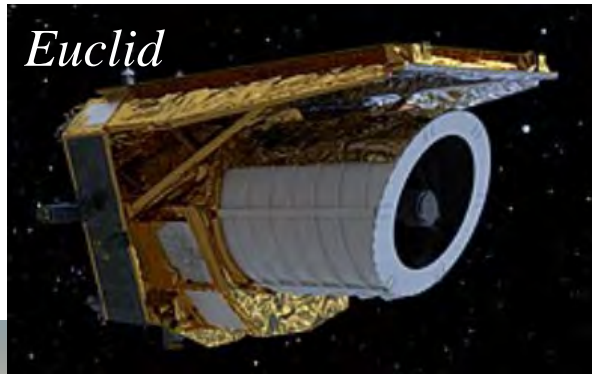




COLLÈGE  
DE FRANCE  
—1530—

*Chaire Galaxies et Cosmologie*

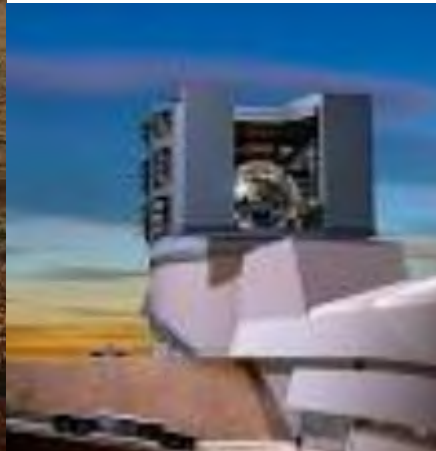
# Perspectives à dix ans



*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  $0.5^{\circ 2}$

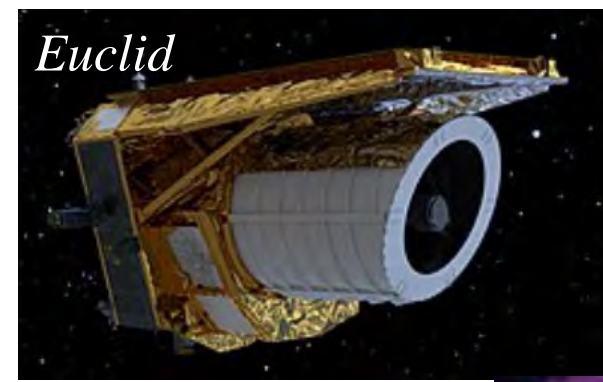
→ Nancy-Grace Roman (NASA): Energie noire et exoplanètes (~2027-32?) **2.4m**, VIS/NIR +Corono

Champ  $0.3^{\circ 2}$

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

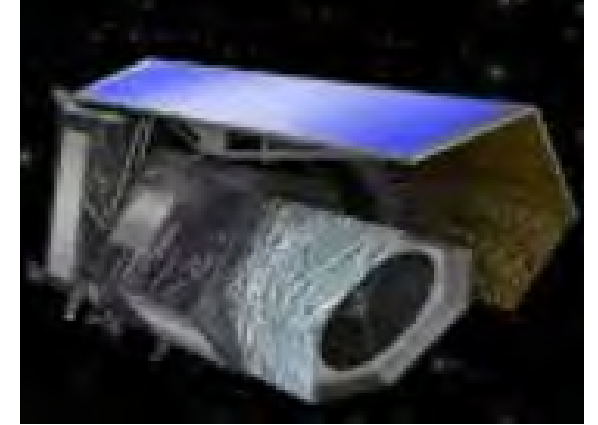
Aspect temporel: Observer tout le ciel en 3 jours  $\sim 10^{\circ 2}$

→ 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





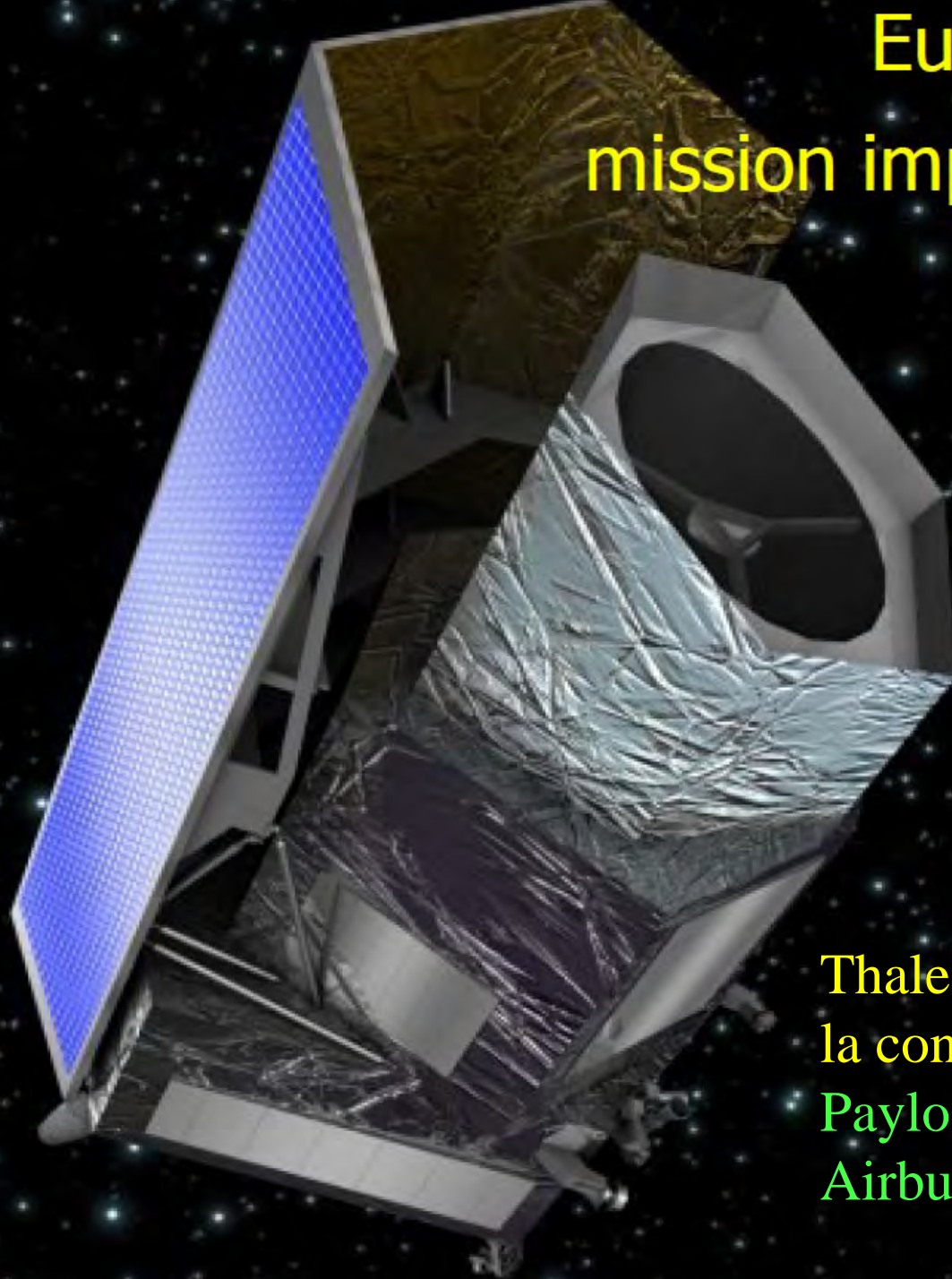
Galaxie IC342  
VIS+NISP  
8800x8800 pixels  
3 couleurs

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!

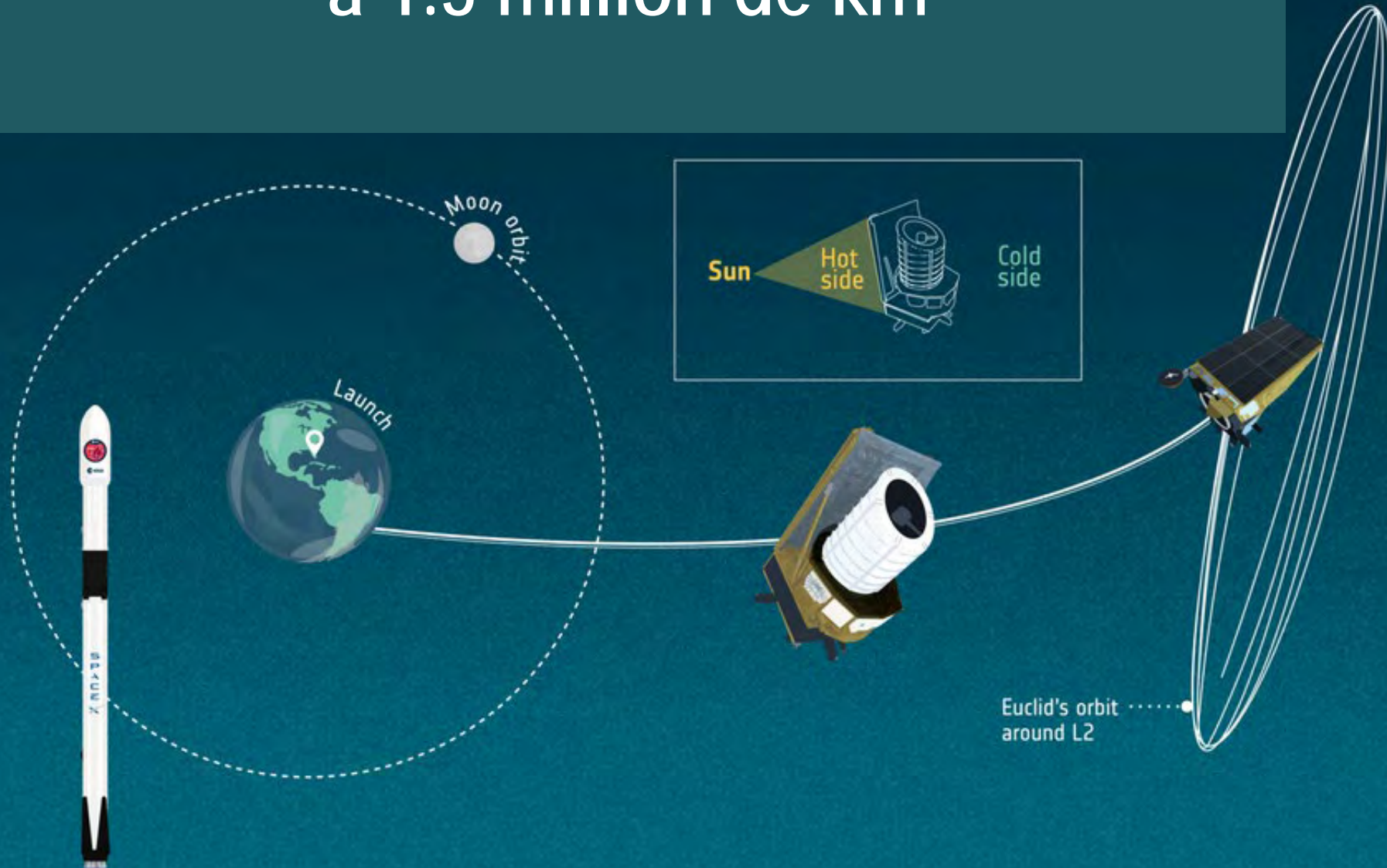
**1 juillet**, départ de Cap Canaveral, sur un Falcon 9 de Space X

