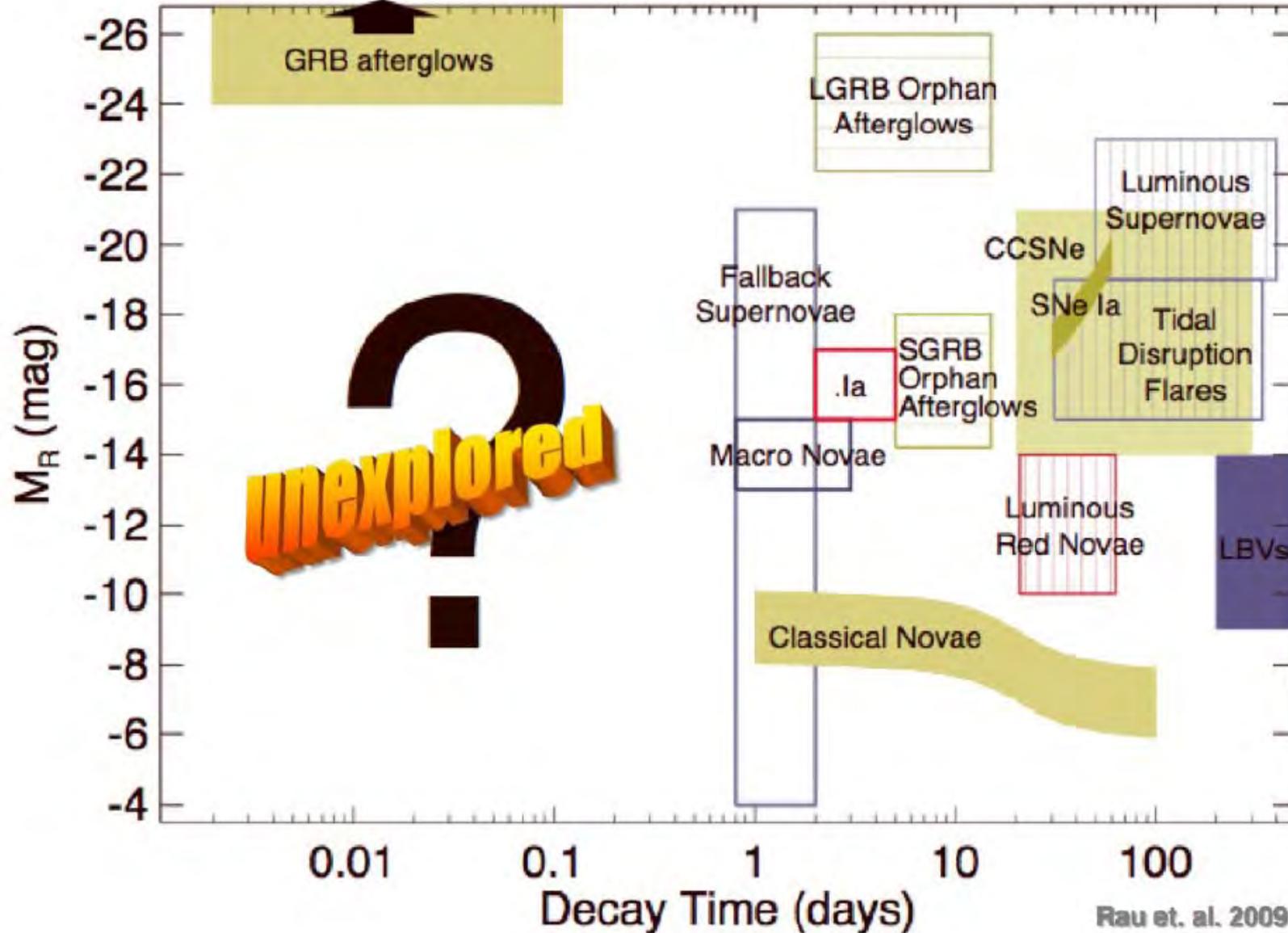
Roue à filtres, construite par 5 labos

Français (IN2P3)

20 Tb de données par nuit



Les événements variables: le domaine temporel



De la seconde à l'année

Une large espace de découvertes!

Astéroïdes, étoiles variables

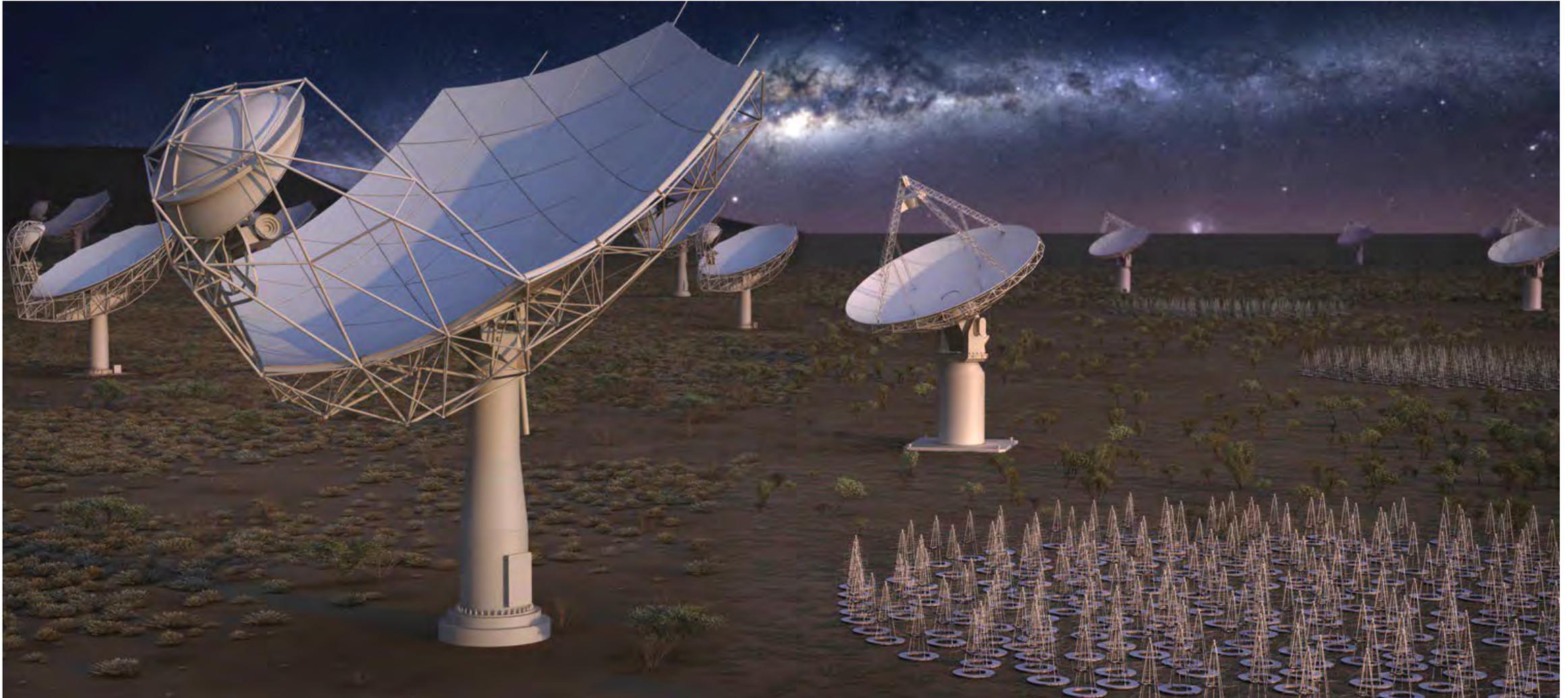
Supernovae, novae,

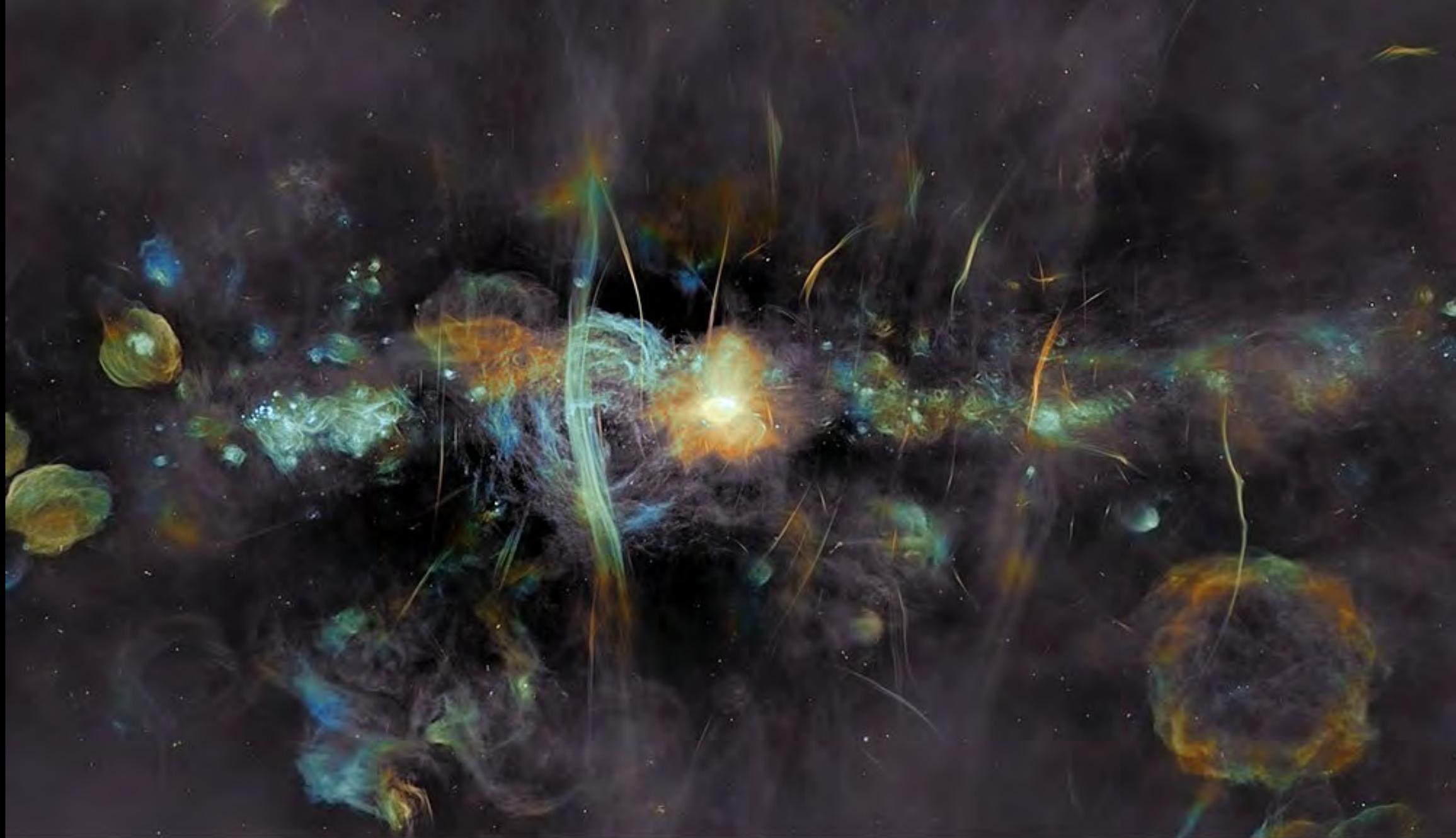
AGN, transitoires

+ ondes gravitationnelles

lentilles

L'OBSERVATOIRE SKA





SARAO, Heywood et al. (2022) / J. C. Muñoz-Mateos



16 Pays membres -- 8 partenaires africains -- Quartier général UK



Botswana, Ghana,
Kenya, Madagascar,
Mauritius, Mozambique,
Namibia, and Zambia

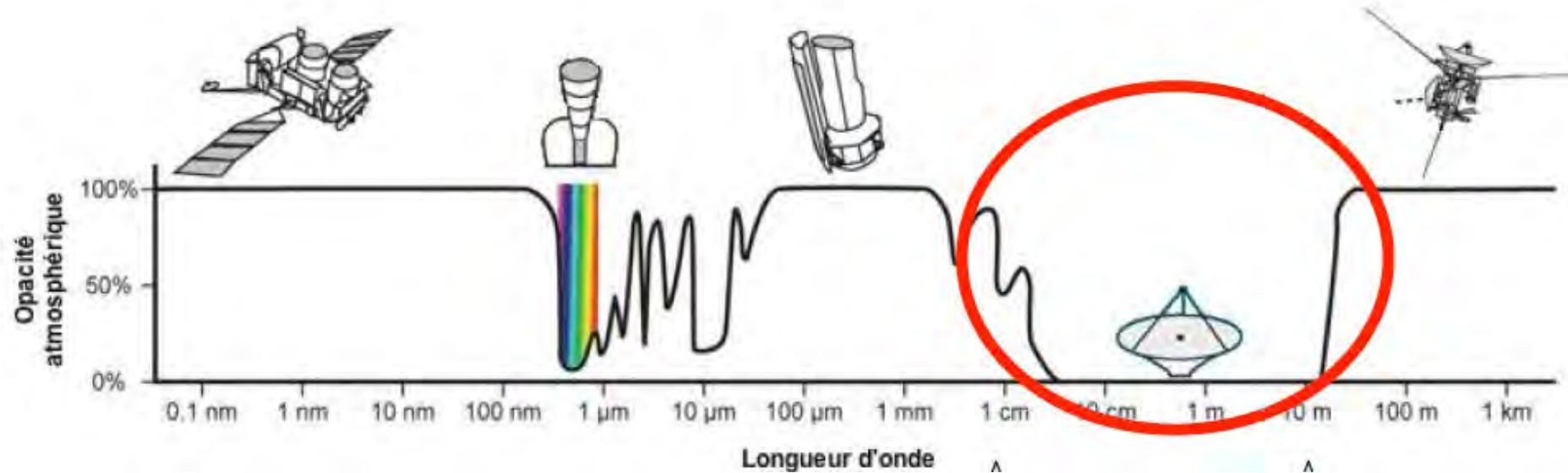
SKA2= 10x SKA1
en sensibilité, 20x FOV



 SKA Members
*SKA Observatory founding members

 African Partner Countries

Domaine de la Radio-astronomie



Haute fréquence: ALMA
0.3mm -- 7mm

Moyenne fréquence: SKA-mid
1.3cm -- 0.8m

Basse fréquence: SKA-low
0.8m – 6m

Absorption
atmosphère
 $O_2, H_2O...$

Reflection
ionosphère
80-1000km

$$\text{Beam} = \theta = 1.2 \lambda / D$$

$$\lambda = 21\text{cm} \quad \theta = 8' \quad D = 100\text{m}$$

Une antenne unique: FAST $\Phi=500\text{m}$ en Chine



$\lambda=21\text{cm}$ $\theta=1.6'$
 $D=500\text{m}$
 $\text{Area}= 0.2 \text{ km}^2$

Interféromètres radio

Westerbork
(ASTRON, NL)
14 paraboles de 6m
Base max: 2.7 km
 $\lambda \sim 10\text{cm} - 1\text{m}$
A $\sim 400\text{ m}^2$