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

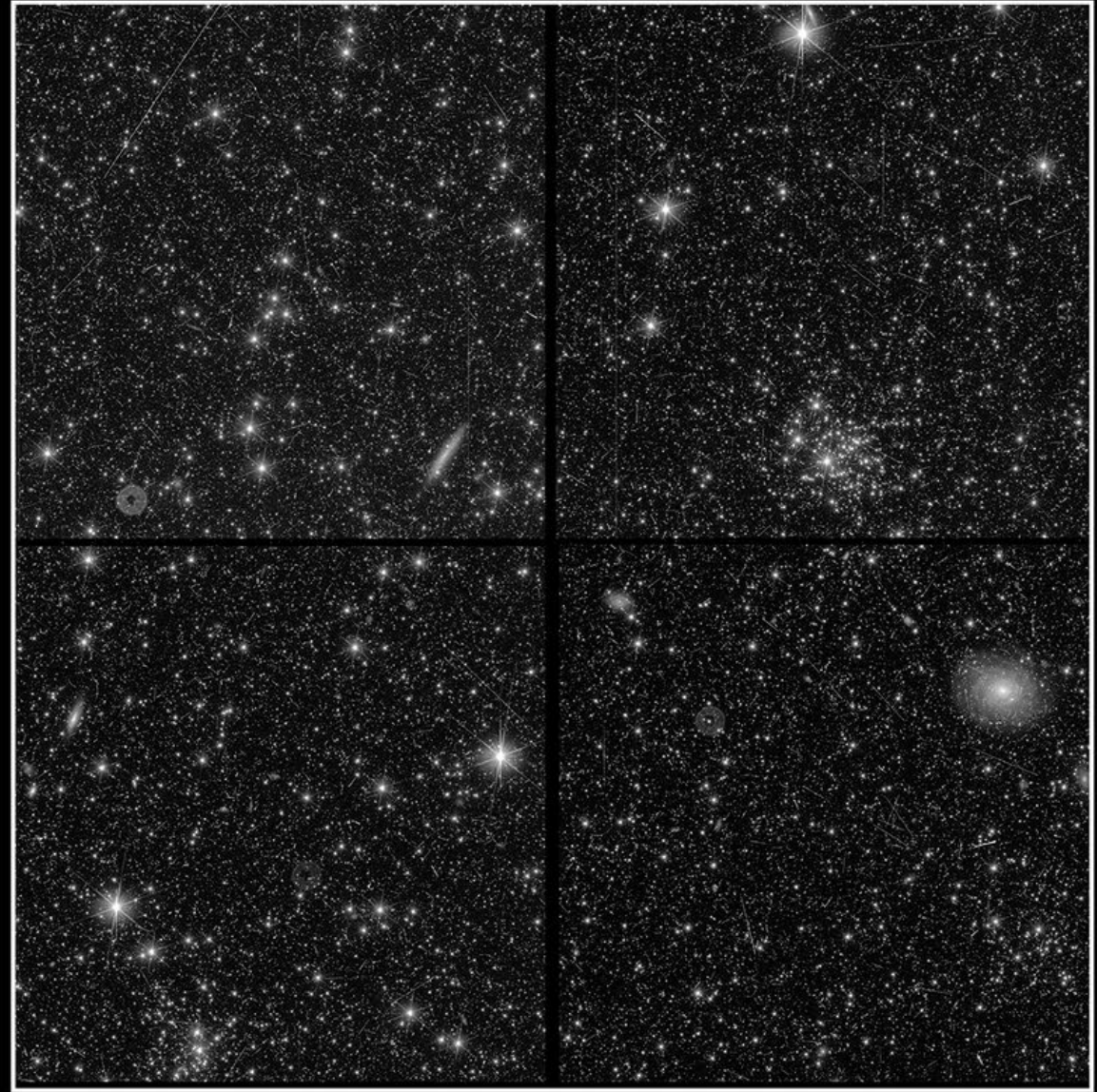
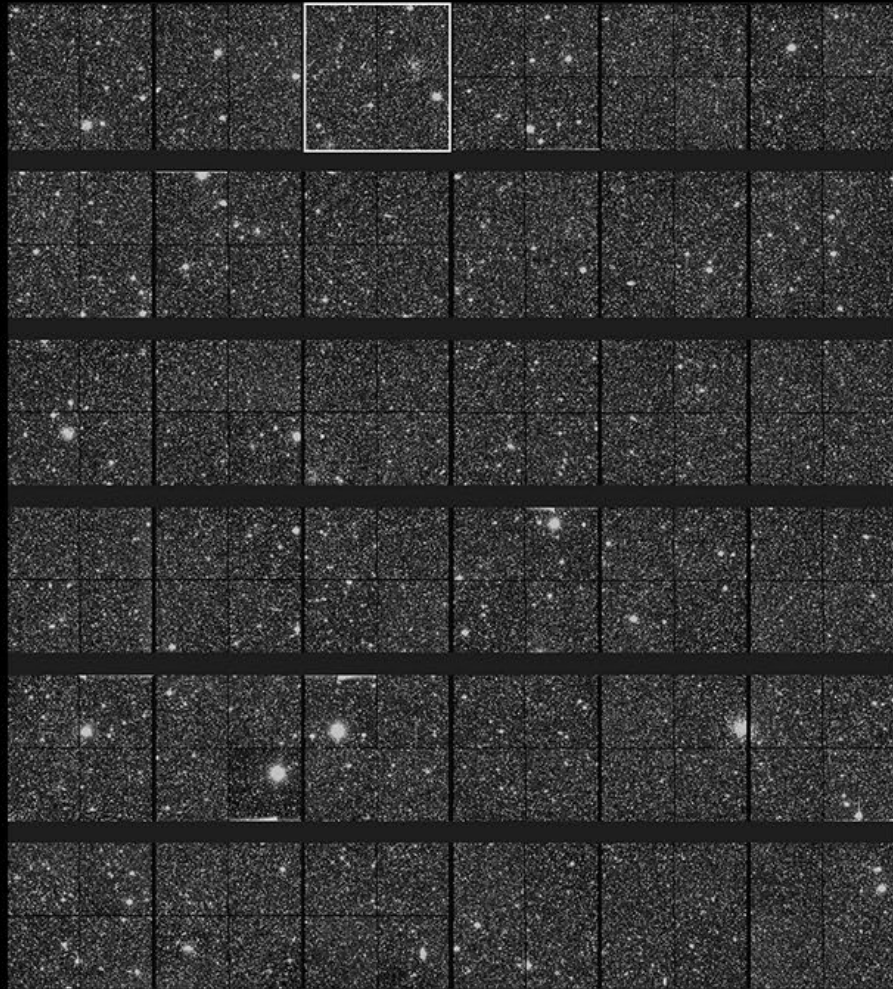




# Les premières images

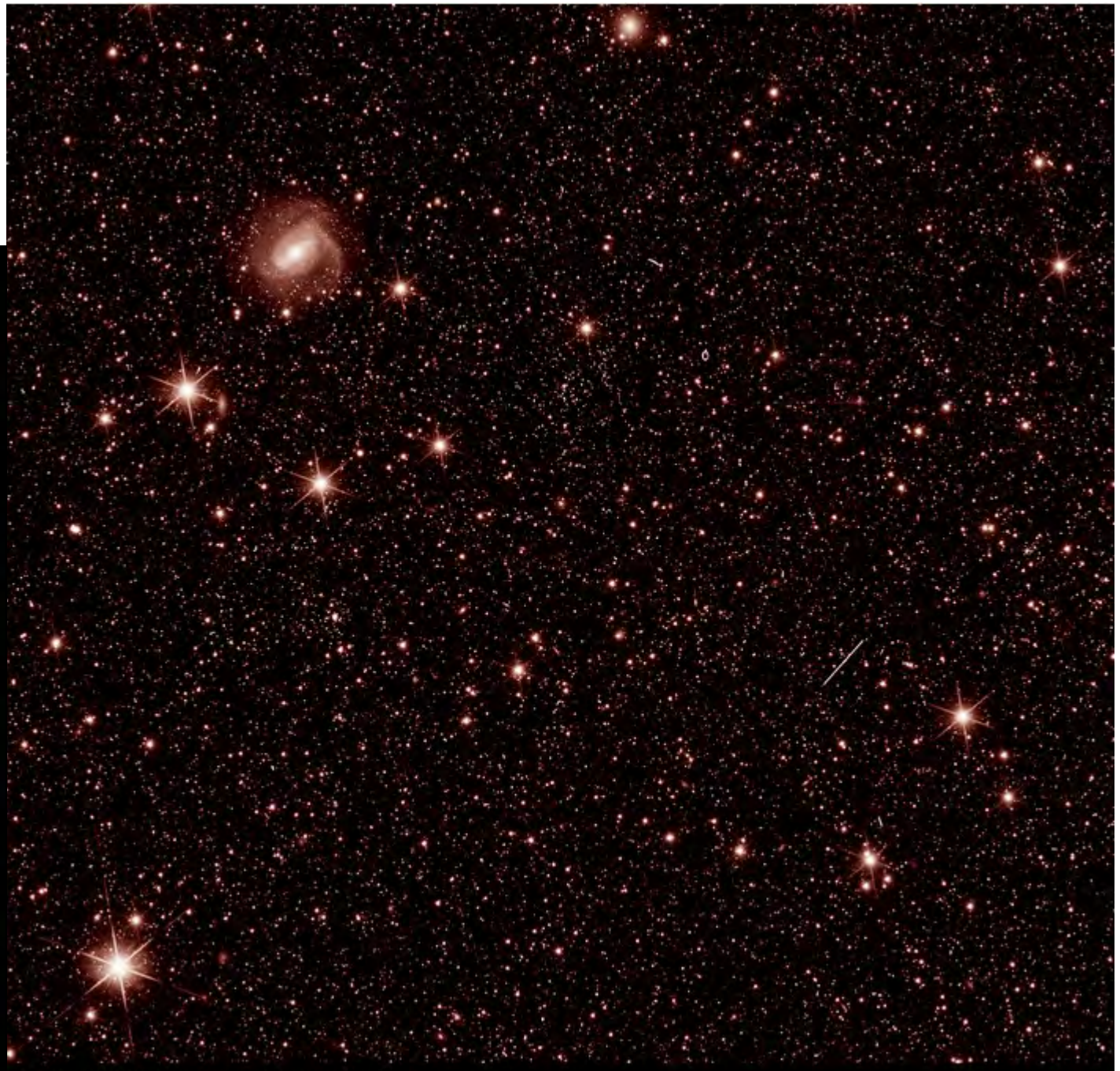
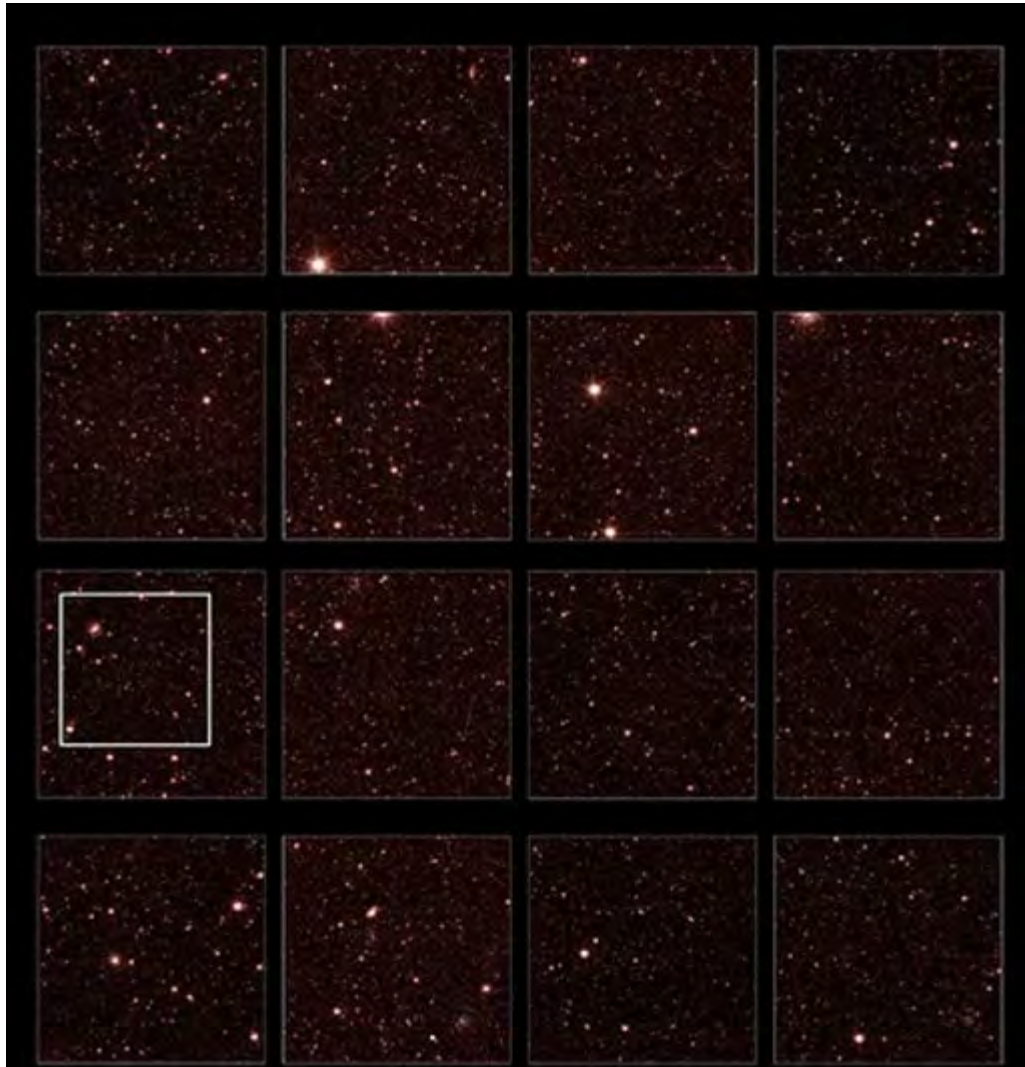
9min intégration, 36 détecteurs VIS, dans le visible

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





# NISP proche infrarouge (16)



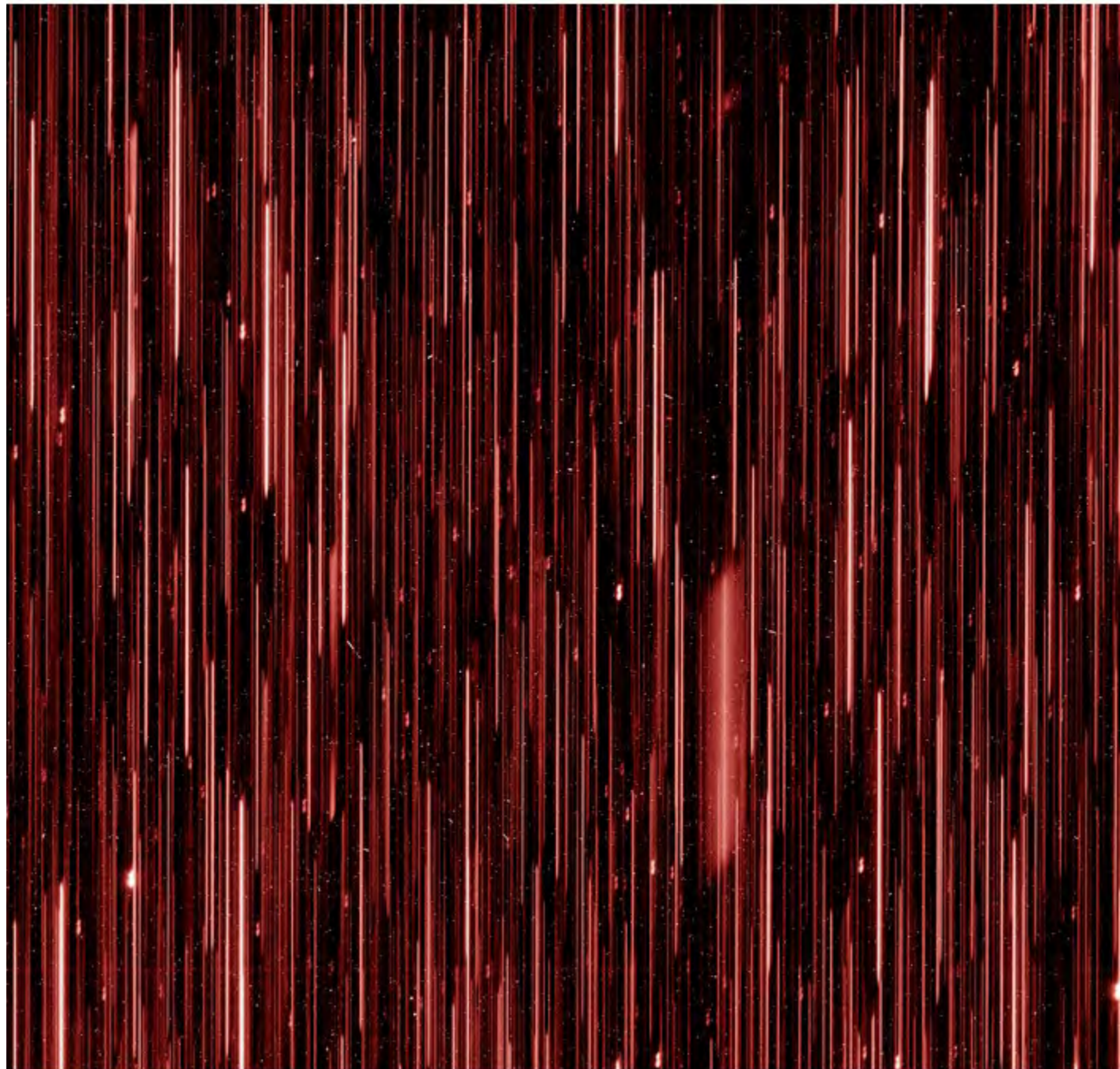
Early commissioning test image, NISP instrument



# 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 deg<sup>2</sup> 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 deg<sup>2</sup> + 40deg<sup>2</sup> 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**

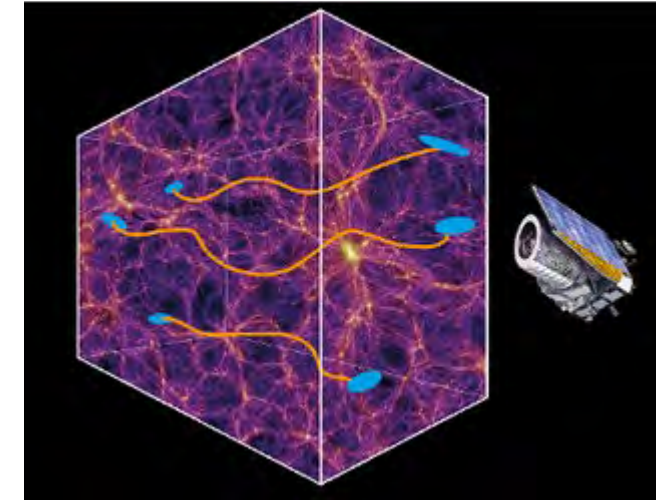
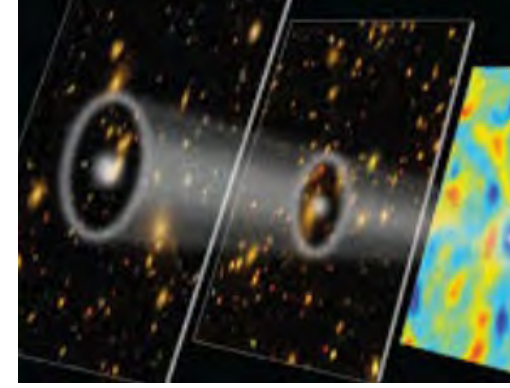
Les **amas de galaxies**

**RSD** Distorsions Redshift-espace

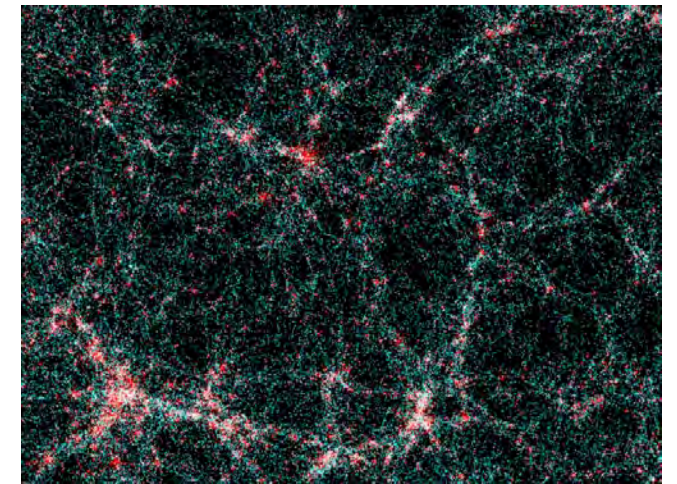
**ISW** Sachs-Wolfe Intégré

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**

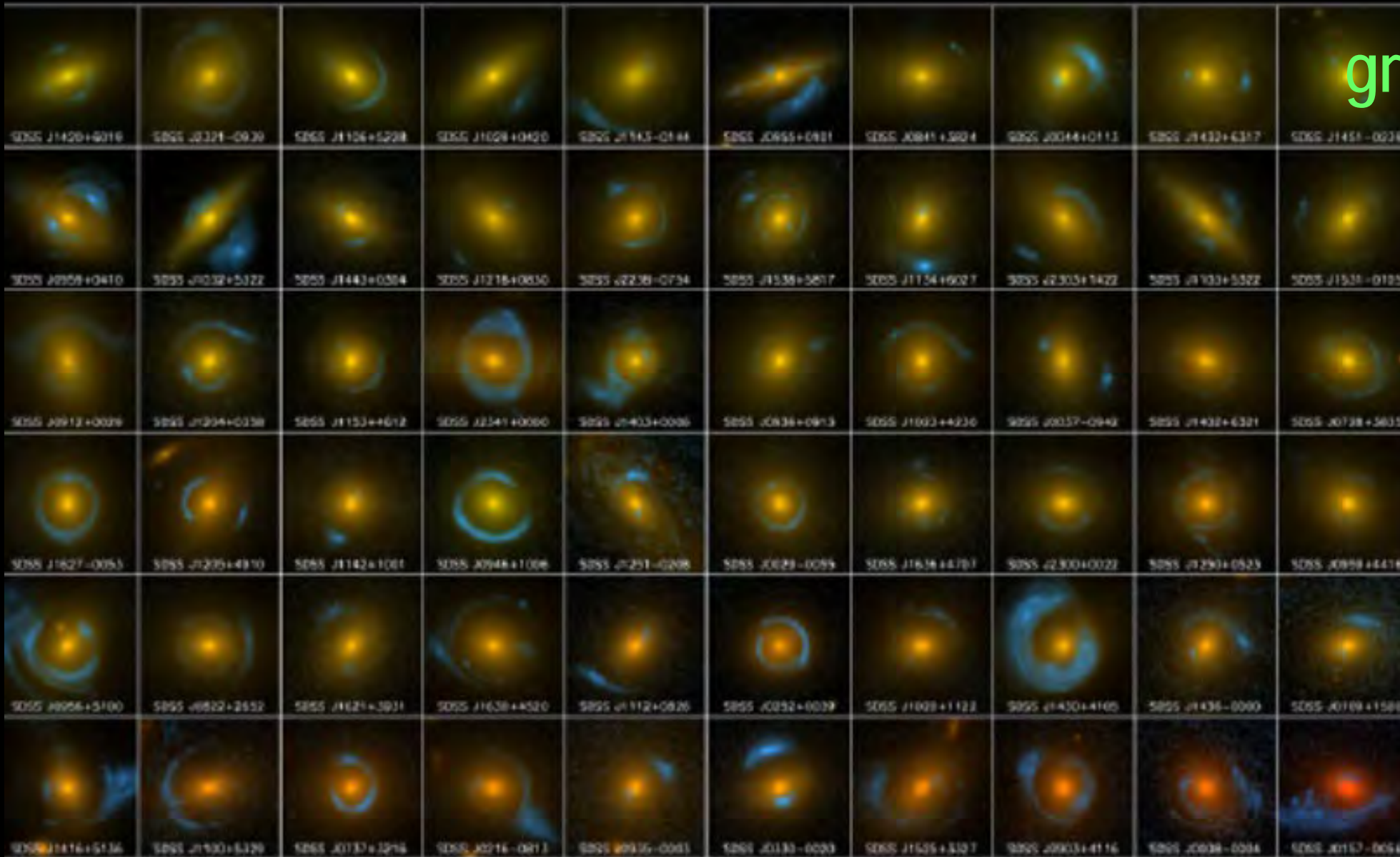


$$f = d \log (\delta) / d \log (a)$$



# SLACS (~2010 - HST)

Lentilles  
gravitationnelles  
fortes



SLACS: The Sloan Lens ACS Survey

[www.SLACS.org](http://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)



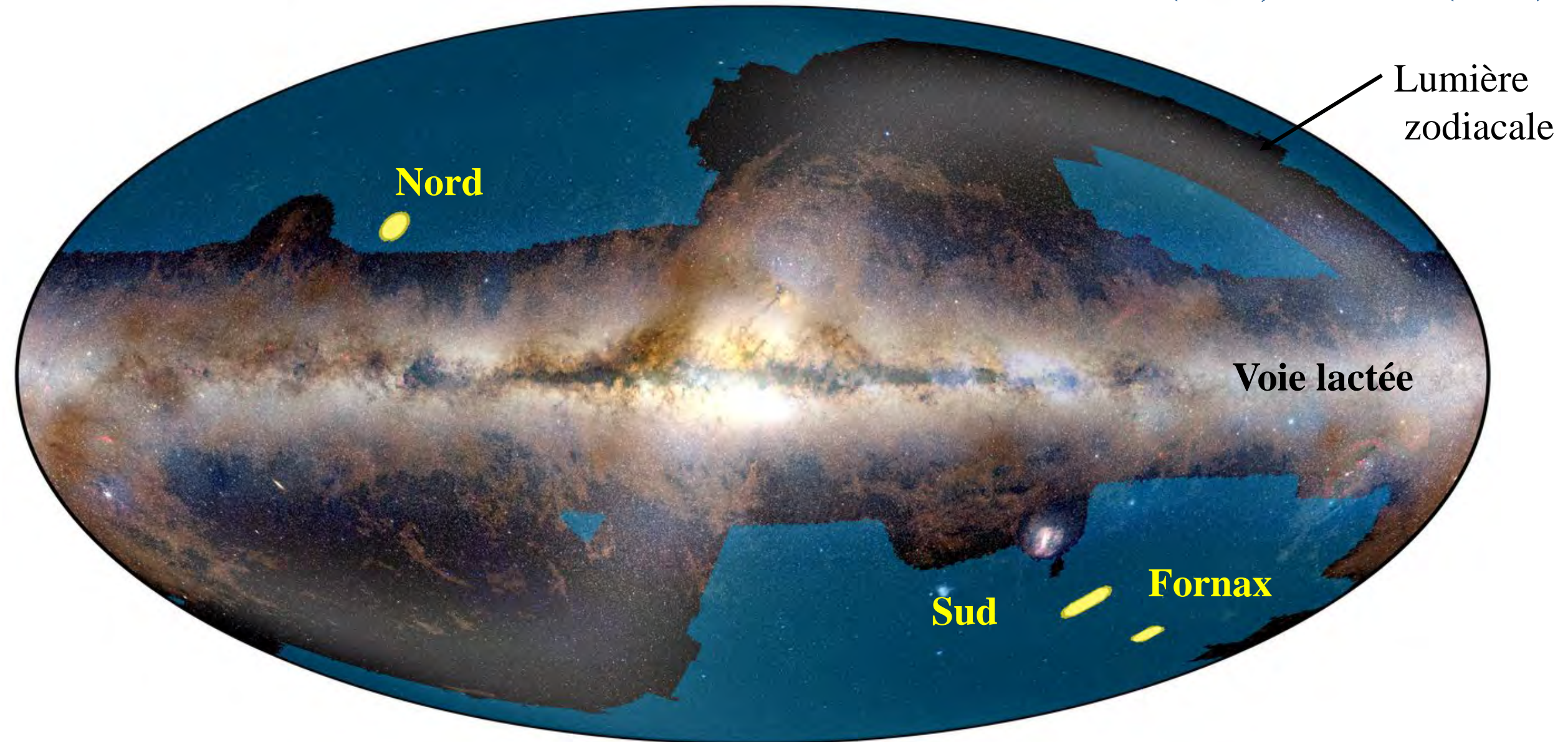
# Va devenir une industrie

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 ( $10^{\circ 2}$ ))