VLA (NRAO,
Nouveau Mexique)
27 paraboles de 25 m
Base max: 36 km
 $\lambda \sim 1\text{cm} - 1\text{m}$, $f_{\text{min}} = 74\text{ MHz}$
A $\sim 14000\text{ m}^2$



SMA (USA – Taiwan) Hawaïï
8 antennes de 6 m
Base max: 0.5 km
 $\lambda \sim 0.5\text{mm}$, A $\sim 220\text{ m}^2$



GMRT (Pune, Inde)
30 paraboles de 45 m
Base max: 25 km
 $\lambda \sim 1\text{m}$, $f_{\text{min}} = 153\text{ MHz}$
A $\sim 50000\text{ m}^2$



Plateau de Bure
(IRAM, France)
6 antennes de 15m
Base max: $\sim 1\text{ km}$
 $\lambda \sim 1\text{mm}$
A $\sim 1000\text{ m}^2$



ALMA (Chili)
54 antennes de 12m
+ 12 de 7m
Base max: 16 km
 $\lambda = 1\text{ cm} - 0.3\text{ mm}$
 $f = 30 - 900\text{ GHz}$
A $\sim 6000\text{ m}^2$

Location:
South Africa



Frequency range:
350 MHz to
15.4 GHz
with a goal of 24 GHz

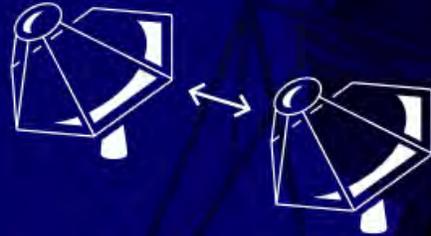


197 dishes
(including 64 MeerKAT dishes)

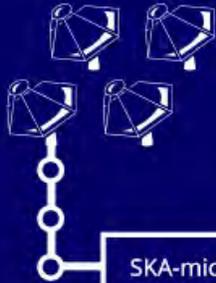
Total
collecting
area:
33,000m²



or
126
tennis
courts



Maximum distance
between dishes:
150km



Data transfer rate:

8.8 Terabits
per second

Compared to the JVLA, the current best
similar instrument in the world:

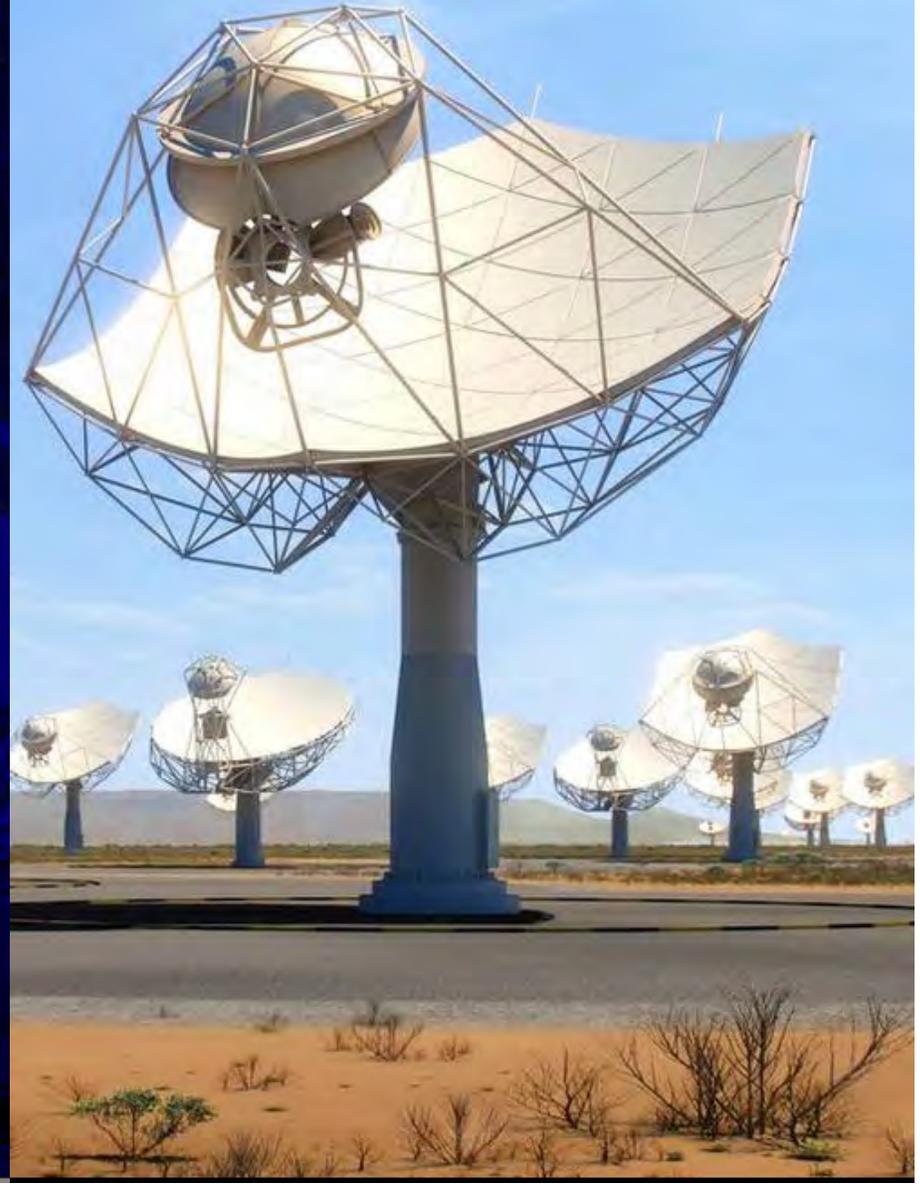


4x
the
resolution

5x
more
sensitive

60x
the survey
speed

SKA-MID





Location: Australia



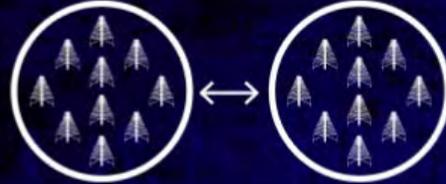
Frequency range:

50 MHz to
350 MHz

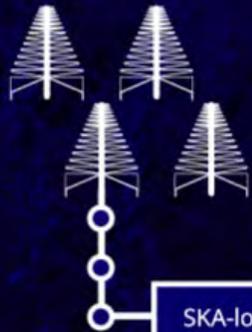


131,072
antennas spread between
512 stations

Total
collecting
area:
0.4km²



Maximum distance
between stations:
>65km



Data transfer rate:

7.2 Terabits
per second

Compared to LOFAR Netherlands, the current
best similar instrument in the world



25%
better
resolution

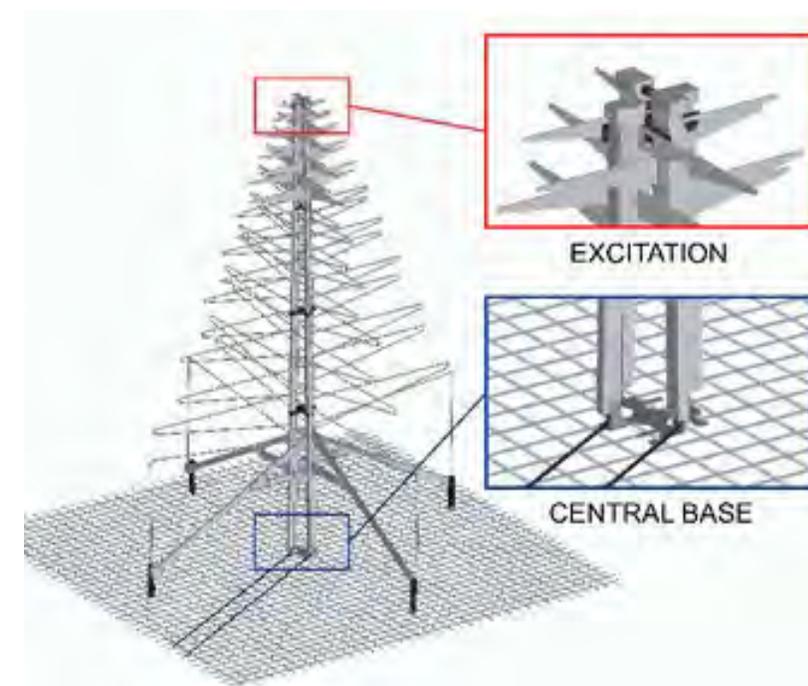
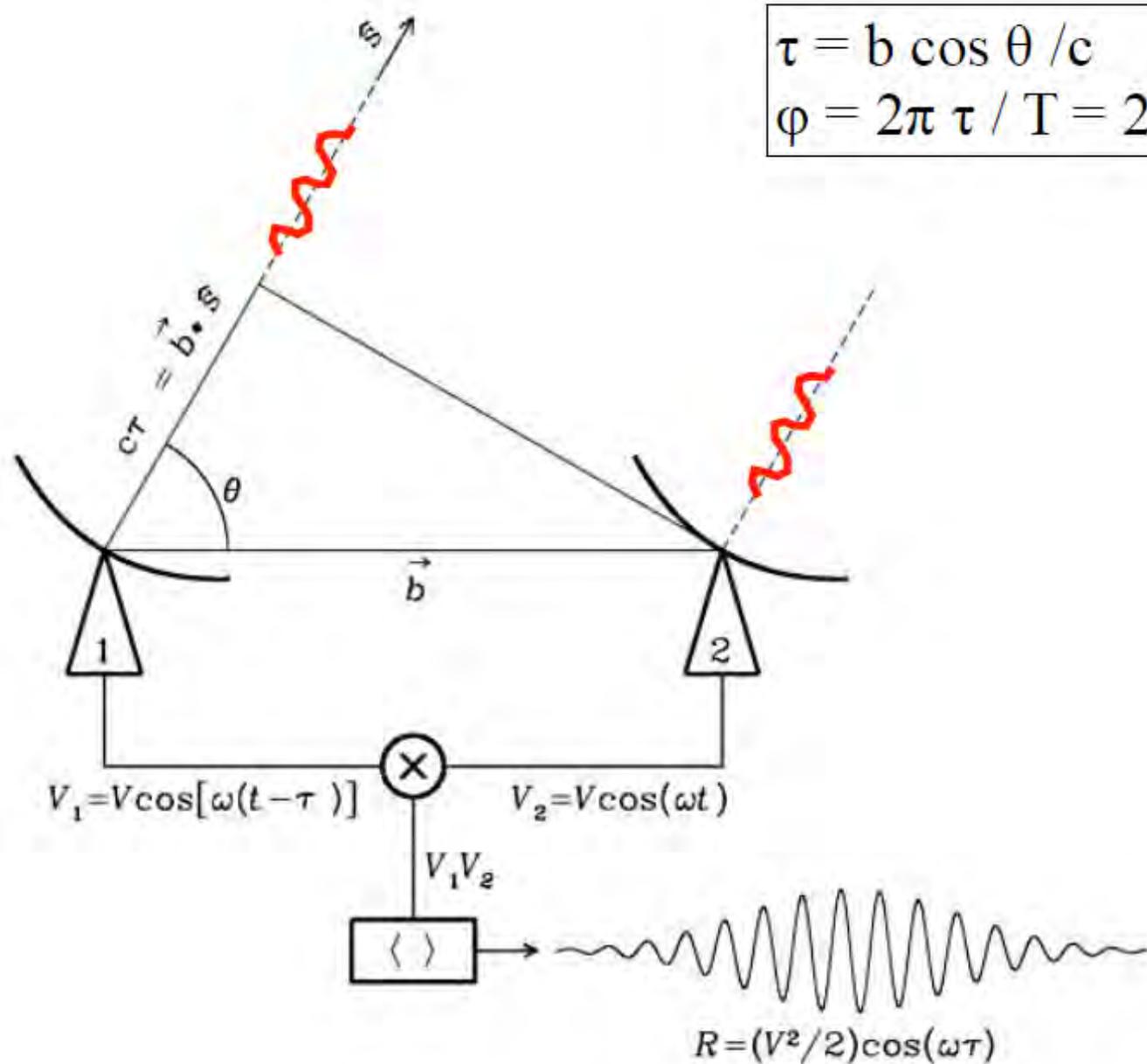
8x
more
sensitive