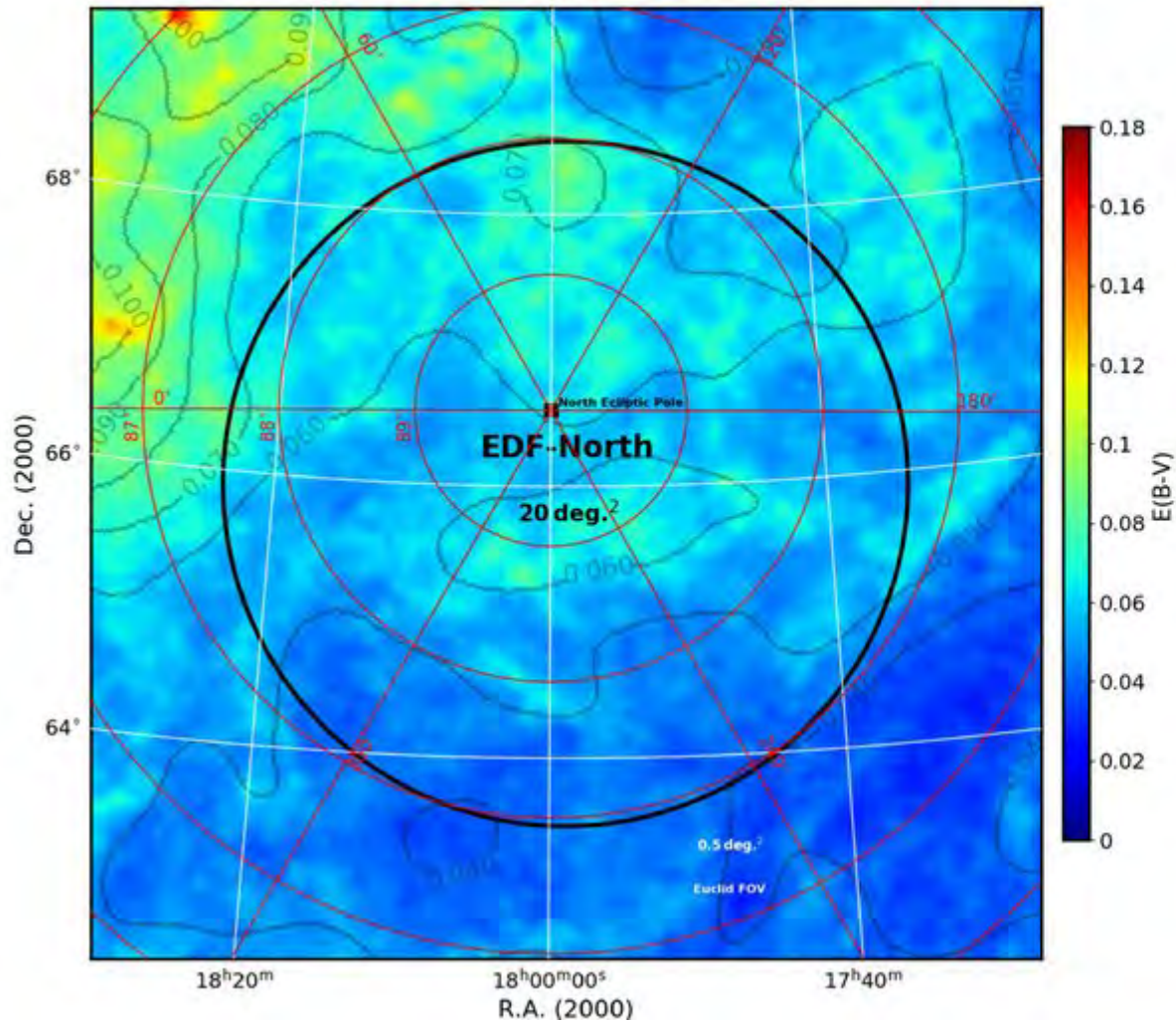




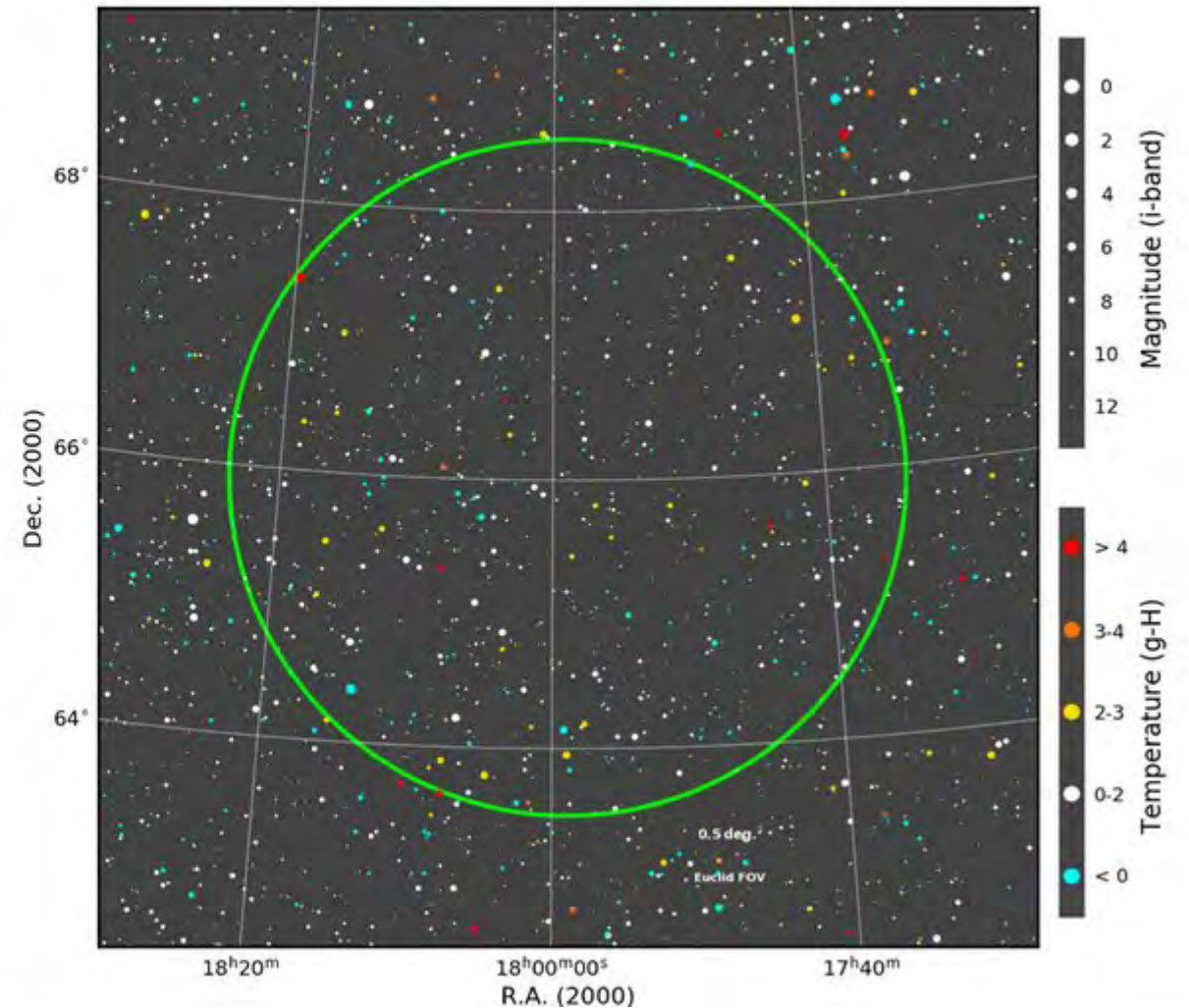
# Champ profond du Nord EDF-N

## Reddening: E(B-V)

Ecliptic

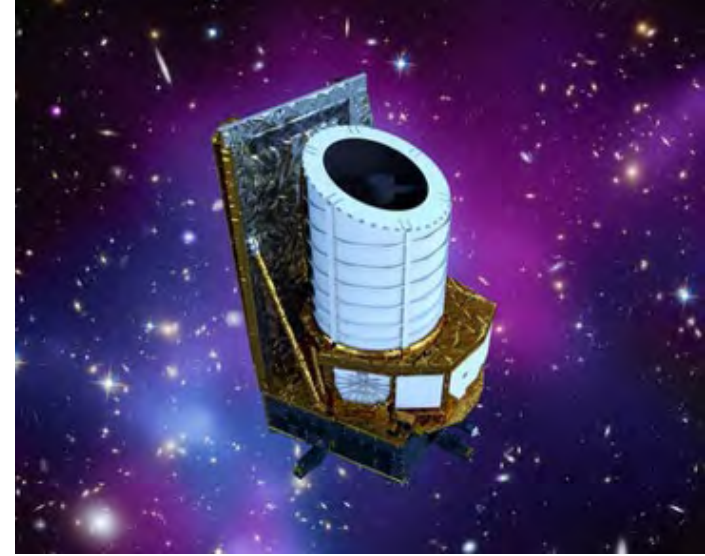


## Field stars properties



# 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

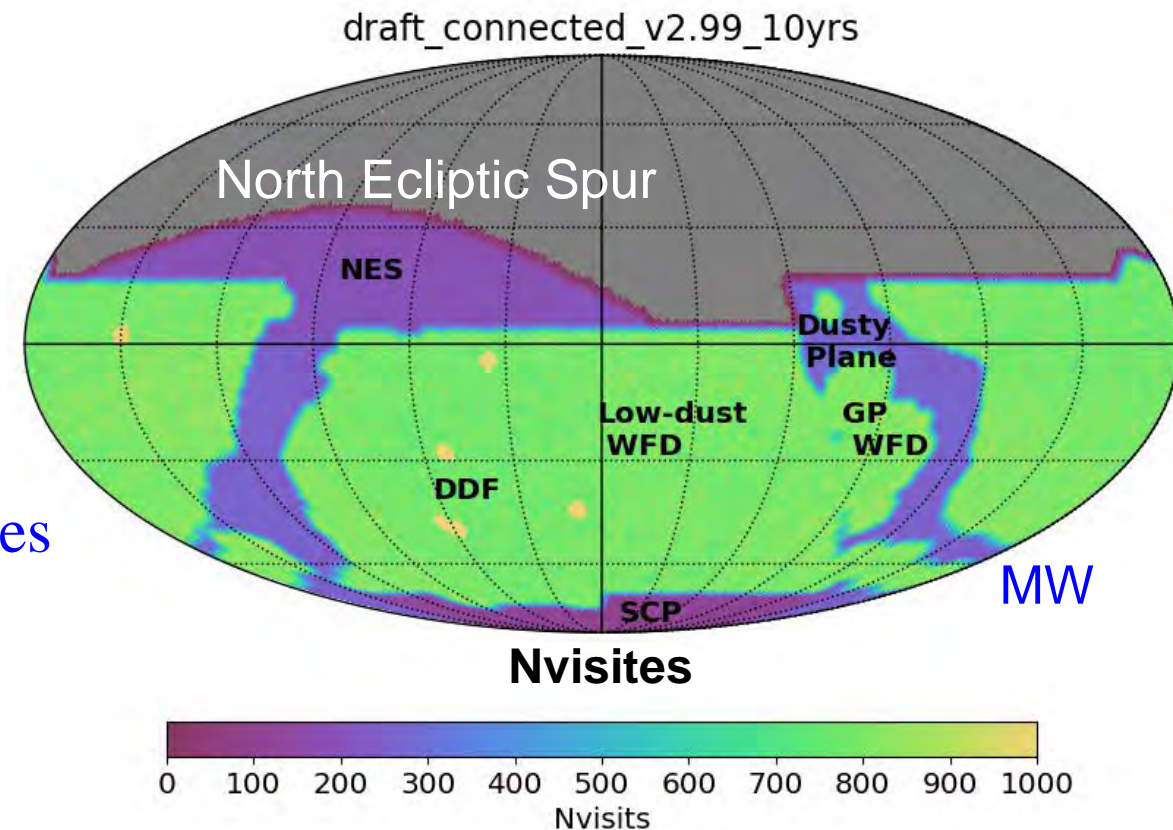
Cerro Pachón Chili 2647 m , **Champ de vue  $9.6^{\circ 2}$**



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  **$\sim 10$  sq.deg**

**Deux surveys planifiés:**

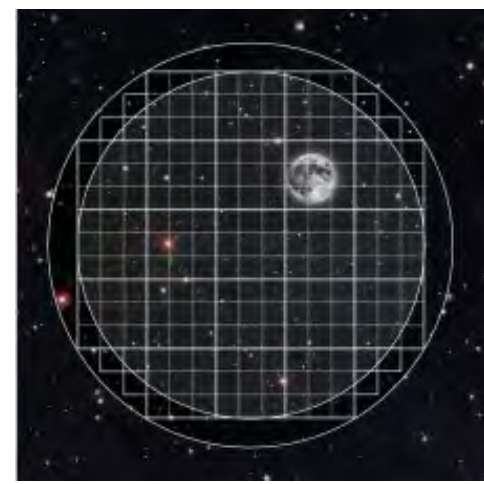
**Le principal**

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:  $\sim 30$  champs sélectionnés  $300^{\circ 2}$   
Continuellement poses 15sec/30sec. 1heure/nuit

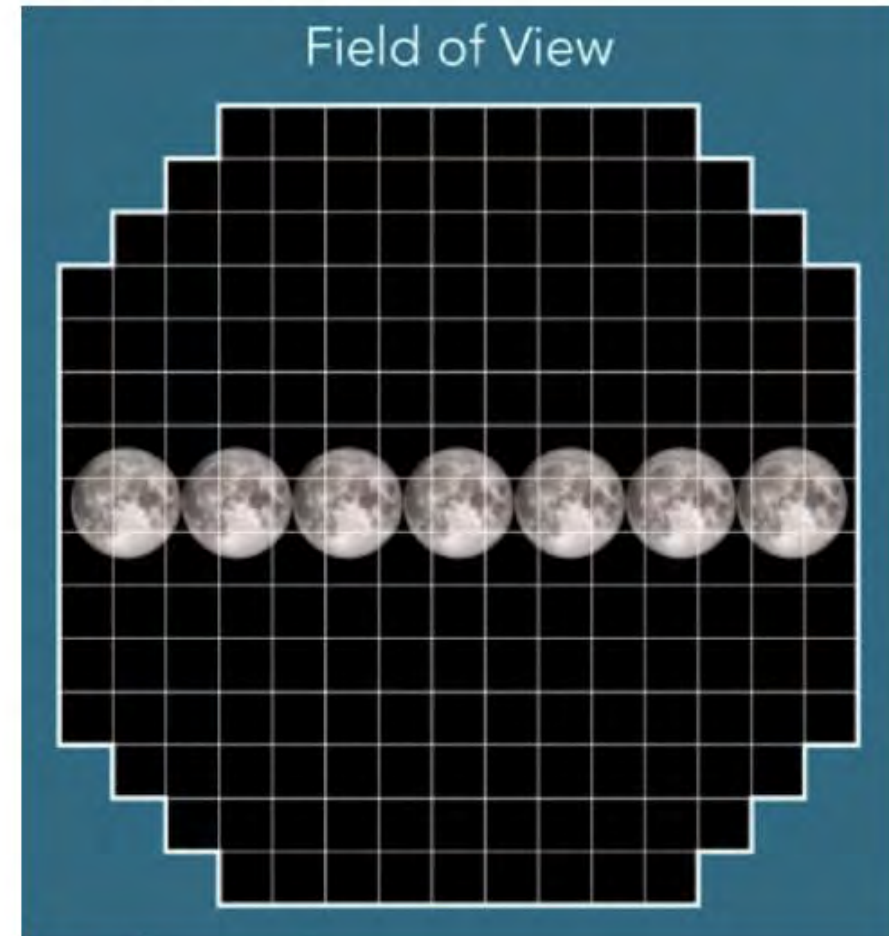
Tout le ciel visité **825 fois** avec des poses de 30s  
**Alertes** sur les objets variables relayées partout dans les 60s.