135x
the survey
speed

SKA-LOW



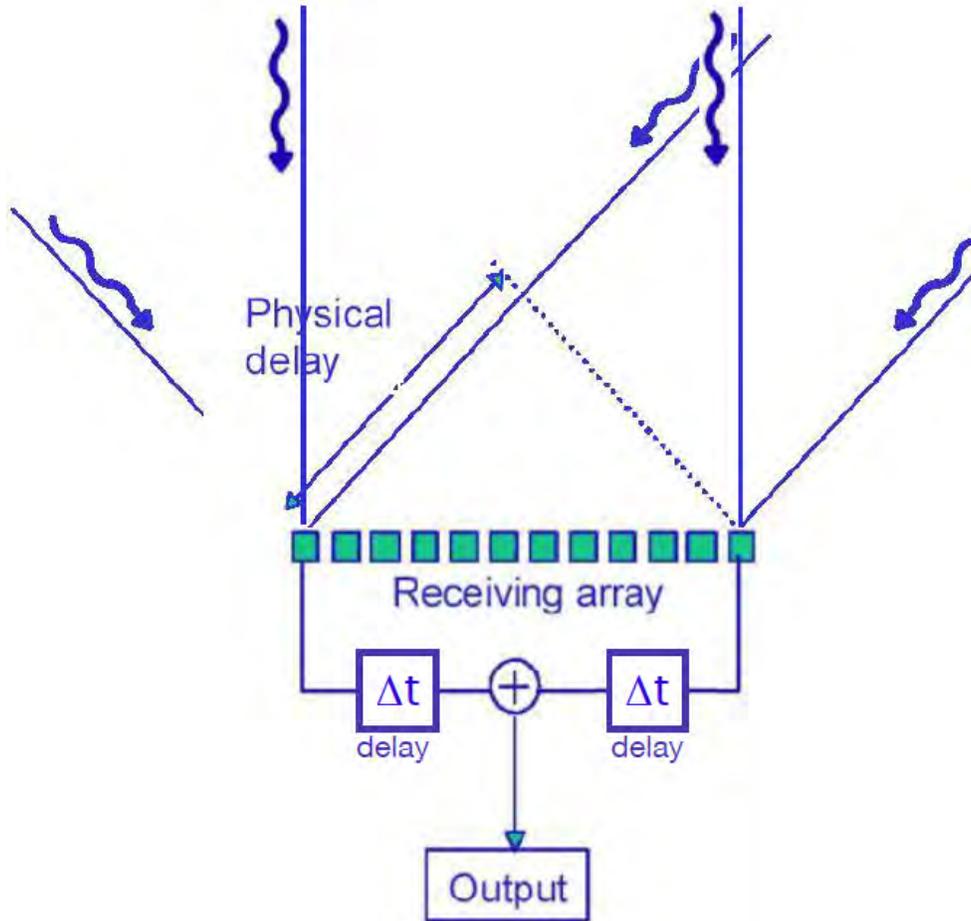
Interférométrie: SKA-mid



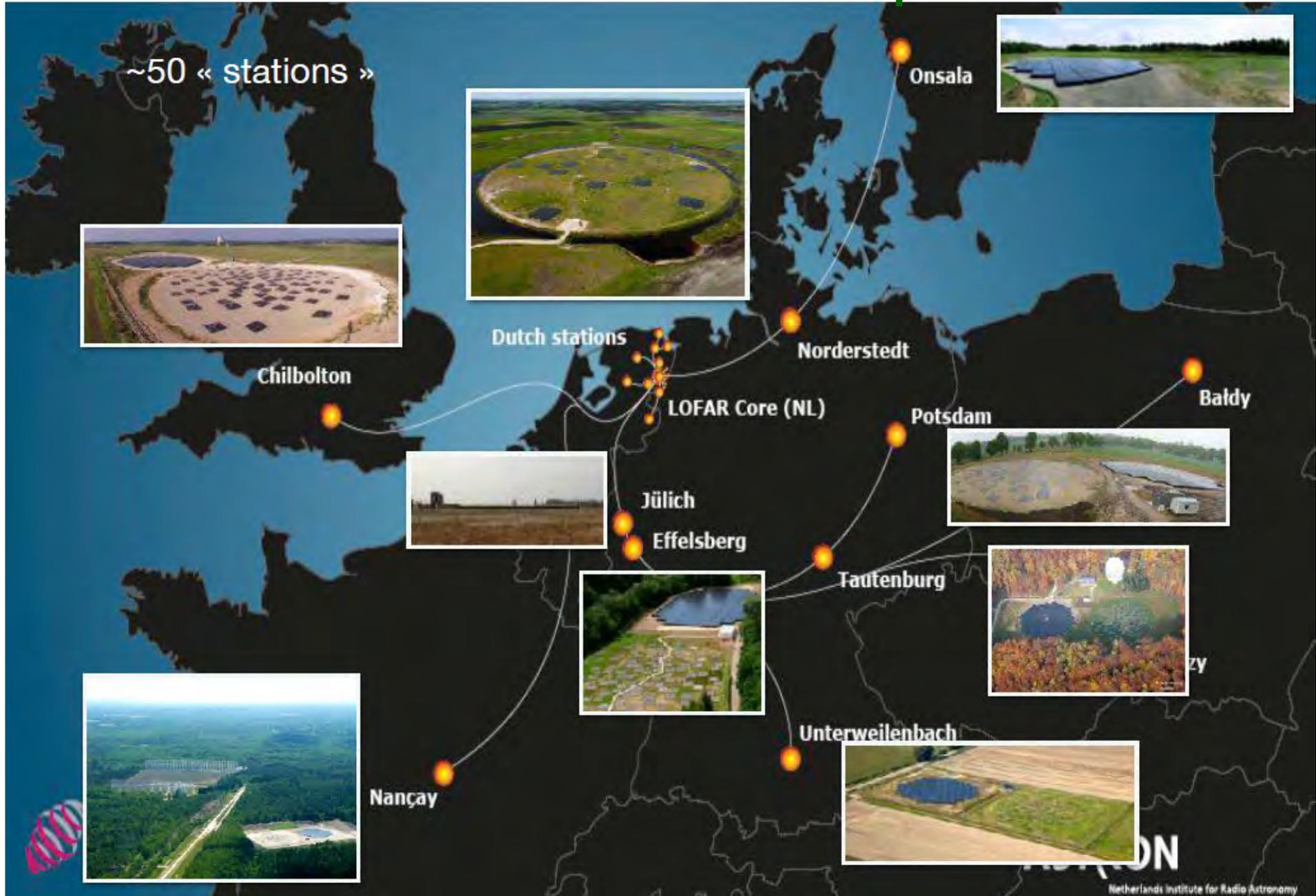
Interférométrie: SKA-low

Pointage électronique

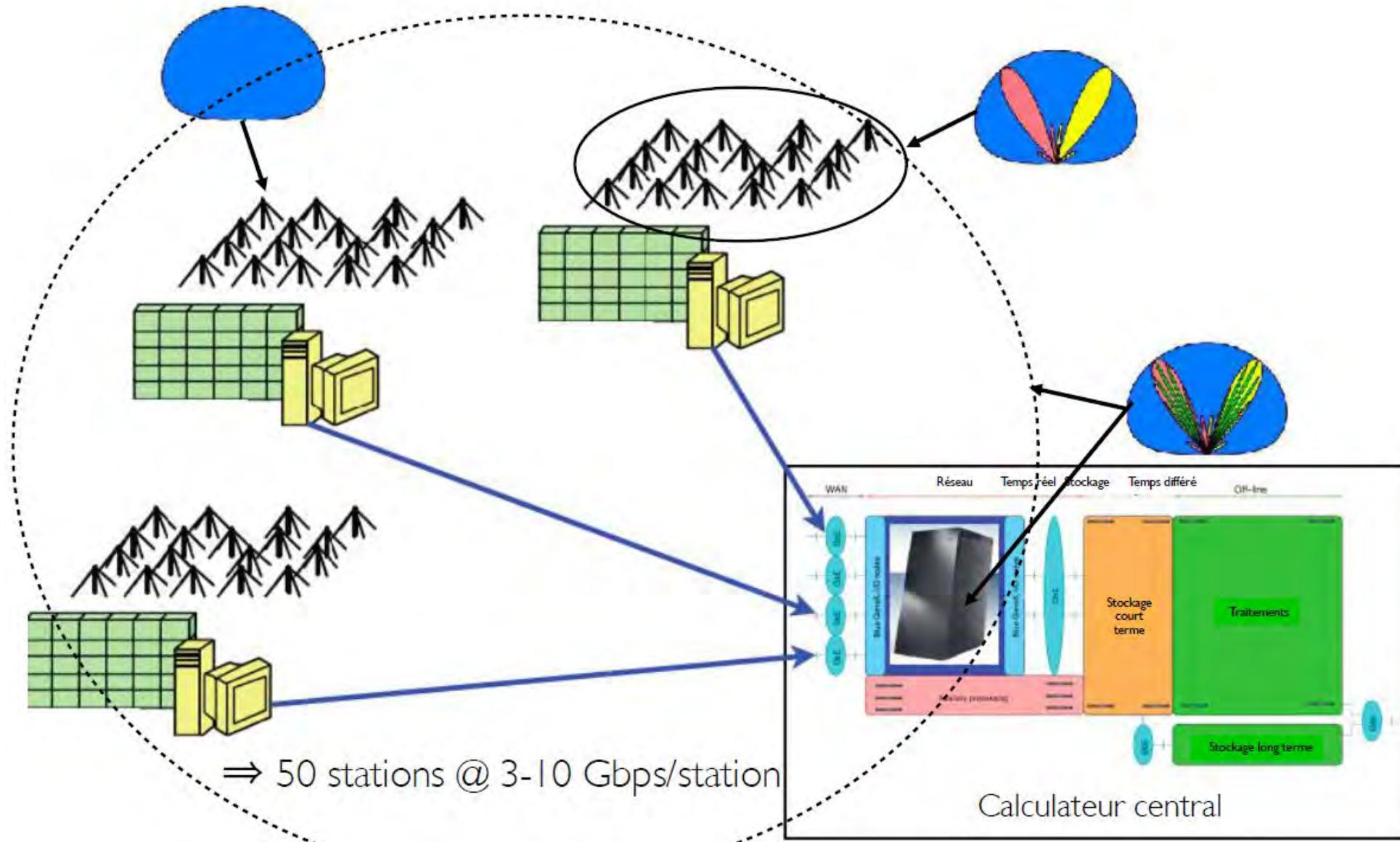
→ Révolution numérique



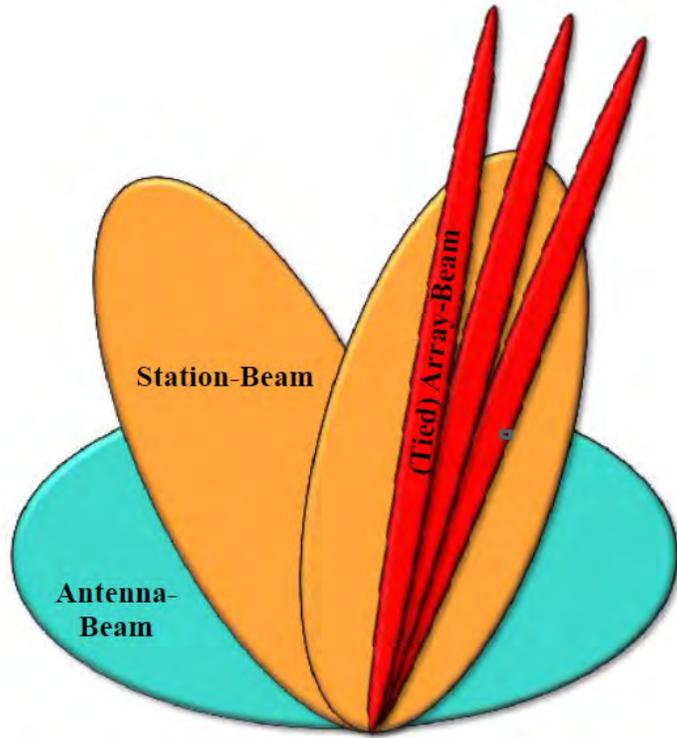
LOFAR, Réseau Européen



Observations simultanées (jusqu'à 8) avec des délais électroniques
Reconstitution du lobe d'observation : **Beam forming**



SKA : un débit de données colossal



Super-comp + PC CPU/GPU



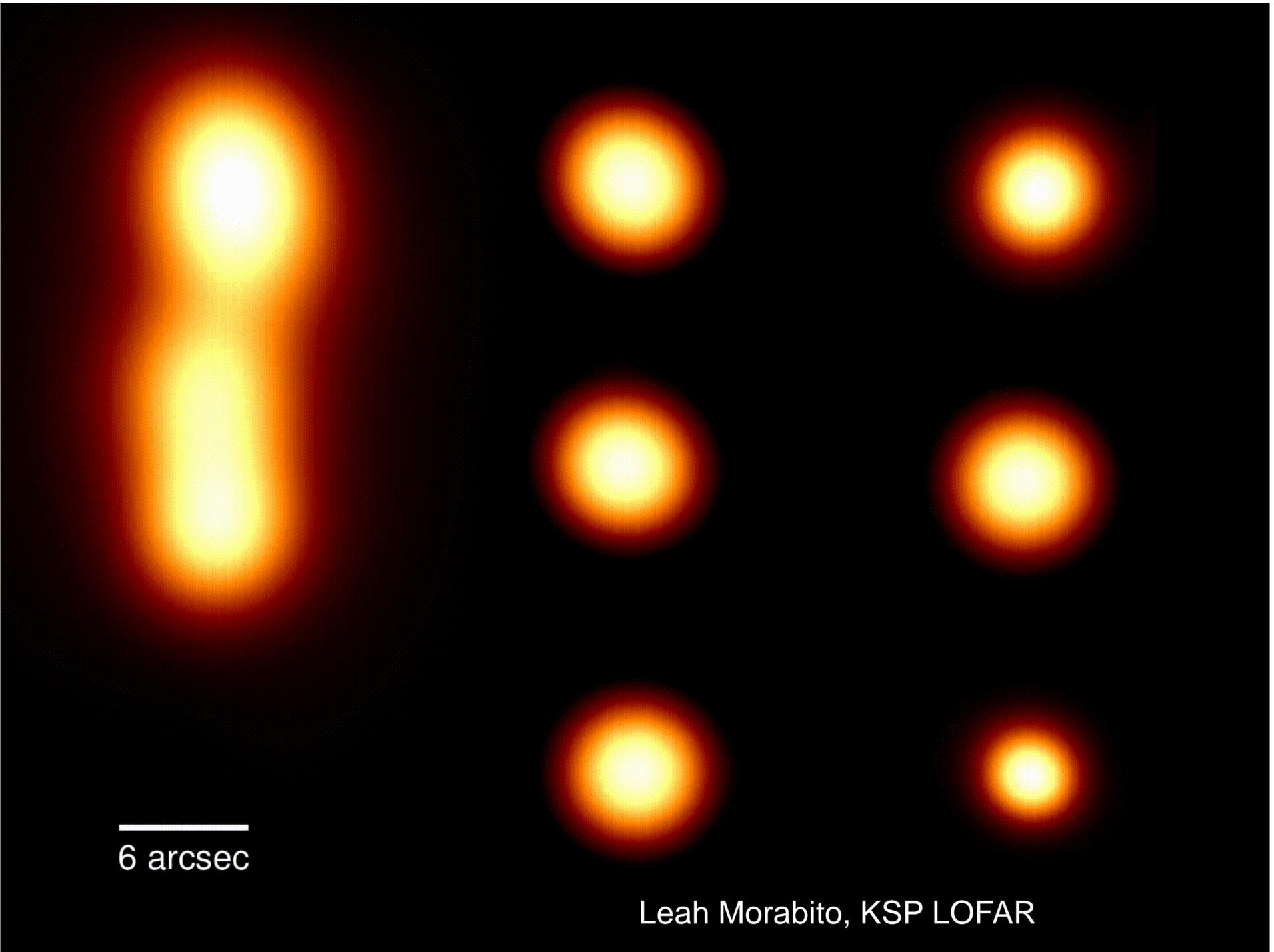
Le coût principal

500 Pb / heure ~ 10 Eb / jour ~ 5 Zb / an (1 Zb = 1 MPb)

(> trafic internet mondial aujourd'hui)

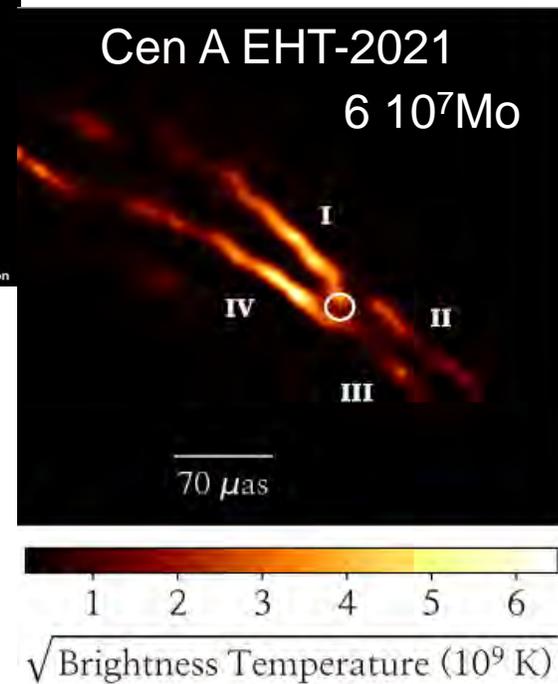
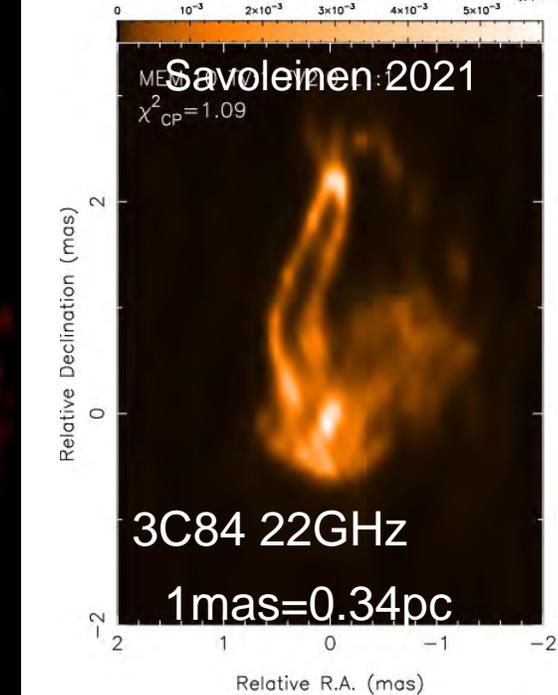
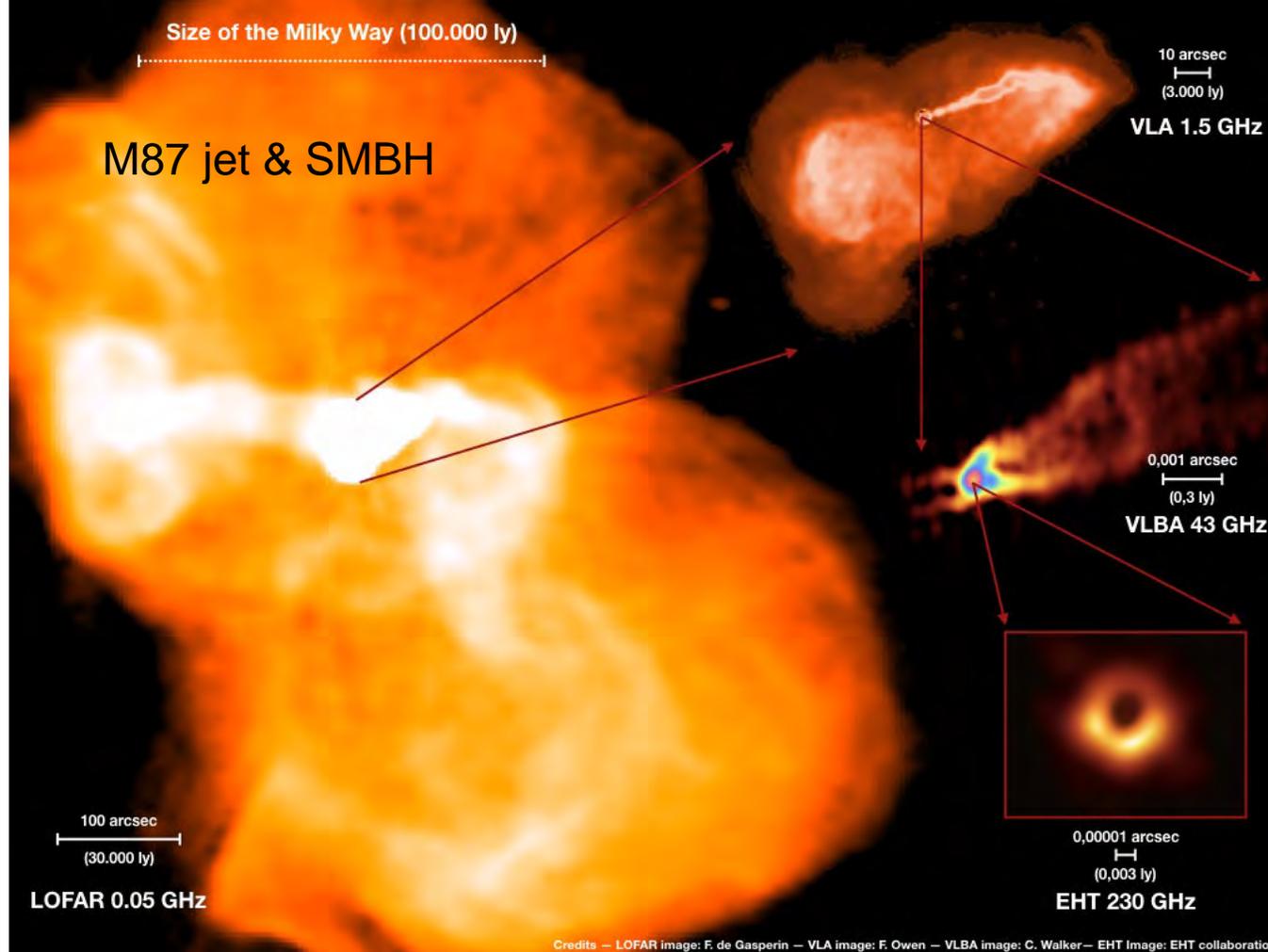
→ **stockage des données brutes impossible**

→ calibration (étalonnage) & imagerie temps réel = indispensable



6 arcsec

Leah Morabito, KSP LOFAR



Enorme progrès en résolution spatiale
 Très haute extension dynamique
 EHT Event Horizon Telescope

La science de SKA

Energie sombre: (BAO, WL, RSD..)

Est-ce qu'elle varie avec le temps?

Matière noire dans Universe, selon z

Comment l'Universe s'est re-ionisé?

Fin de l'âge sombre: aube cosmique, EoR

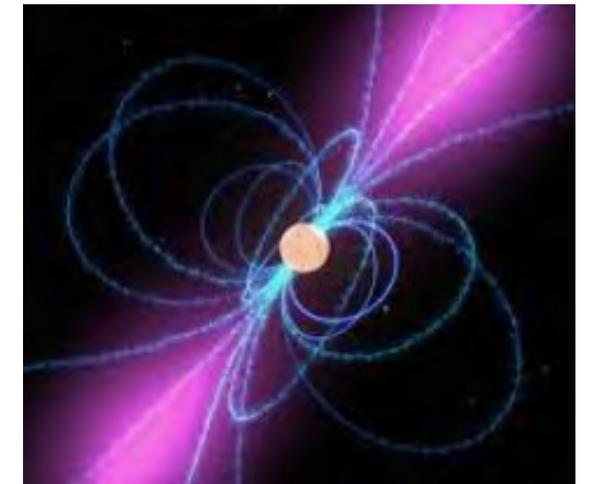
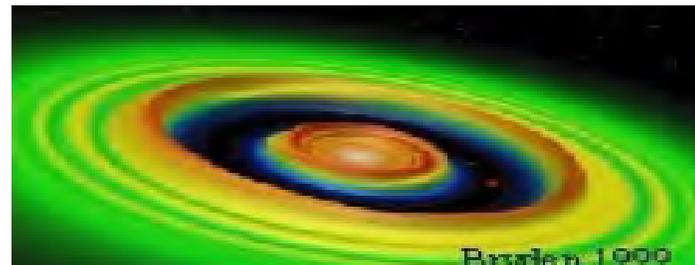
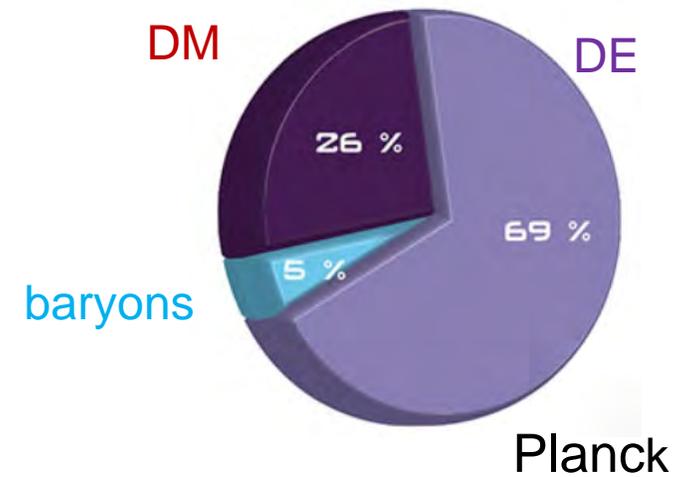
Comment les baryons s'assemblent dans les structures?

Formation et évolution des galaxies

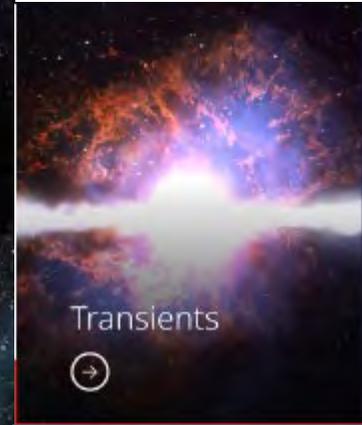
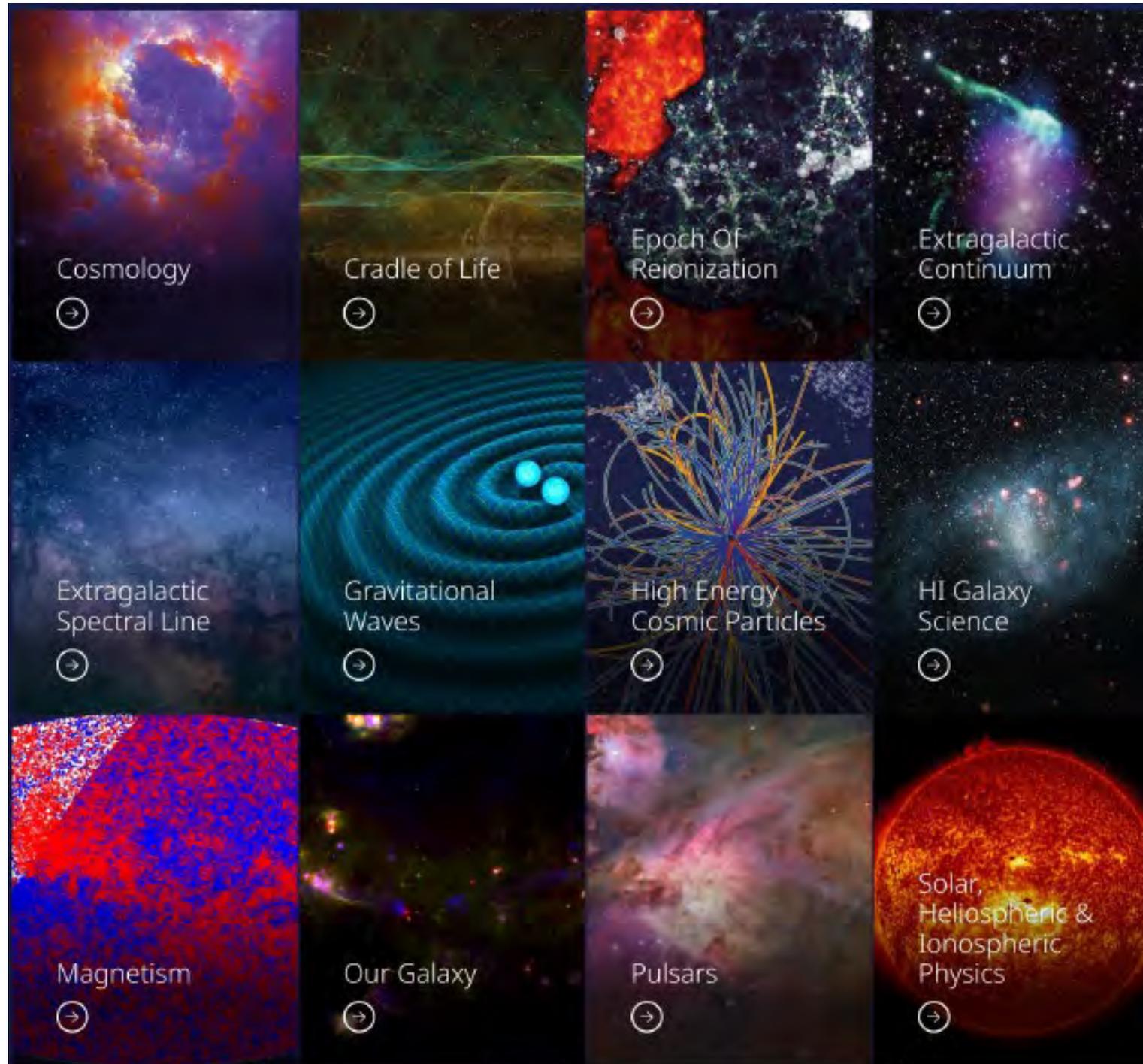
Gravité en champ fort; pulsars et trous noirs