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

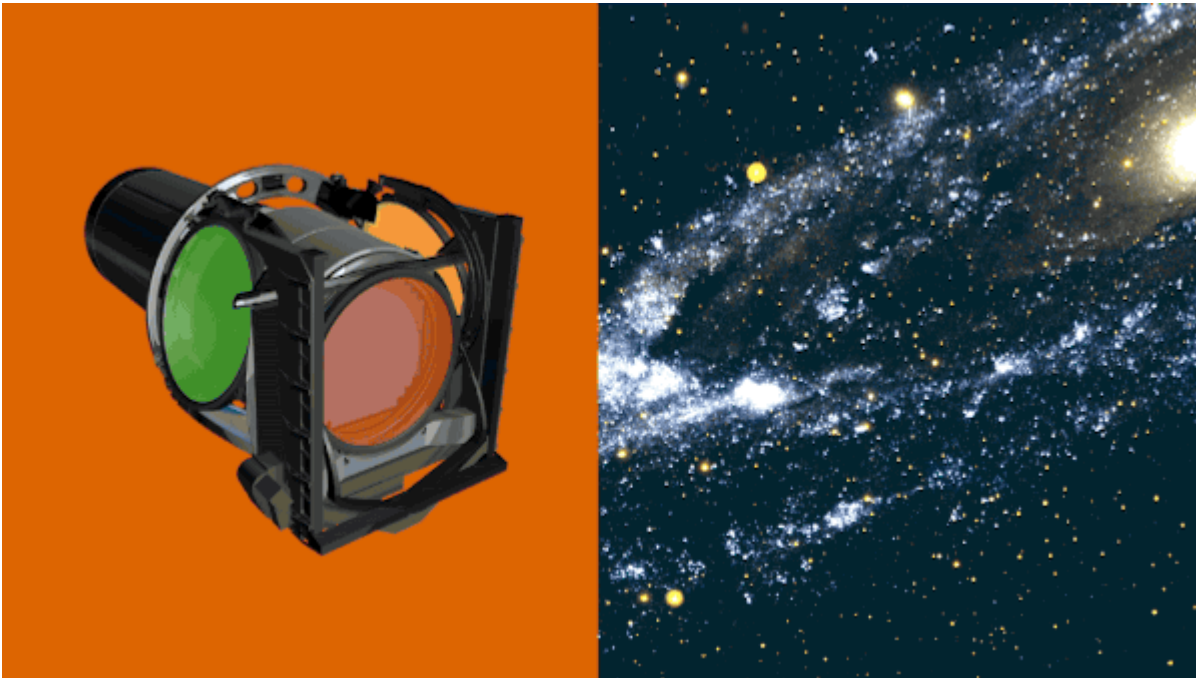
3 milliards de pixels; 8.2 GB par pose

– Poids de 3 tonnes

Roue à filtres, construite par 5 labos

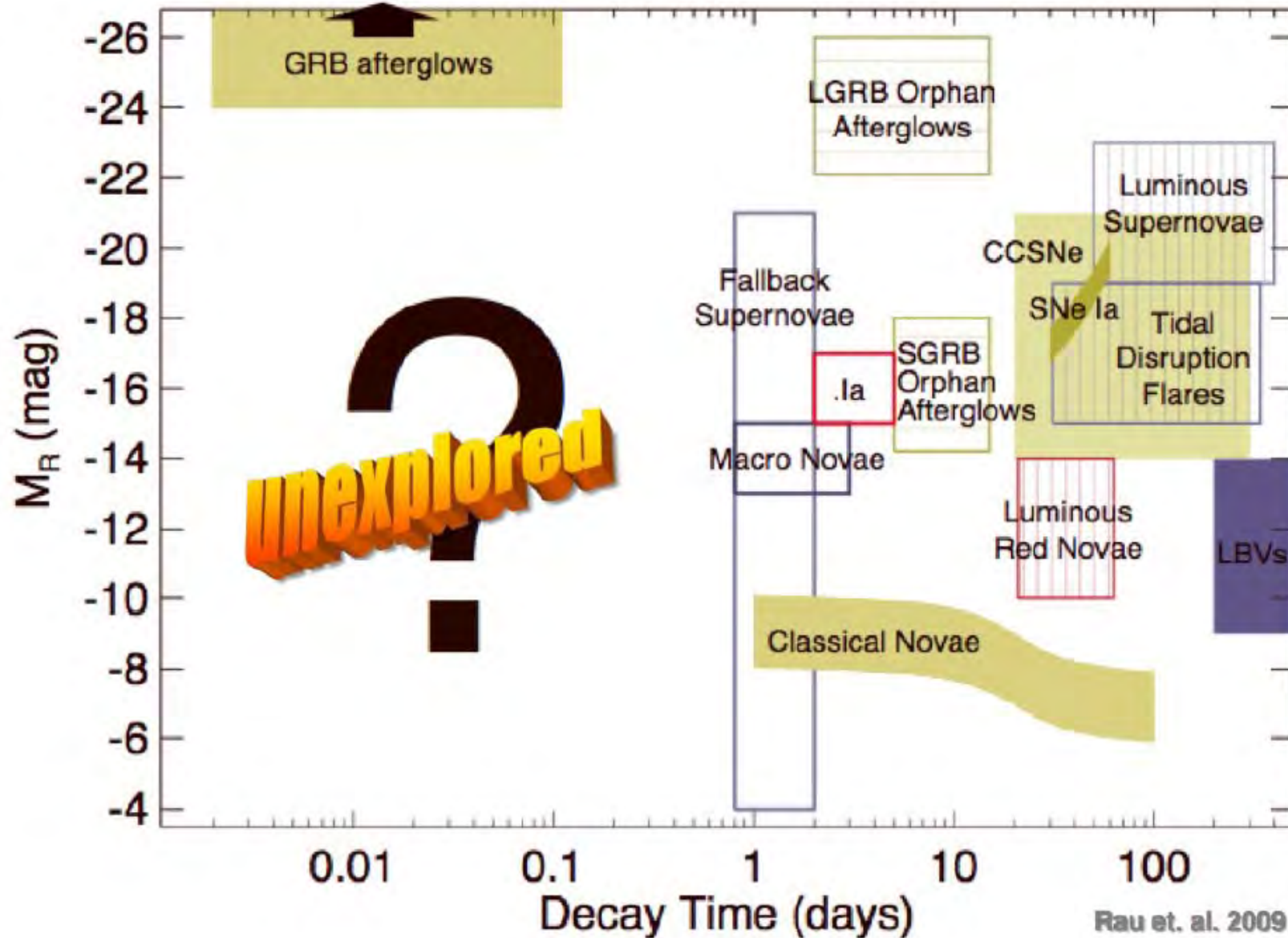
Français (IN2P3)

**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

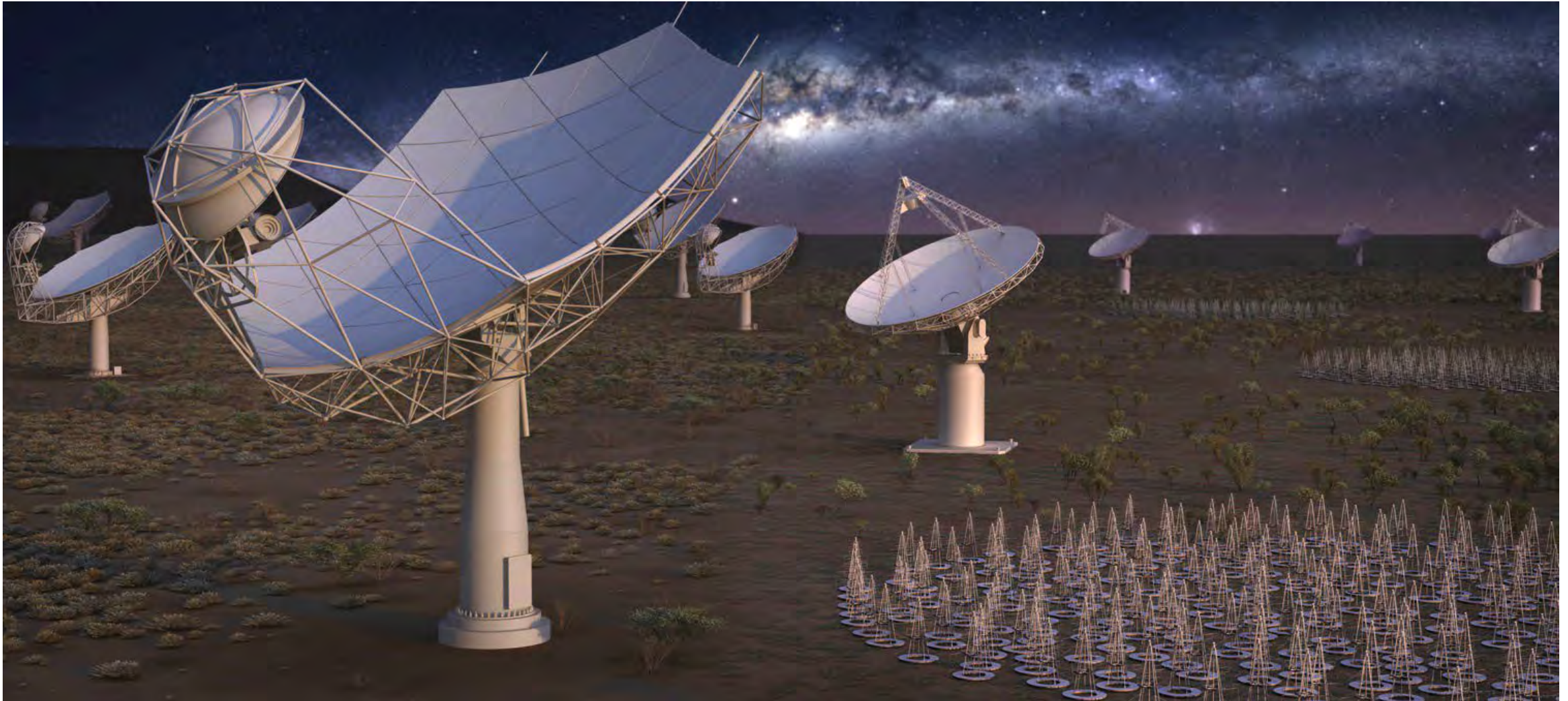
Supernovae, novae,

AGN, transitoires

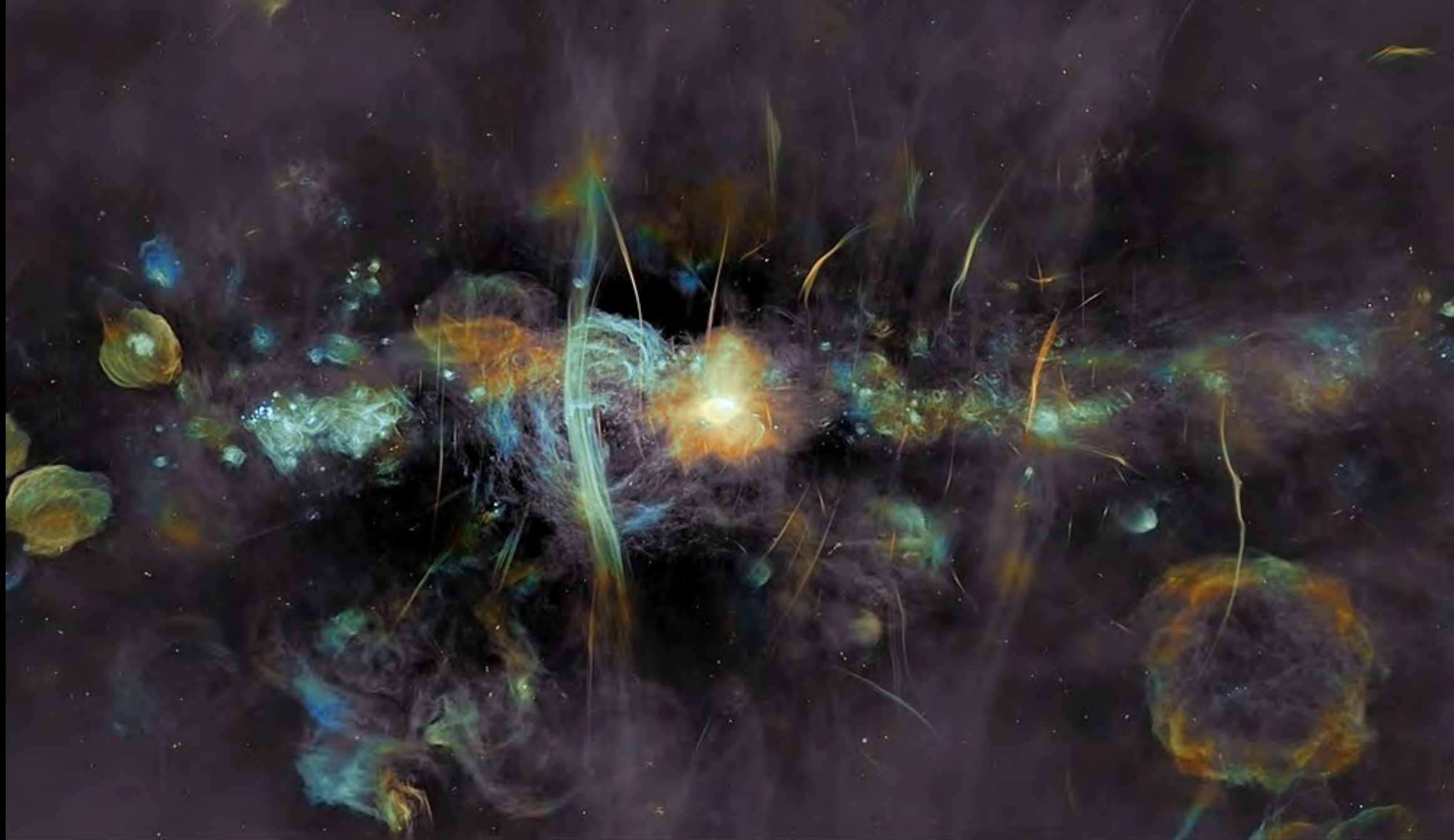
+ ondes gravitationnelles

lentilles

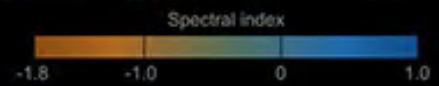
# L'OBSERVATOIRE SKA







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

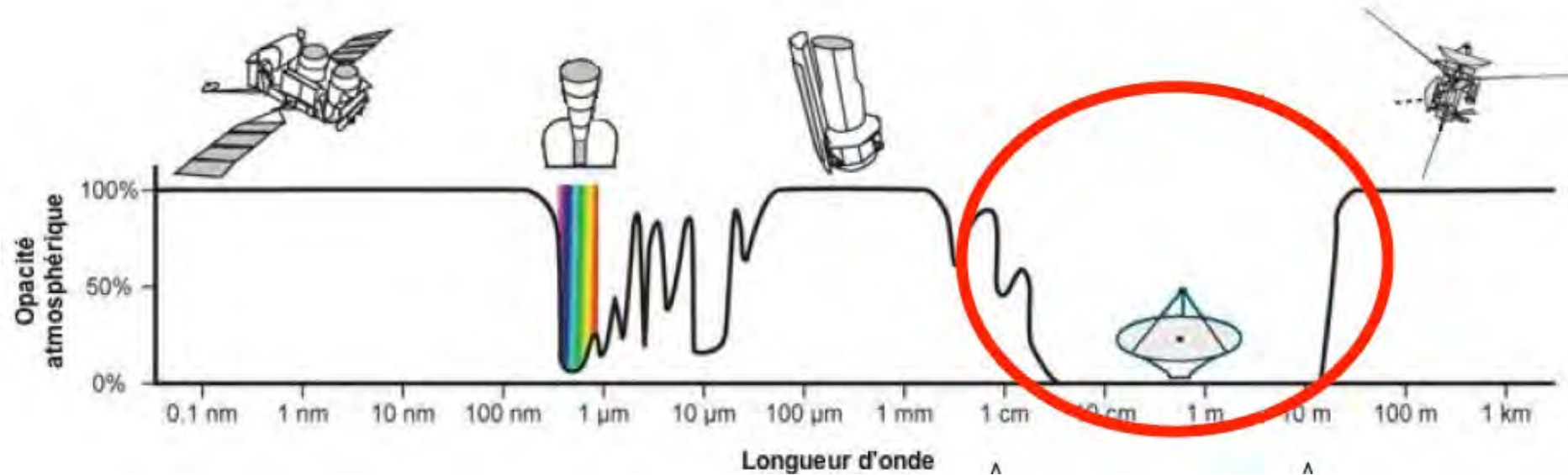


 SKA Members  
\*SKA Observatory founding members

 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

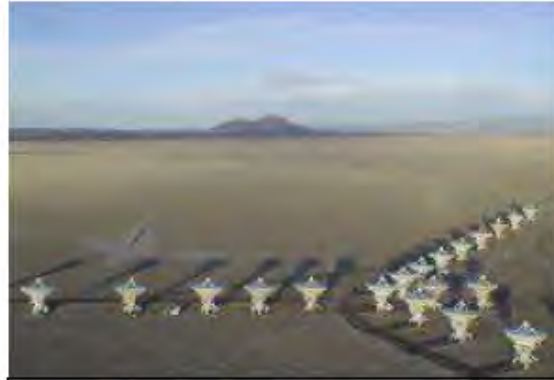


$\lambda=21\text{cm}$   $\theta=1.6'$   
 $D=500\text{m}$   
Area=  $0.2 \text{ km}^2$