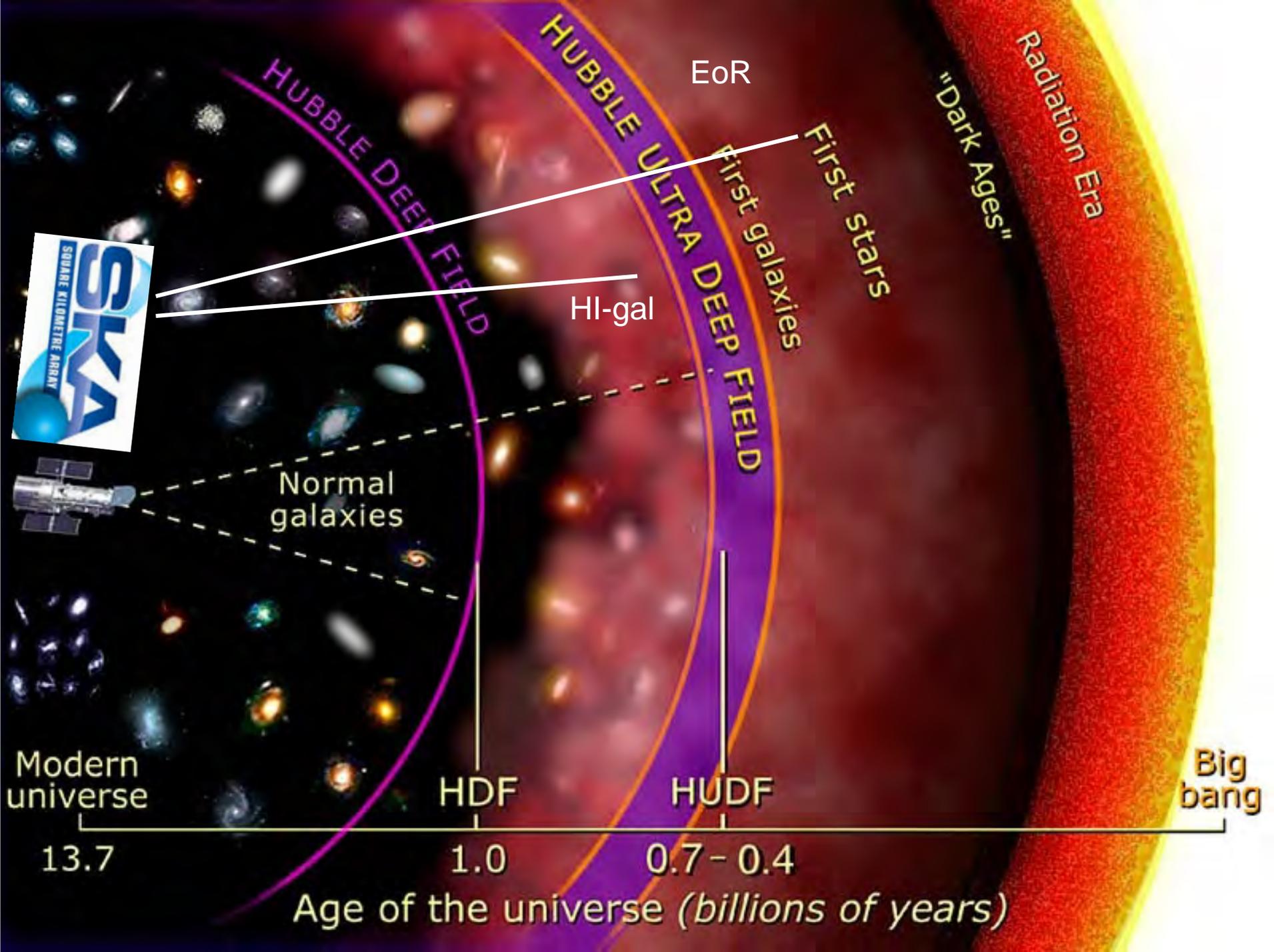
Magnétisme cosmique

Berceau de la vie



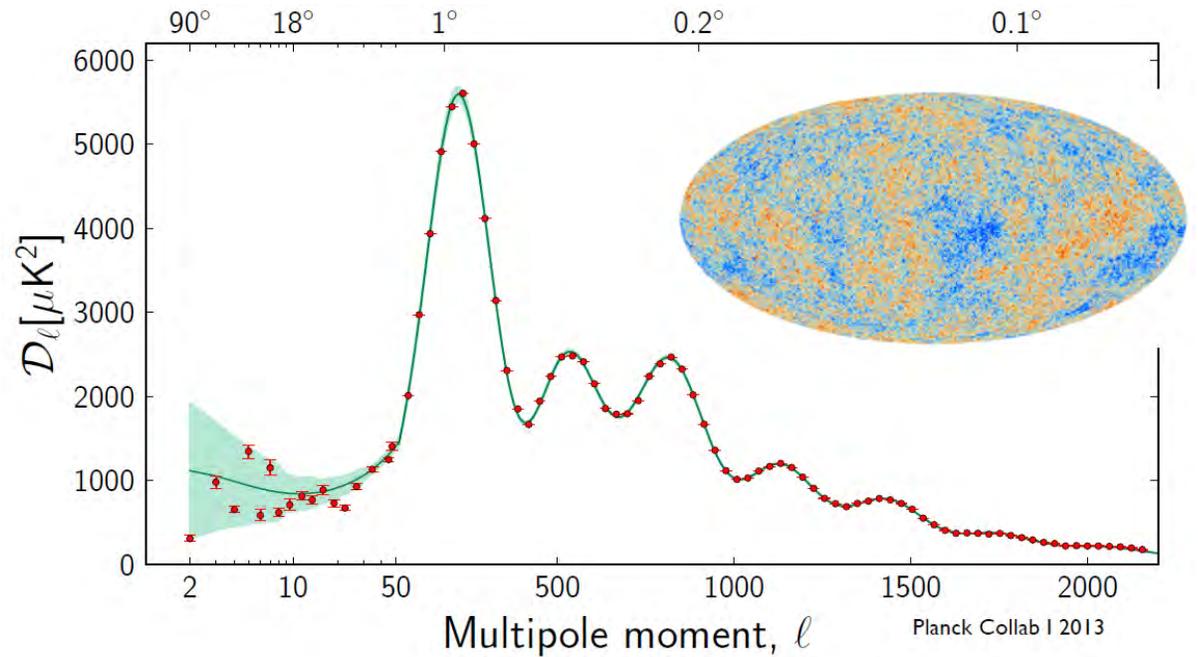
14 groupes de travail





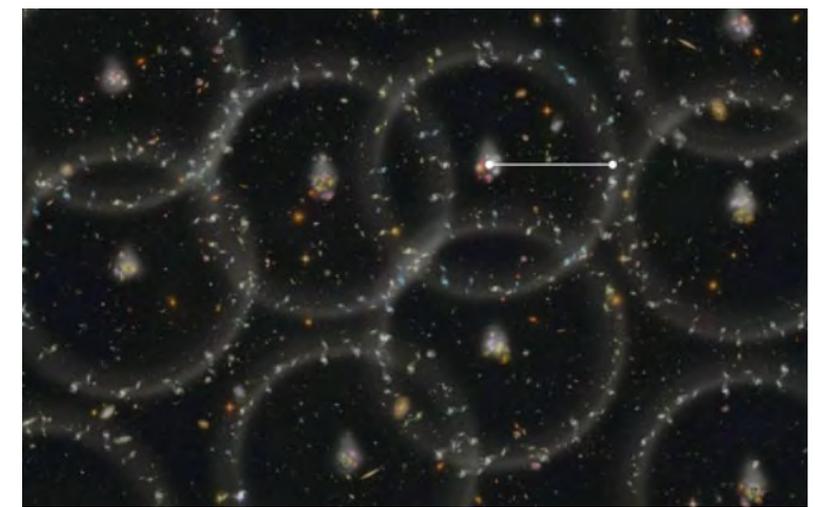
BAO (Baryonic Acoustic Oscillations) avec SKA-1

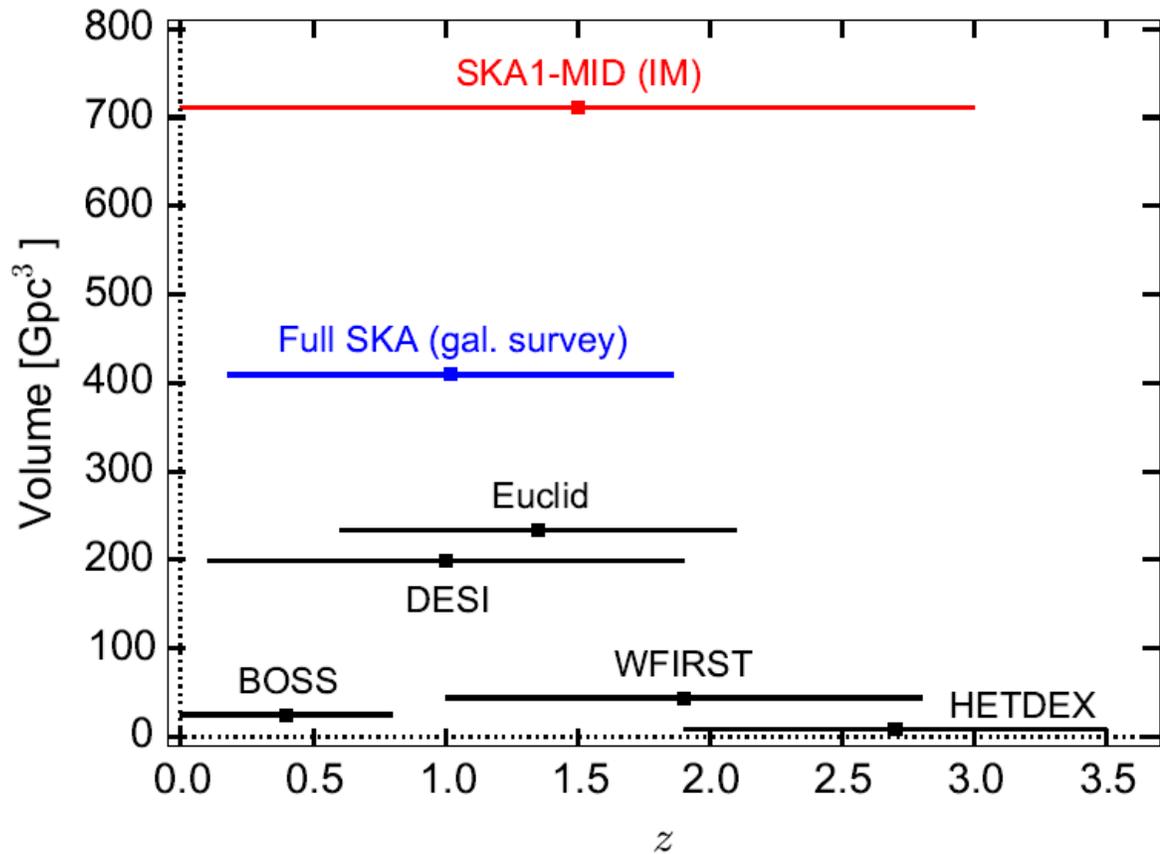
Jusqu'à **380 000 ans** après le Big-Bang, les photons et baryons dansent en équilibre dans des oscillations acoustiques, observées dans le fond cosmologique (CMB)



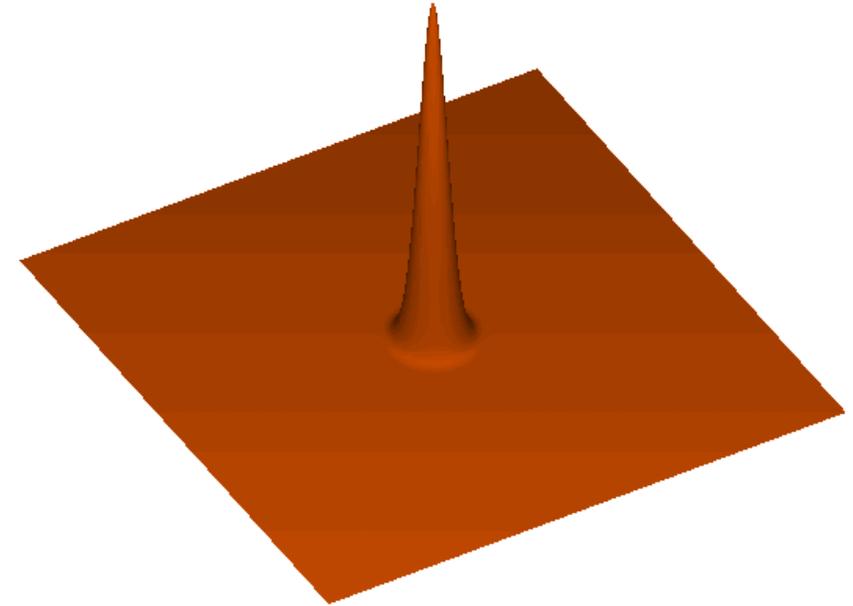
Après la recombinaison, l'hydrogène neutre se découple des photons, les oscillations sont gelées

La plus grande taille est de 150Mpc
Horizon sonore= 450 millions al
➔ Règle pour mesurer l'Univers





Les BAO avec SKA



SKA1: HI cartes d'intensité 30 000 deg² jusqu'à z=3

Profond et large, grand volumes, ~Euclid

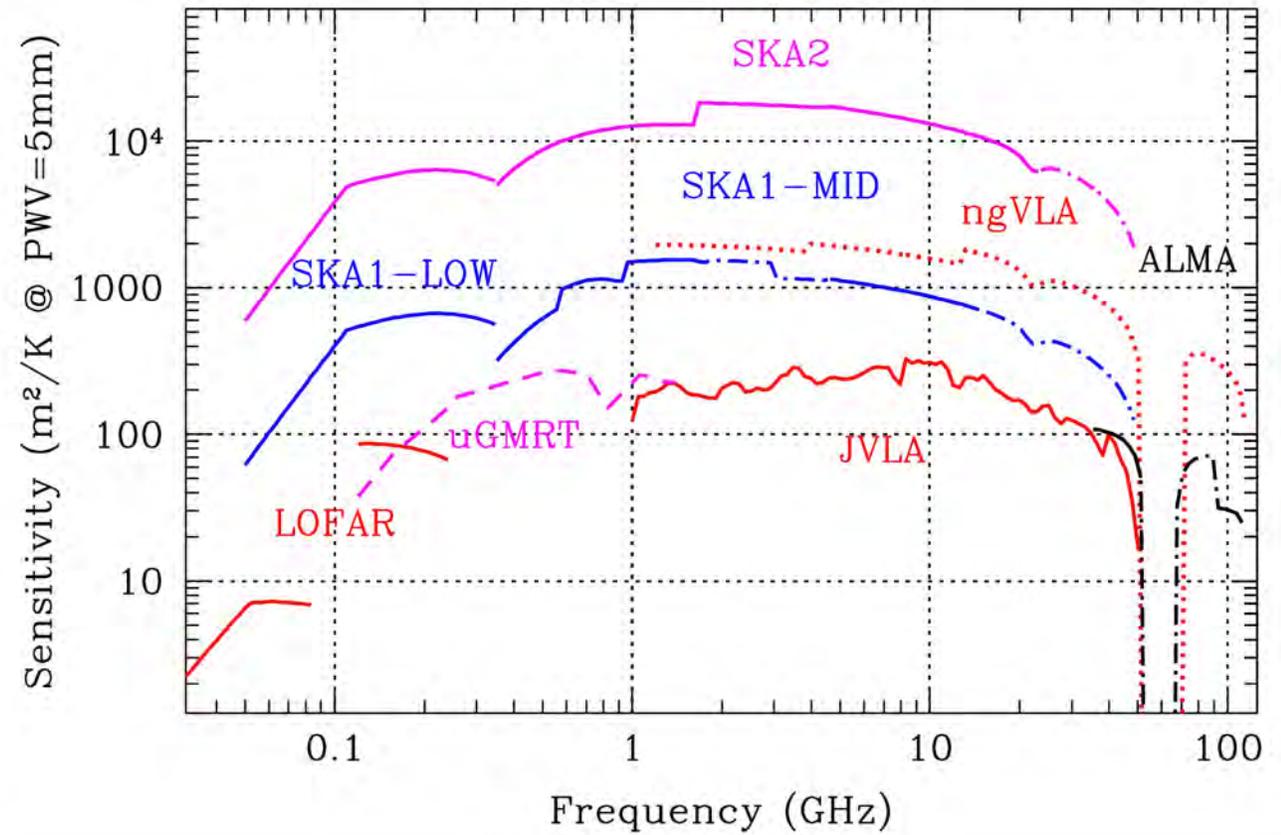
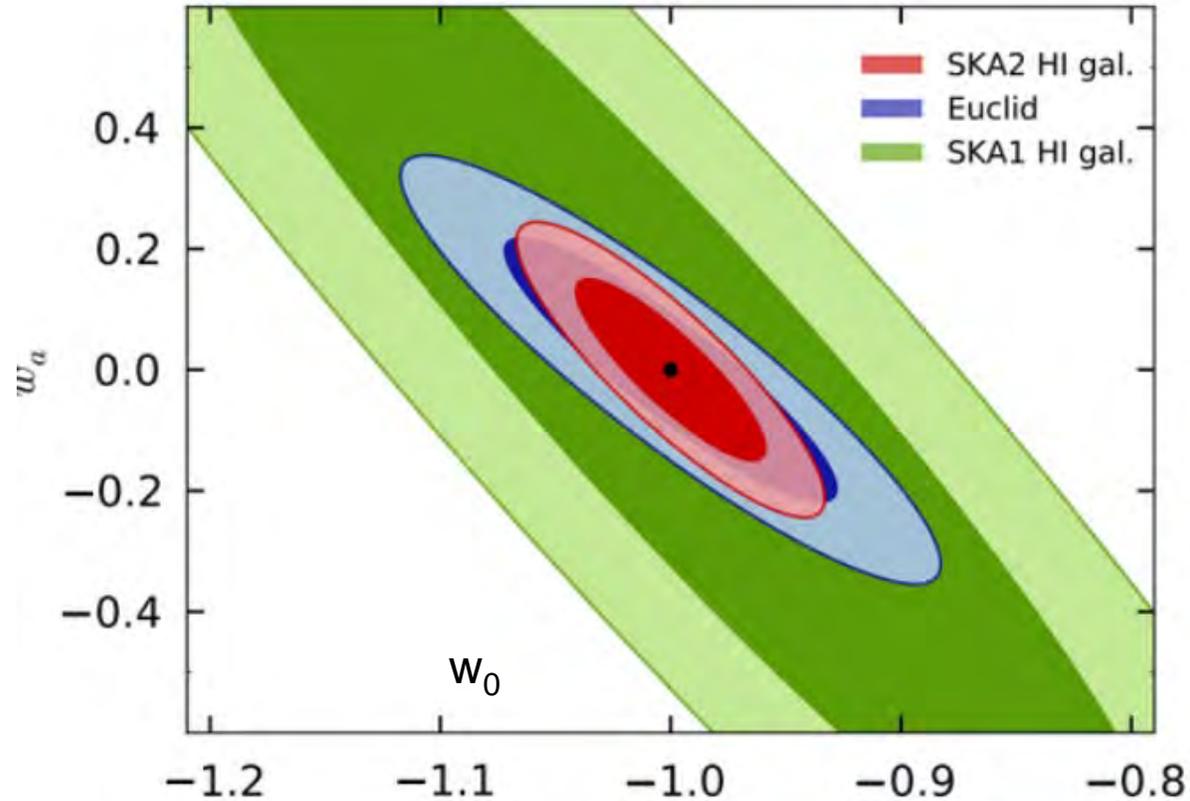
SKA2 fournira un échantillon pur