# 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

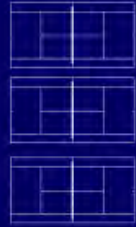


Frequency range:  
**350 MHz** to  
**15.4 GHz**  
with a goal of 24 GHz

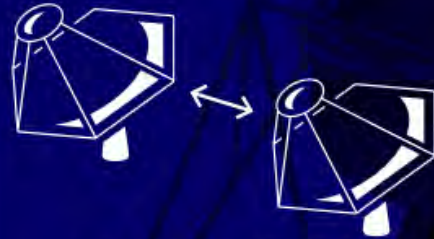


**197 dishes**  
(including 64 MeerKAT dishes)

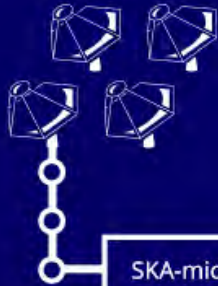
Total  
collecting  
area:  
**33,000m<sup>2</sup>**



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:

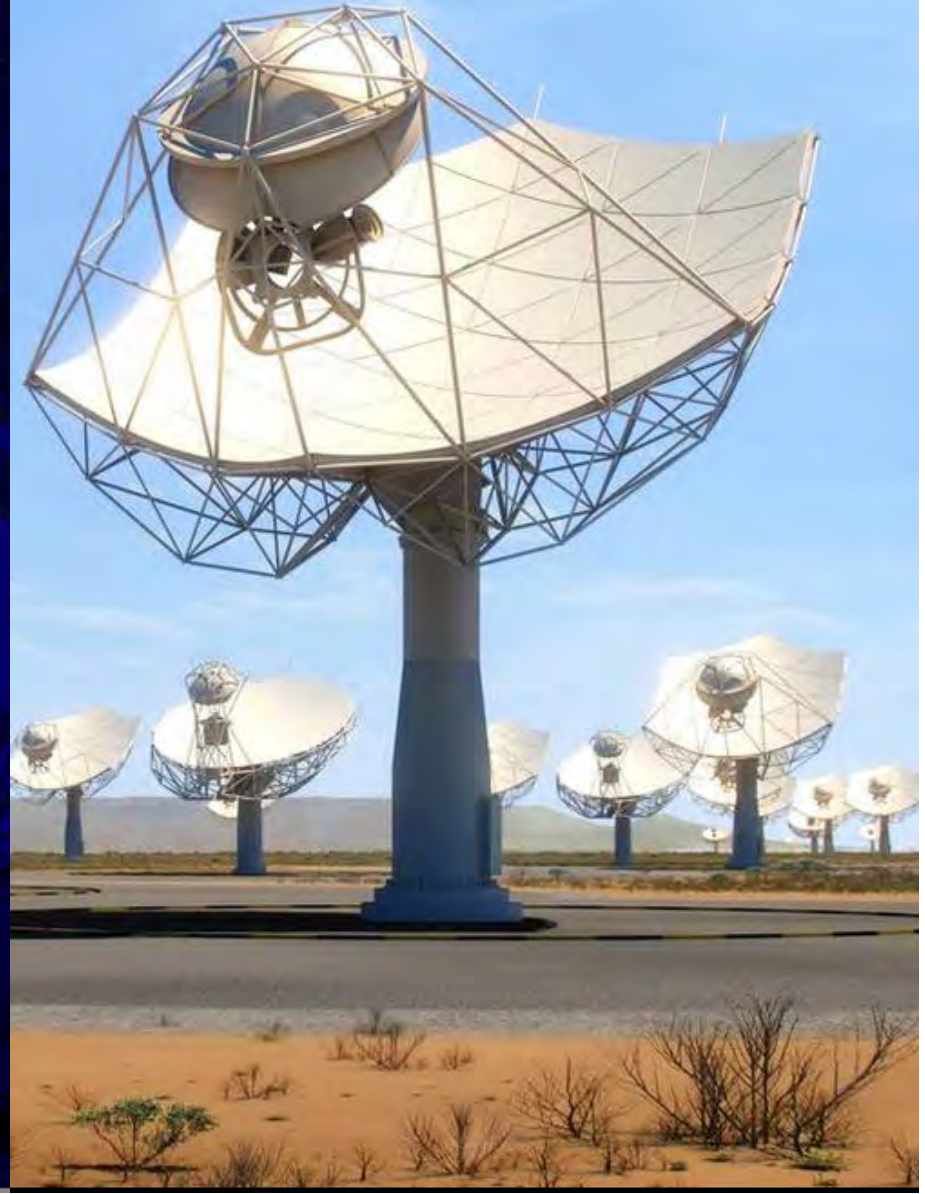


**4x**  
the  
resolution

**5x**  
more  
sensitive

**60x**  
the survey  
speed

# SKA-MID







Location: Australia

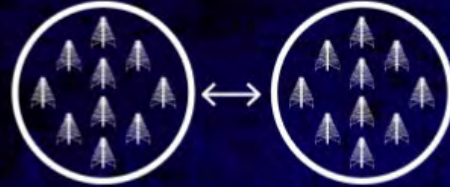


Frequency range:  
**50 MHz** to  
**350 MHz**

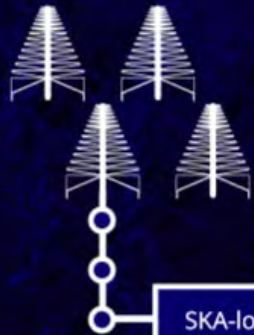


**131,072**  
antennas spread between  
512 stations

Total  
collecting  
area:  
**0.4km<sup>2</sup>**



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

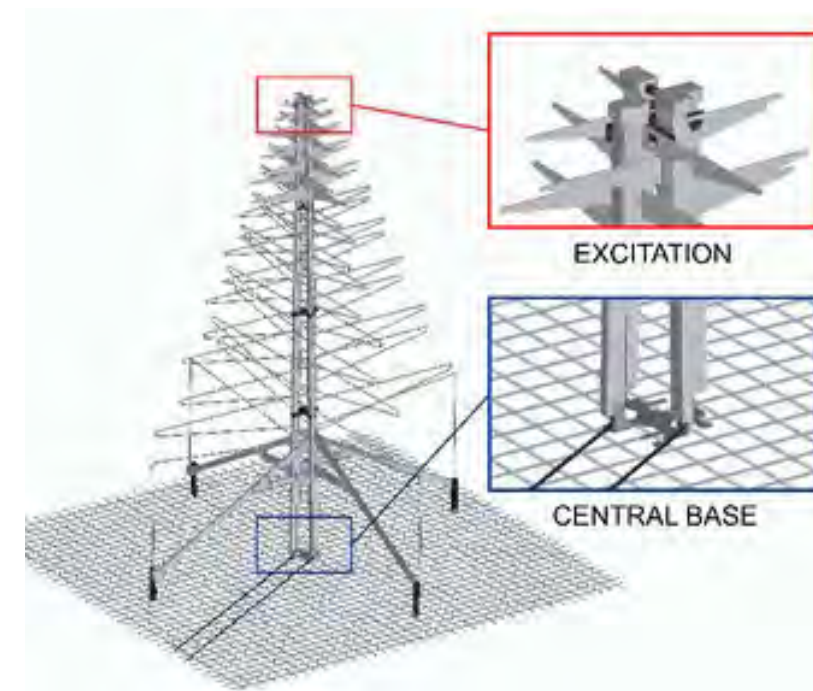
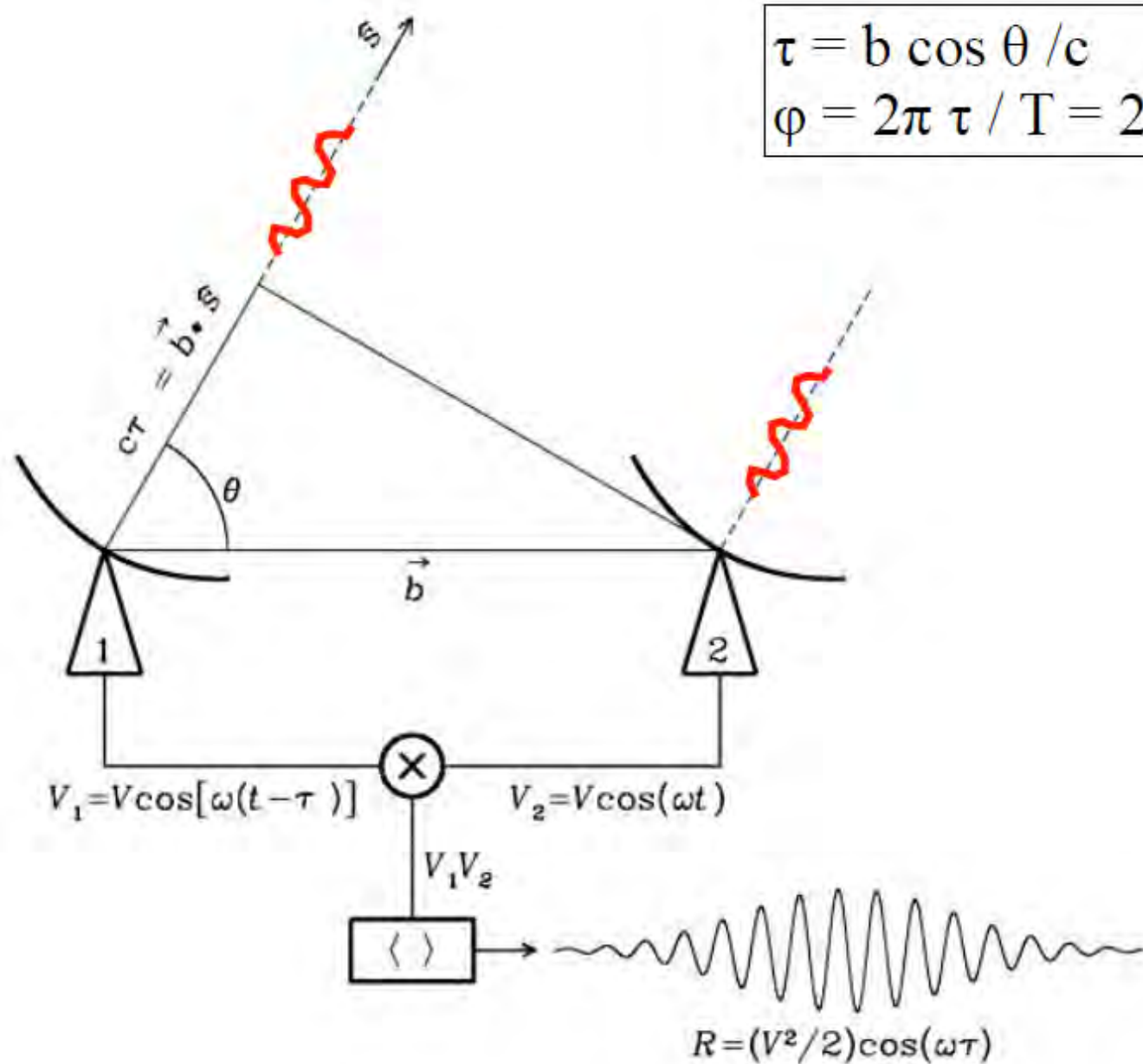
**135x**  
the survey  
speed

# SKA-LOW





# Interférométrie: SKA-mid

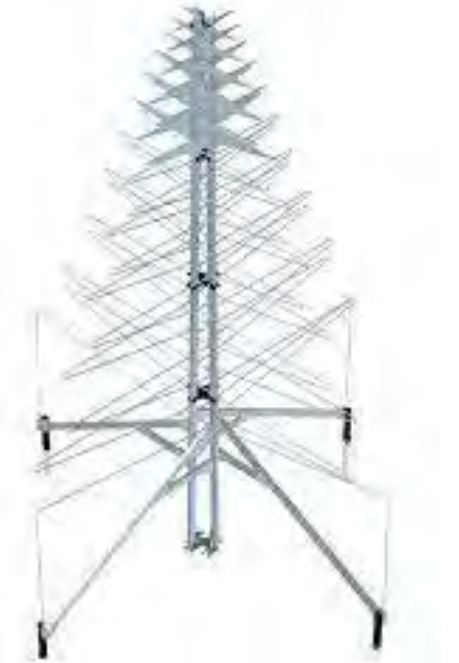
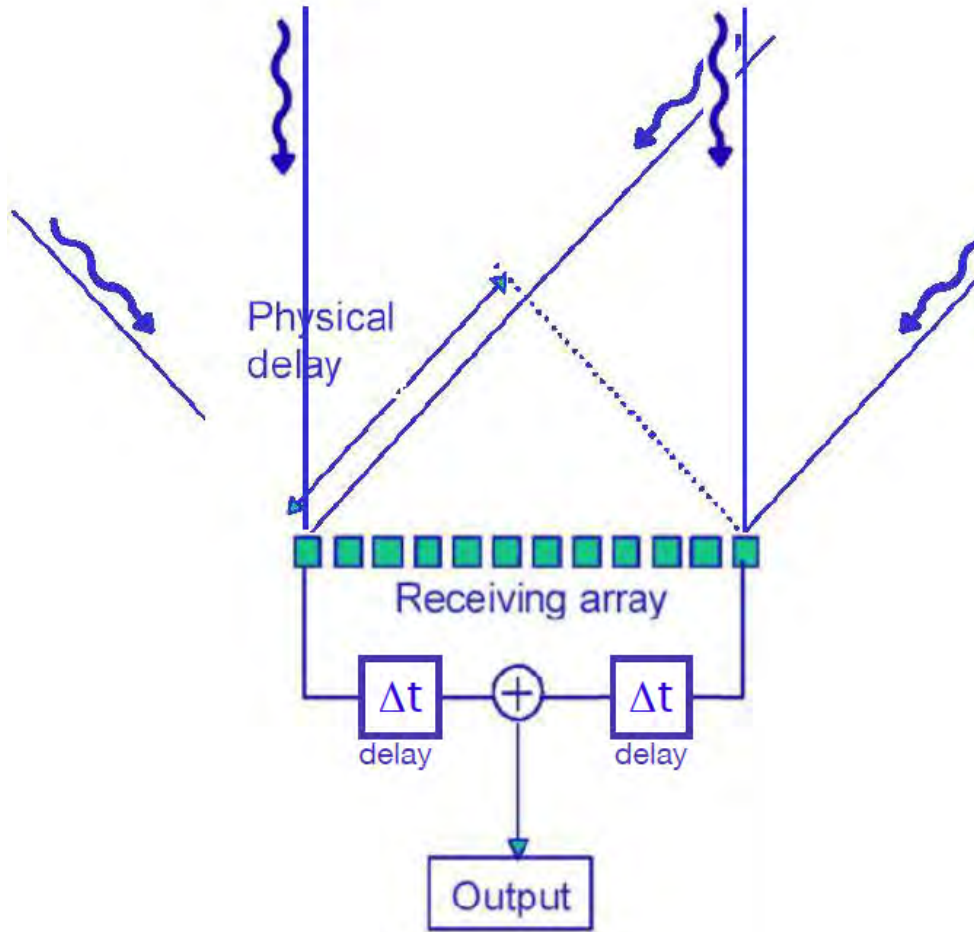




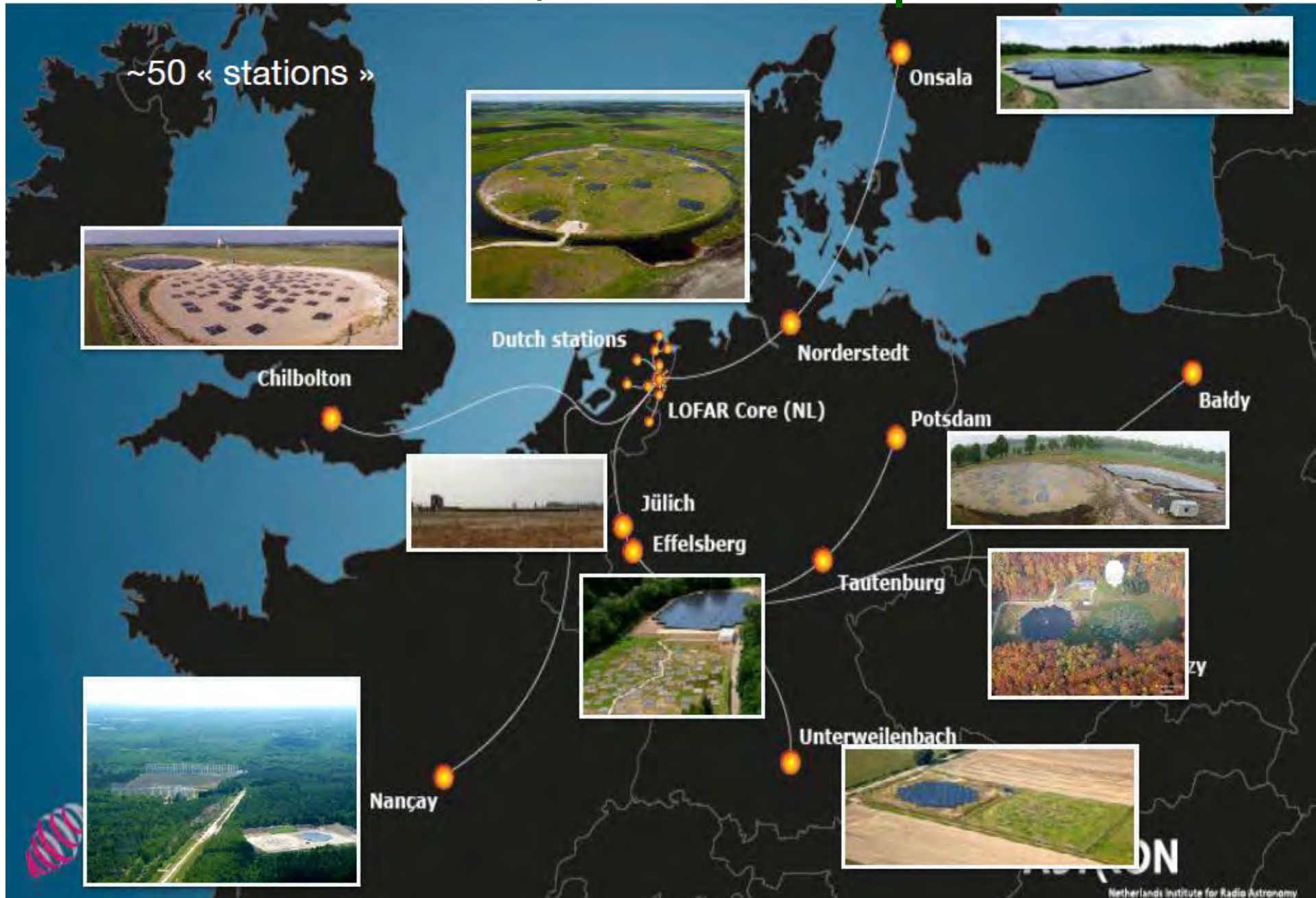
# Interférométrie: SKA-low

Pointage électronique

→ Révolution numérique

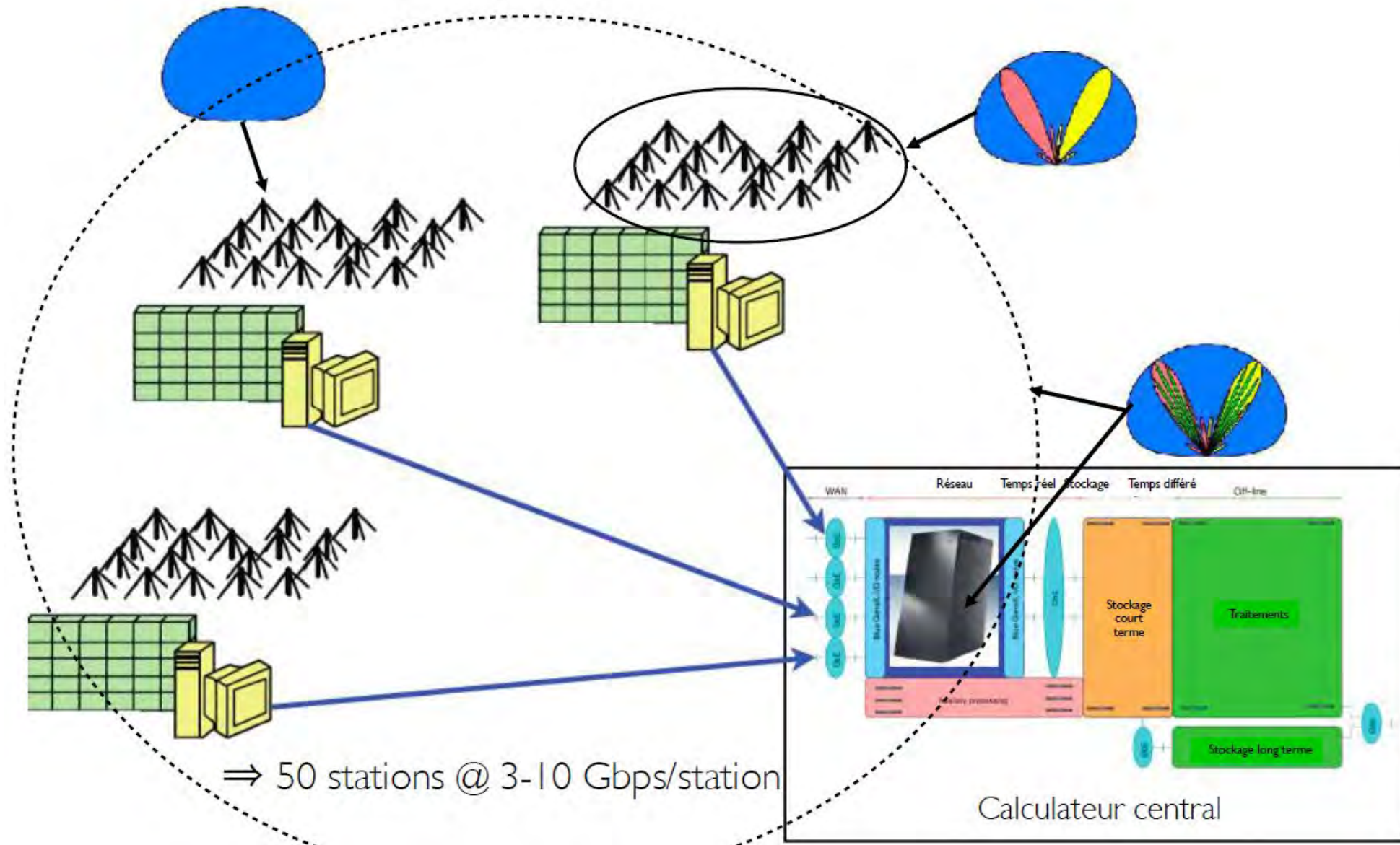


# LOFAR, Réseau Européen

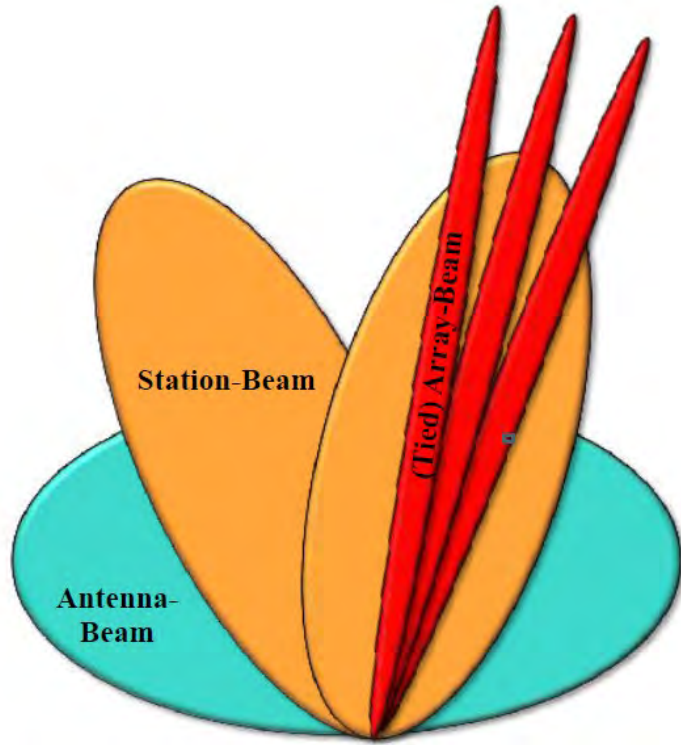




Observations simultanées (jusqu'à 8) avec des délais électroniques  
Reconstitution du lobe d'observation : **Beam forming**



# SKA : un débit de données colossal



Super-comp + PC CPU/GPU



Le coût principal

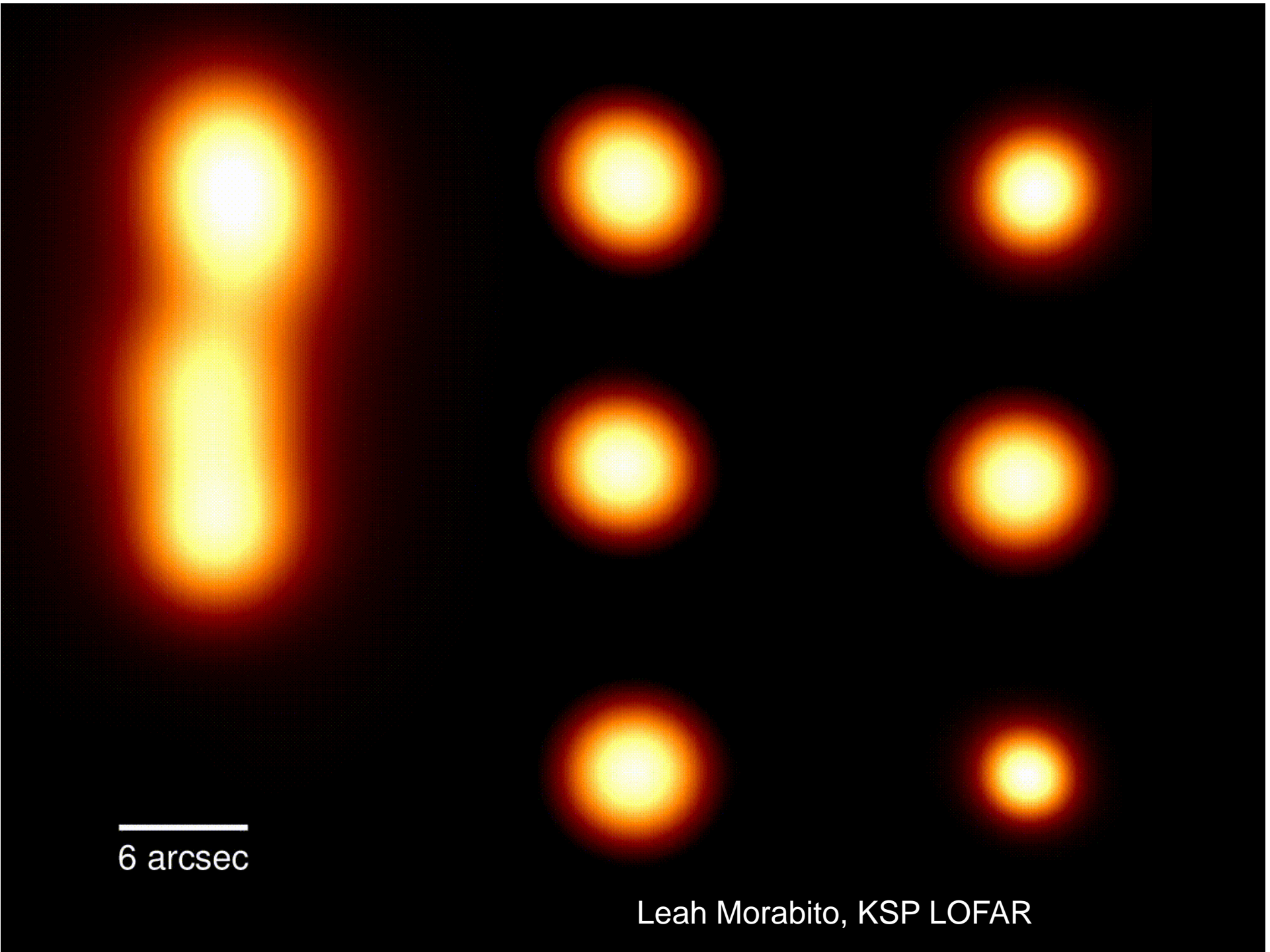
500 Pb / heure ~ 10 Eb / jour ~ 5 Zb / an (1 Zb = 1 MPb)