1 milliard de galaxies en raie HI au total

Cisaillement cosmique

10 milliards de galaxies en continuum

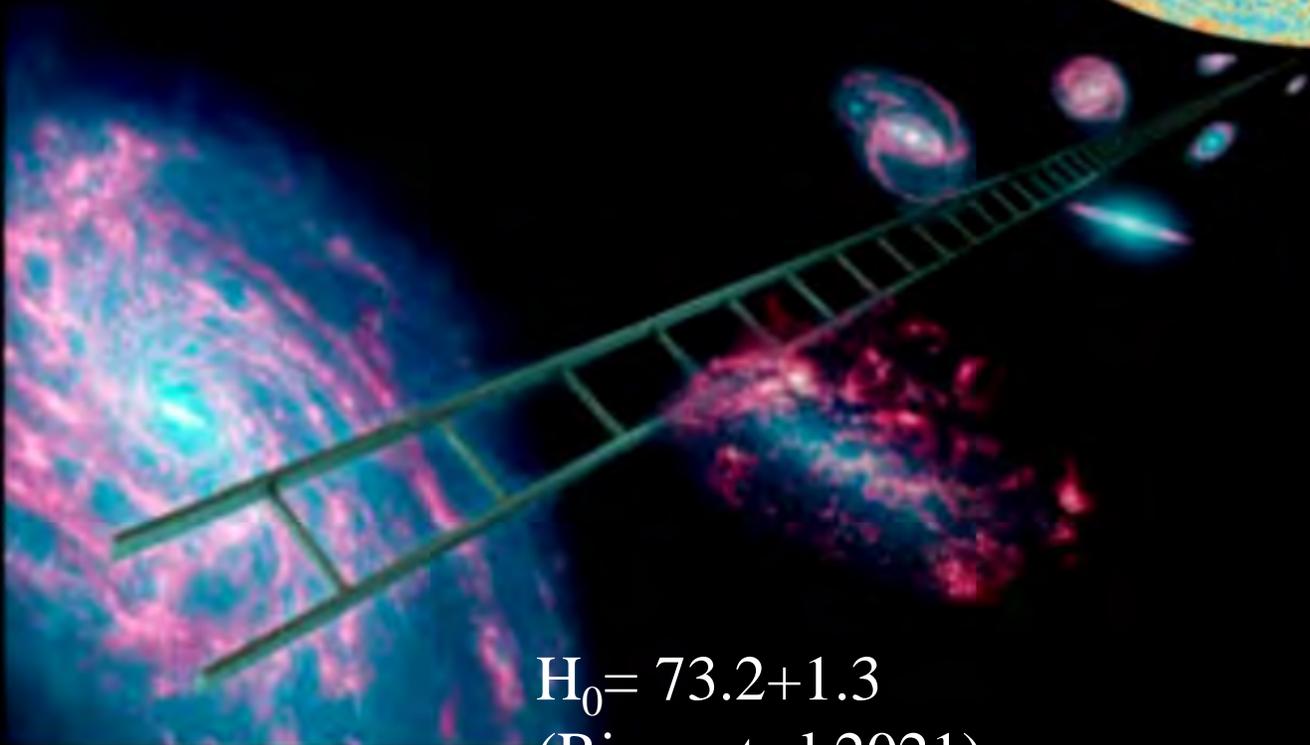
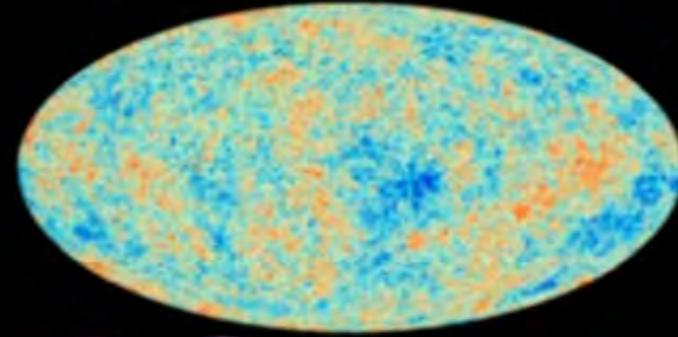
Contraintes sur l'énergie noire avec les relevés en raie HI



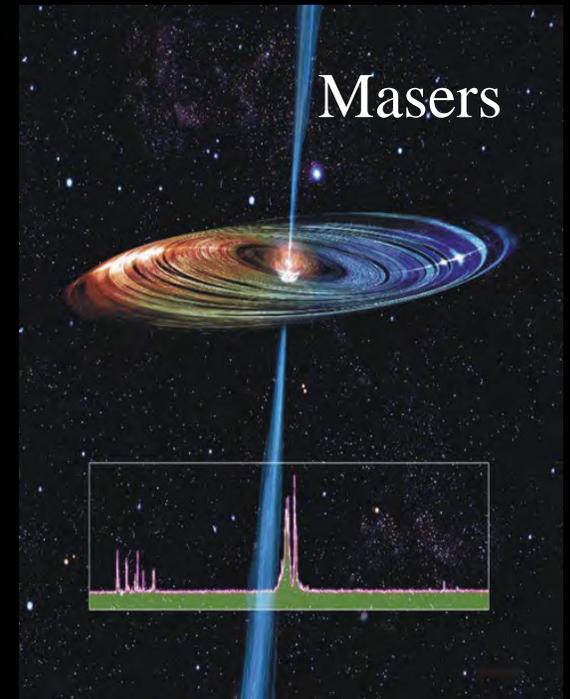
$H_0 = 67.4 \pm 0.5$ (Planck coll 2018)

Le défi de H_0

Désaccord à 5σ

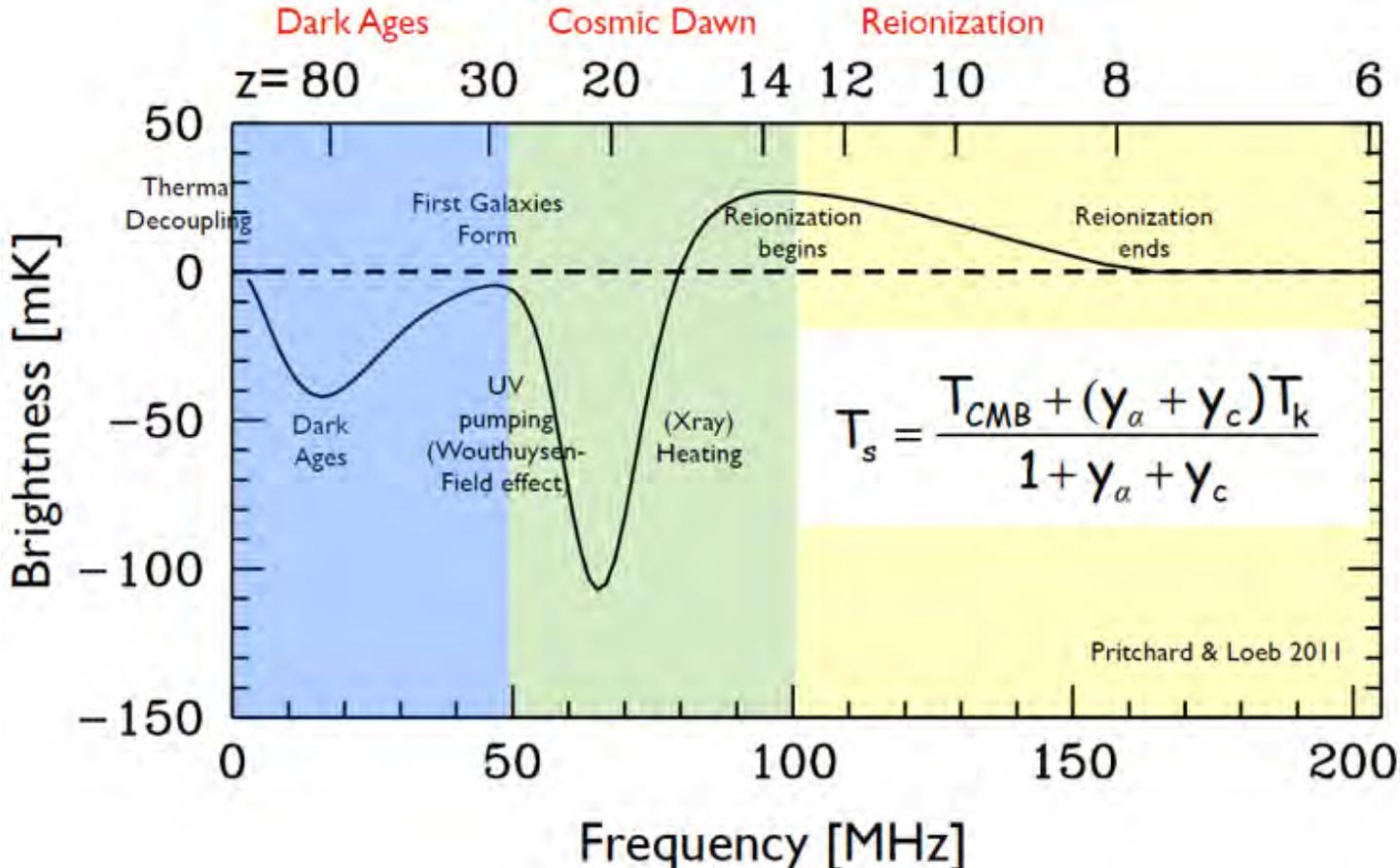
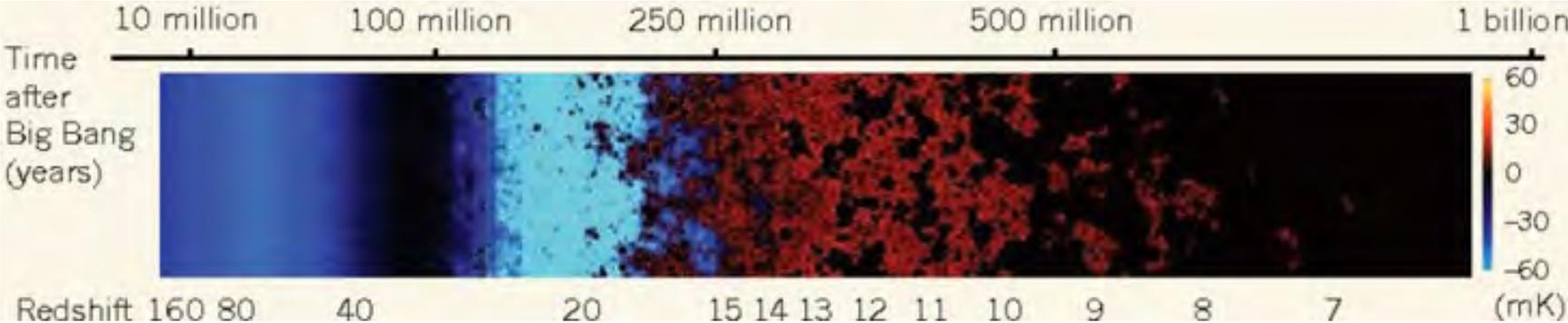


$H_0 = 73.2 \pm 1.3$
(Riess et al 2021)



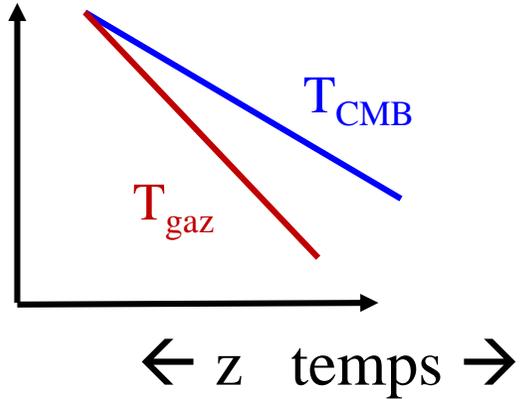
4000 jusqu'à $z=1.5$

EoR: Epoque de la réionization



$$T_{\text{CMB}} = 2.7 (1+z)$$

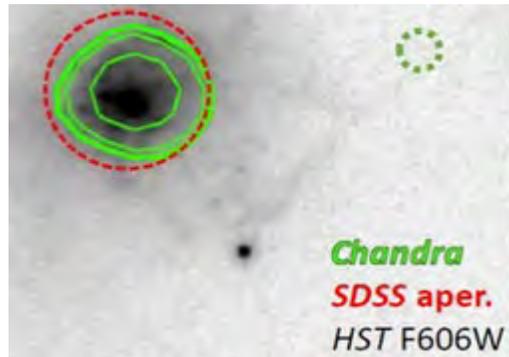
$$T_{\text{gaz}} \propto (1+z)^2$$



Reionisation- galaxies primordiales JWST- ALMA



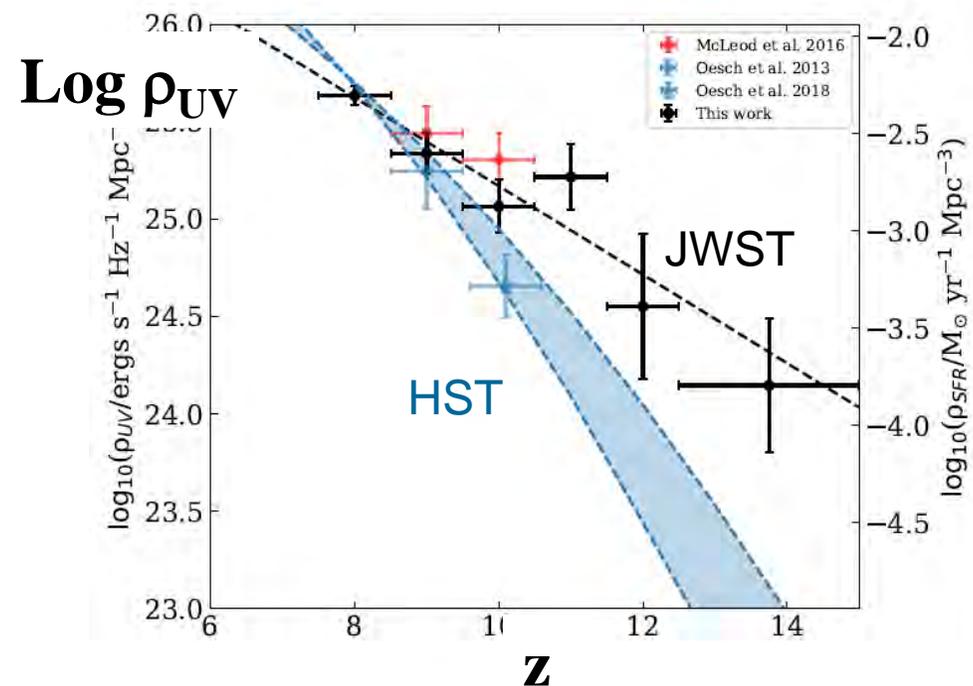
Quasars à grand z : émissin Ly α



Ly α emitters, LAE

ALMA: CO, [CII]

Green Peas (les pois verts)



Donnan et al 2022

Relevés continuum avec SKA1

En 2ans, atteindra $2 \mu\text{Jy rms}$ et
fournira ≈ 4 galaxies $\text{arcmin}^2 (>10\sigma)$

PSF excellente qualité $0.6 - 100''$

Avec une couverture du ciel presque uniforme $3\pi \text{ sr}$

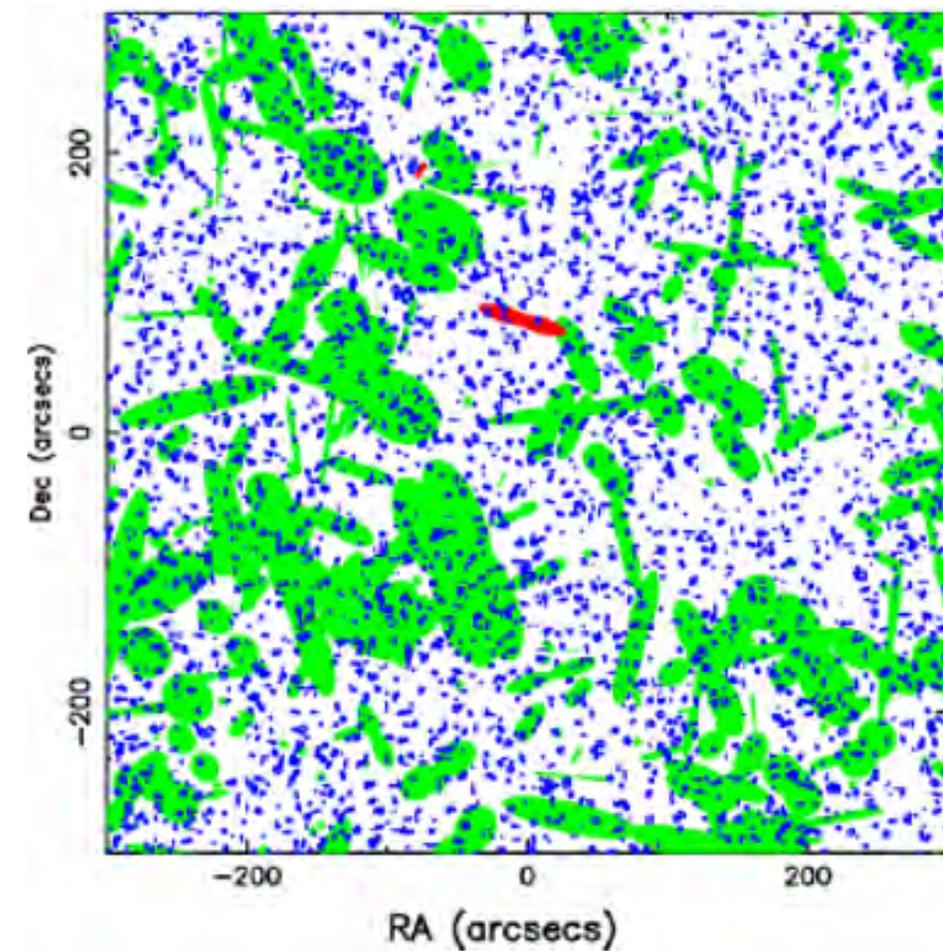
→ Total de **0.5 milliard de sources radio**

Cisaillement cosmique, effet Sachs Wolfe (WL, ISW)

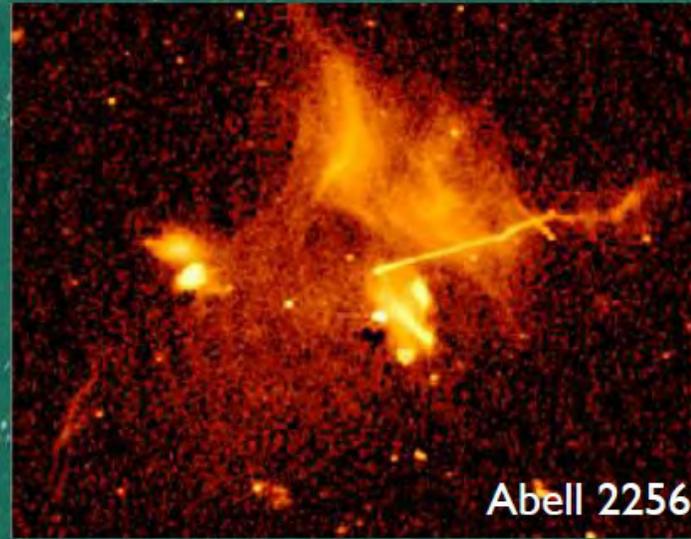
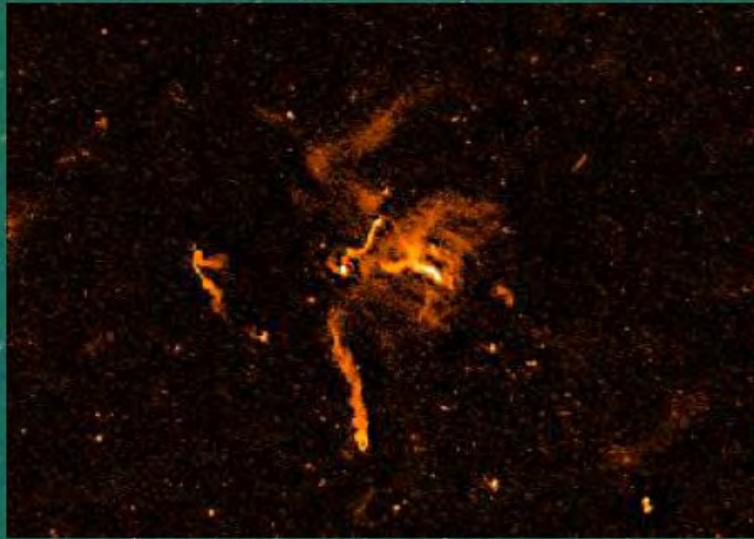
Grand champ (5000 deg^2) $1 \mu\text{Jy rms} \approx 6$ galaxies $\text{arcmin}^2 (>10\sigma)$

Champ profond (50 deg^2) 0.1 mJy rms , ≈ 20 galaxies $\text{arcmin}^2 (>10\sigma)$

→ **Lentilles faibles**

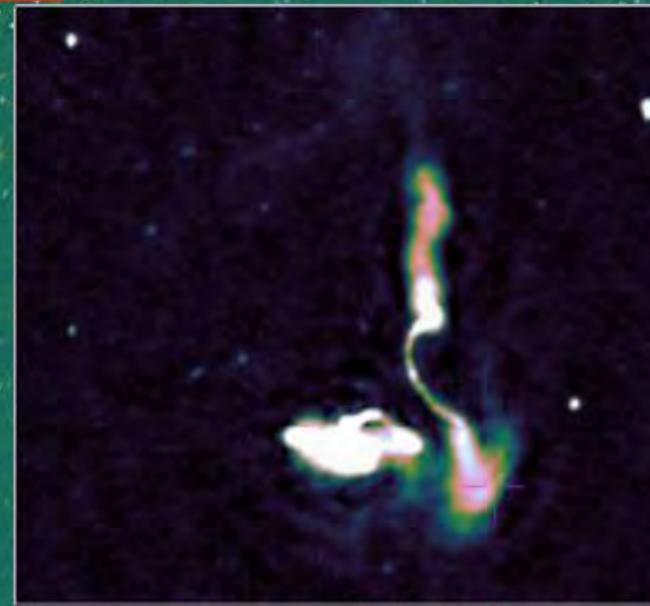


FR II
FR I
galaxies



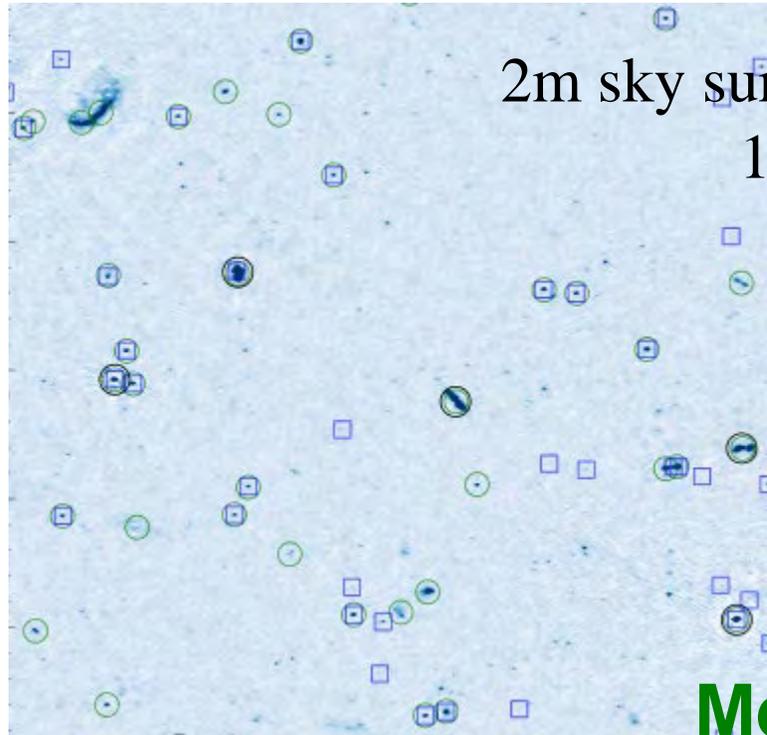
Reliques:
Chocs lors
de la fusion
d'amas de
Galaxies

LOTSS: LOFAR 2m Sky Survey

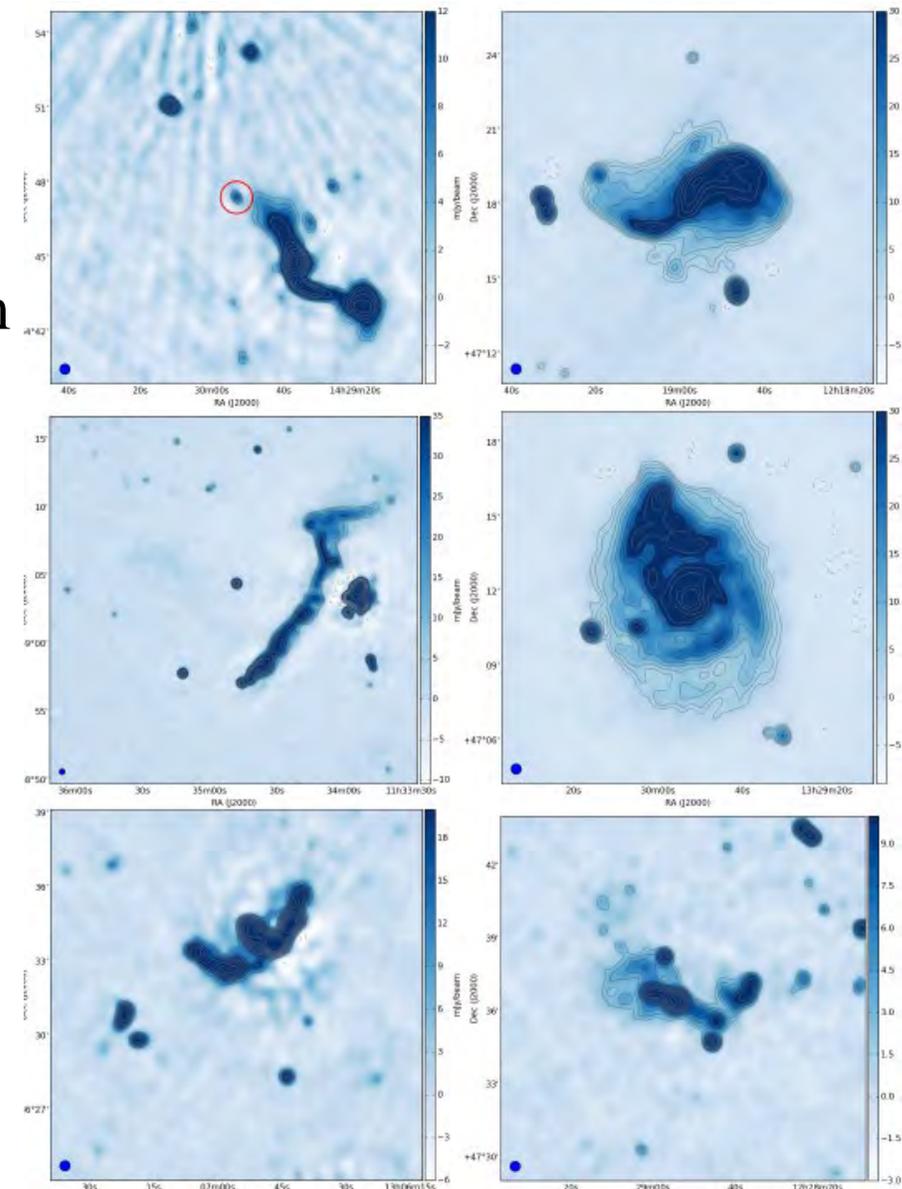


AGN anciens
e- relativistes

LOFAR LOTSS



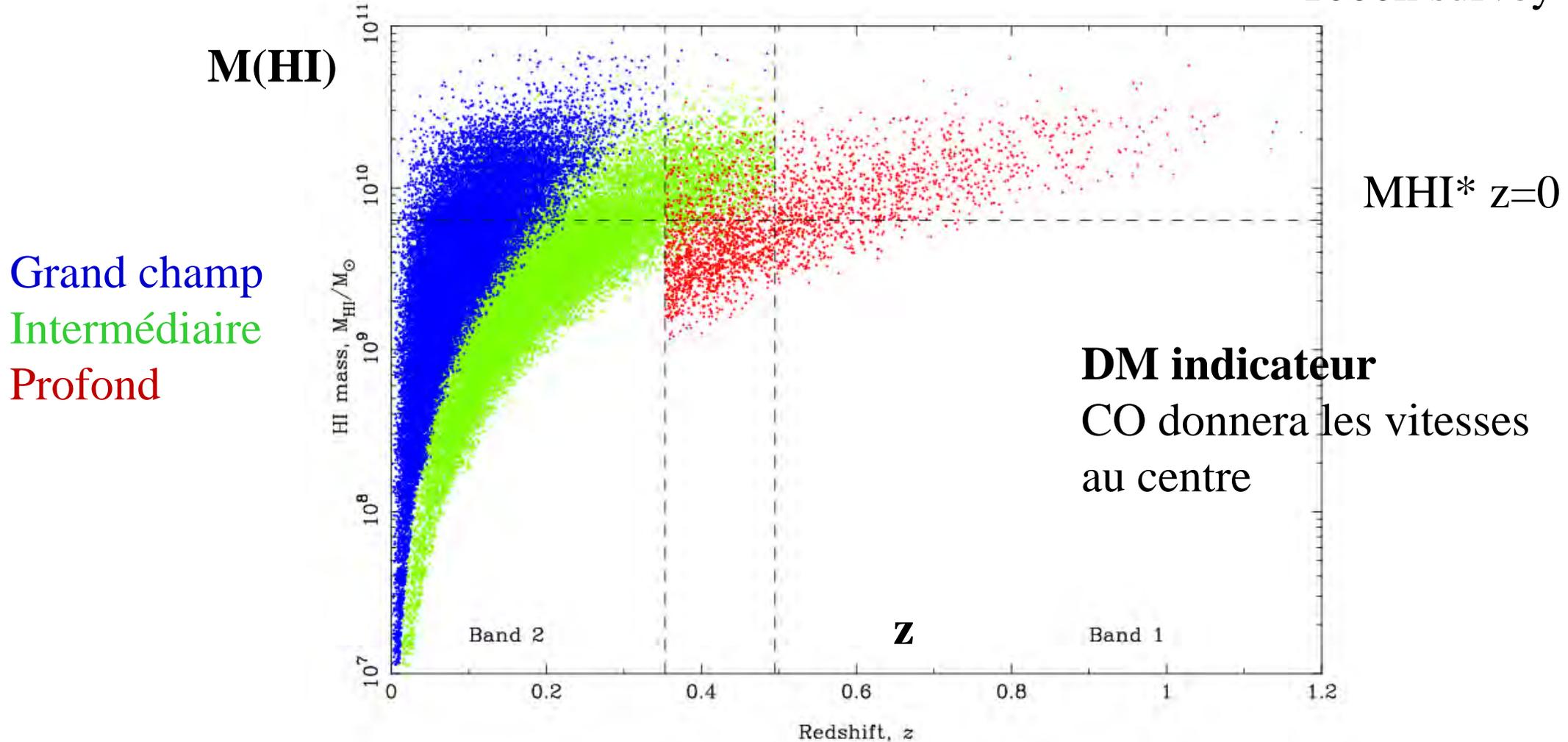
MeerKAT



Des structures synchrotron nouvelles
Entre les lobes radio

Gaz HI & matière noire dans les galaxies

1000h survey



Etude des courbes de rotation HI jusqu'à $z \sim 1$ avec SKA1
Jusqu'à $z \sim 2$ avec SKA2

Staveley-Smith & Oosterloo 2015

NenuFAR

en chiffres...



3 instruments en 1
réseau phasé autonome
imageur autonome
super station LOFAR

un réseau total
de **1 938** antennes
situé à Nançay

96
mini-réseaux

6
mini-réseaux
distants

400 m
de diamètre au
cœur du réseau

180 km
de câbles
coaxiaux

60 000 m²
d'aire effective
à 25 MHz

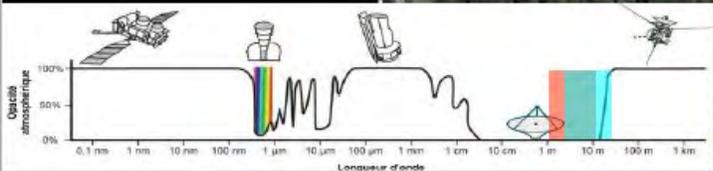
10 à 85 MHz
de gamme de fréquence
(longueurs d'onde
de 3,5 m à 30 m)

19
antennes dans
1 mini-réseau

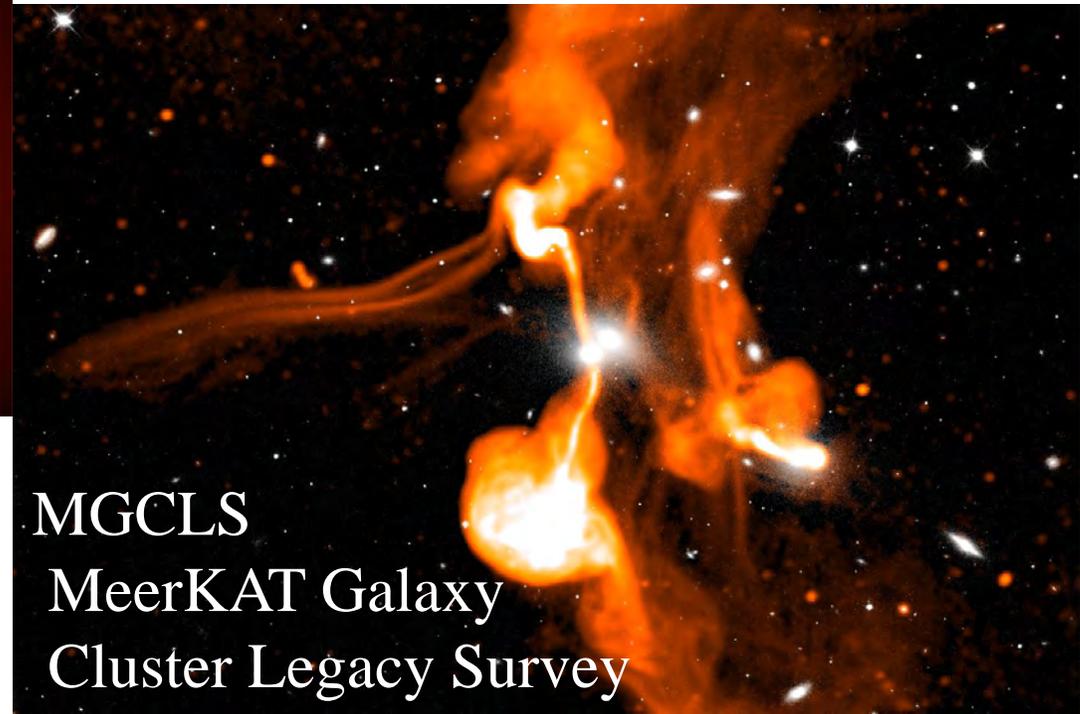
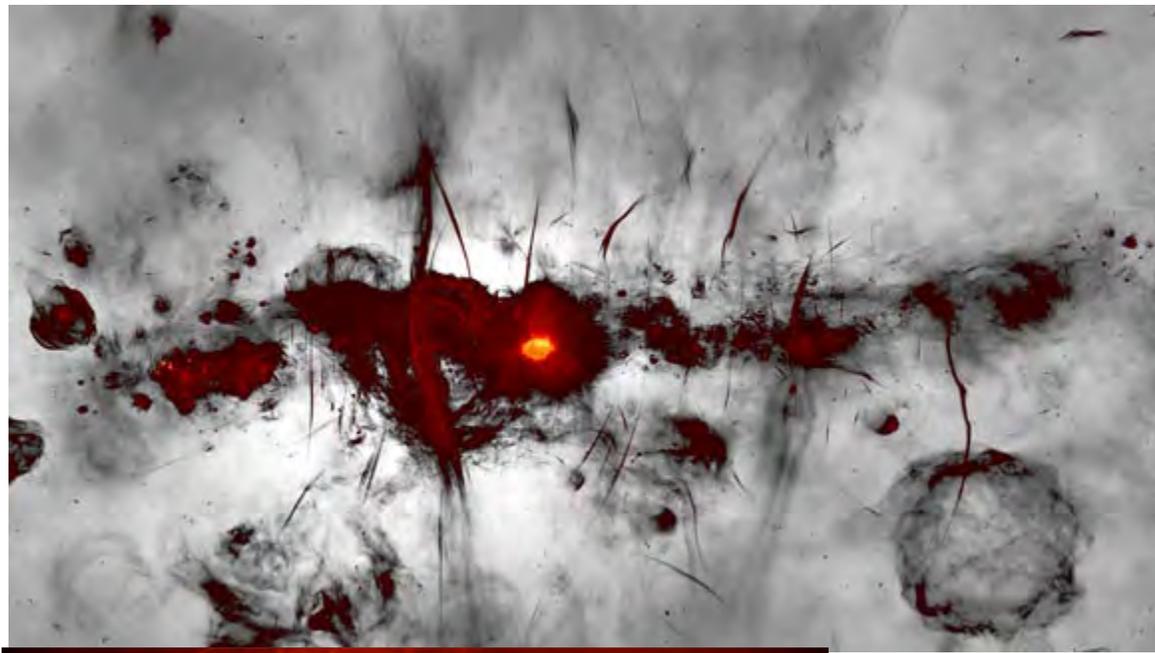
3 km
de distance
au mini-réseau
le plus éloigné

600 Gbits/s
de volume de données
traitées en temps réel
24/7

10 Po
de données brutes
traitées par an



MeerKAT



MGCLS
MeerKAT Galaxy
Cluster Legacy Survey

Science de SKA (résumé)



Cosmologie: nature de la matière et énergie noire?
Outils de haute précision, BAO, RSD, HI des galaxies
 H_0 , masers

EoR: comment sont nées les premières galaxies
+ JWST+ALMA

Pulsars: test nouvelle physique, gravité en
champ fort, Ondes Gravitationnelles

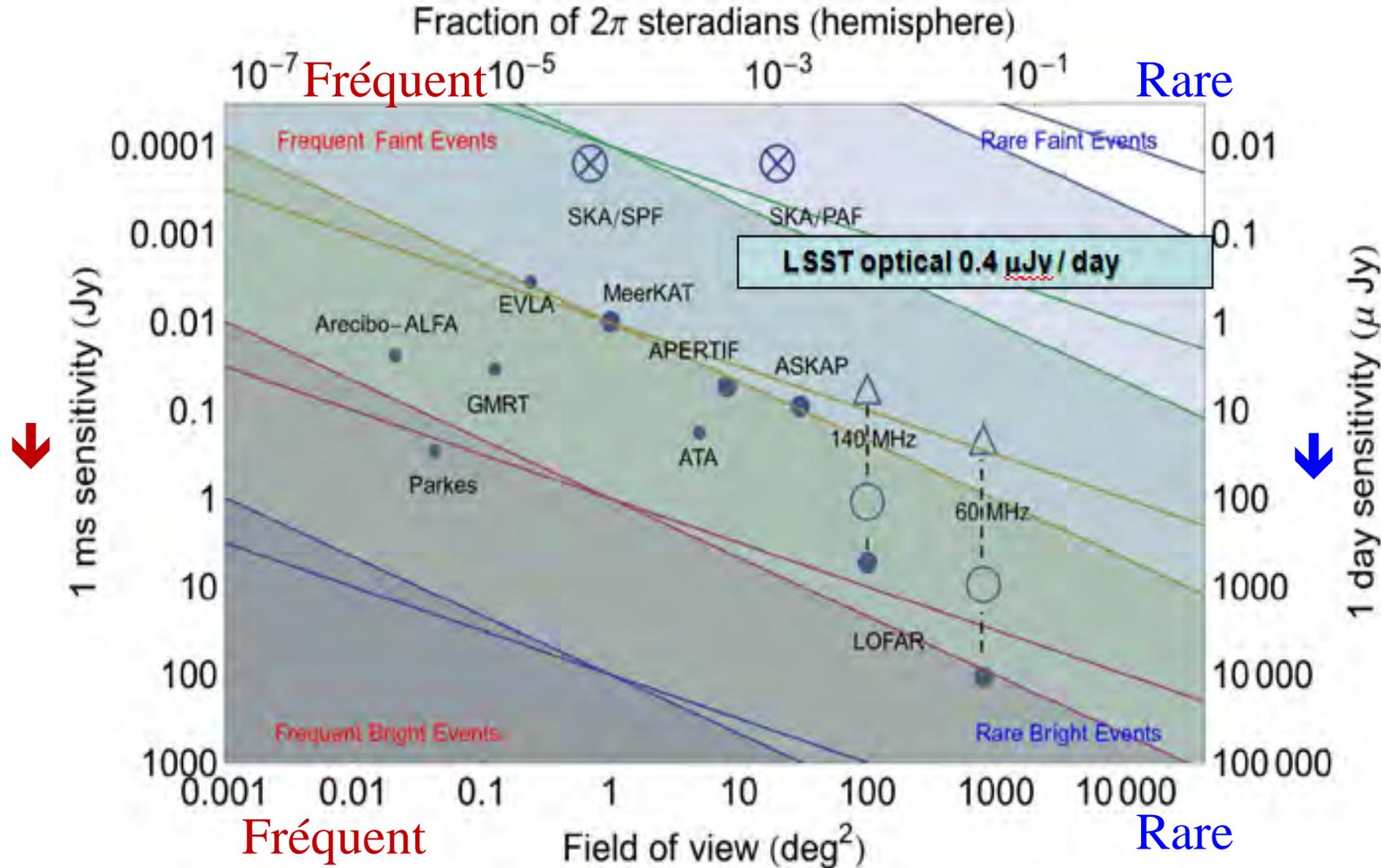
Galaxies proches, haute sensibilité, loin en rayon,
haute résolution, naines, UDG (Ultra-Diffuses)
émission et absorption



Une nouvelle dimension: le ciel variable

LSST: millions d'alertes/jour, SNe, AGN, astéroïdes, étoiles variables Voie lactée
Micro-lentilles, etc..

SKA: 5 FRB par jour



Pop III SN?

Fender & Bell 2011

Traitement des données

Un énorme défi, SKA: qqs Petabytes/sec

Machines Petaflops travaillant en continu (10^8 PC)

Qq Exabytes/h, paraboles=**10x internet global**,

Réseaux Phasés =**100x le trafic internet global!**



LSST: plus de la moitié du coût est dû aux data processing!

1-2 millions d'alertes par nuit, disponibles à tous en 60sec

20 Tbytes /nuit → 400 Pb stockés en 10ans

Tous les 3 jours on observe tout le ciel $18\ 000^\circ 2$

3200 Mpixels, 10 deg², 15s/pose

LSST

Euclid:

100Gb/jour