(> trafic internet mondial aujourd'hui)

→ **stockage des données brutes impossible**

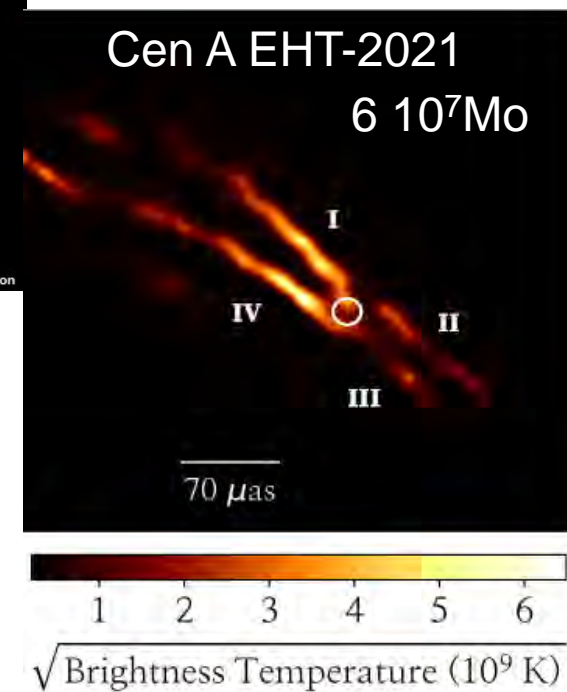
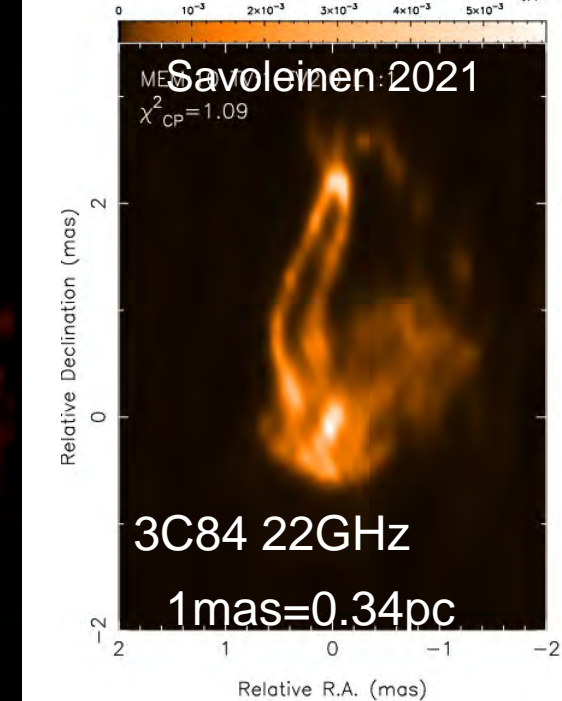
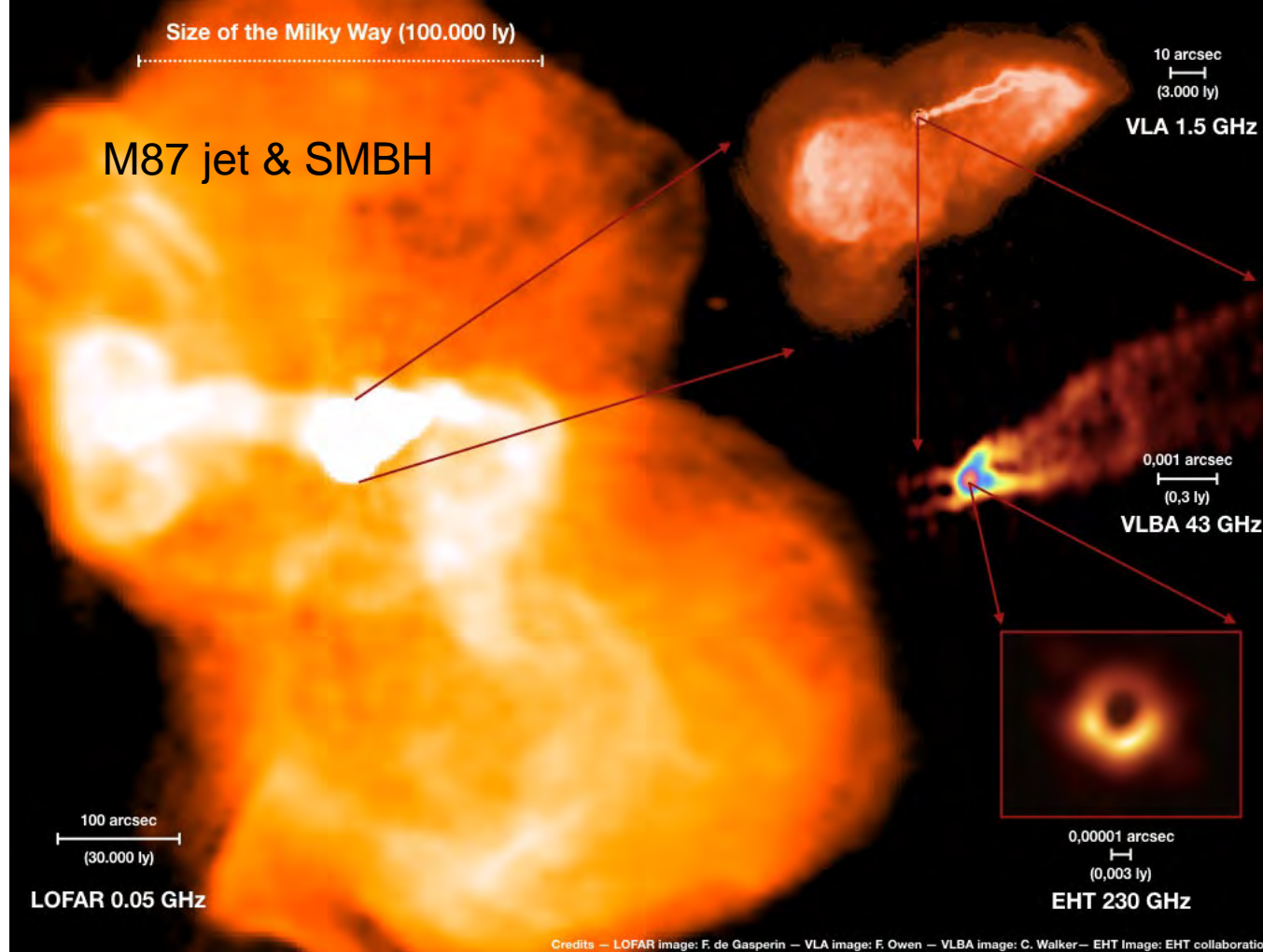
→ calibration (étalonnage) & imagerie temps réel = indispensable





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**

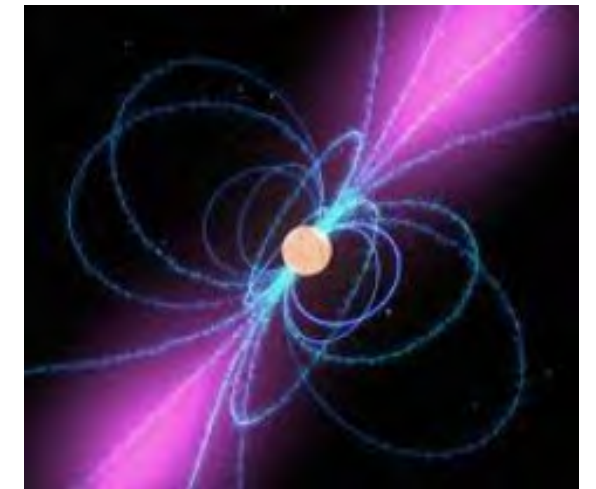
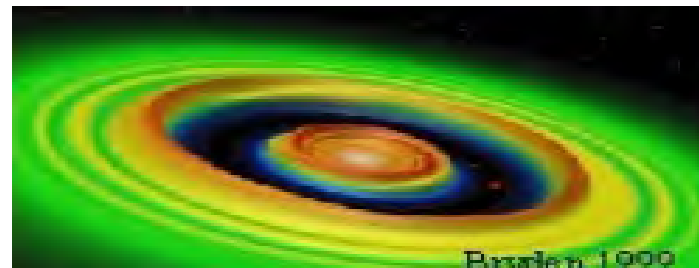
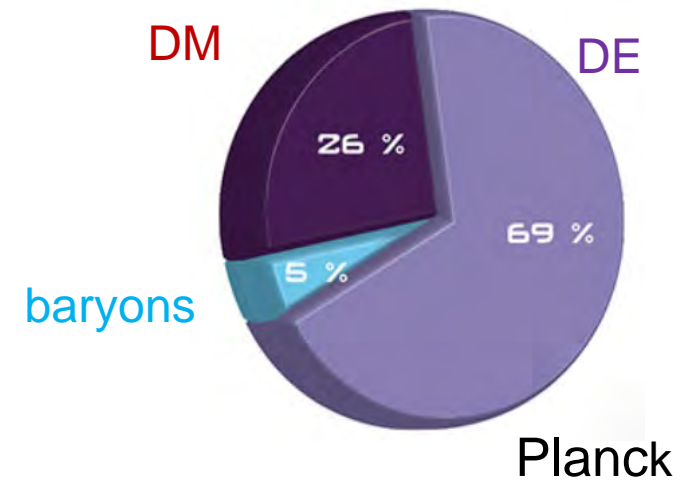
**Comment les baryons s'assemblent dans les structures?**

**Formation et évolution des galaxies**

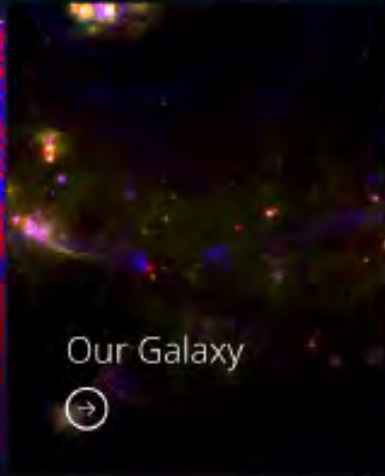
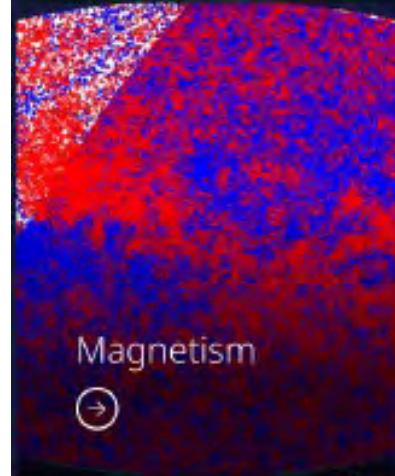
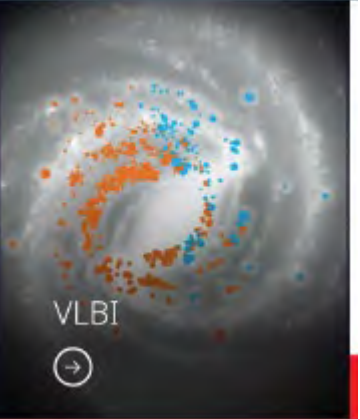
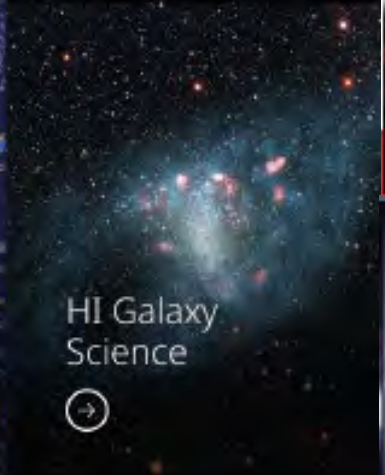
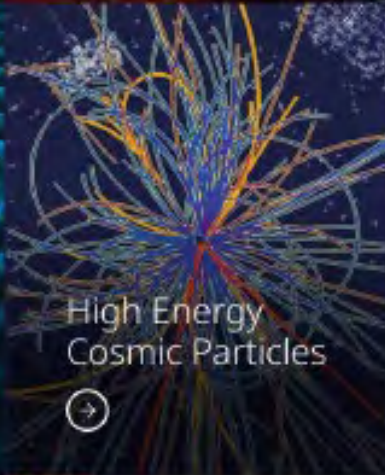
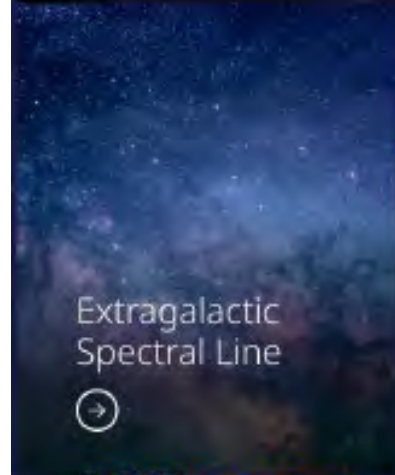
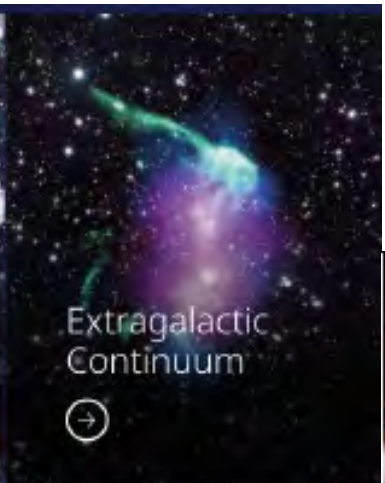
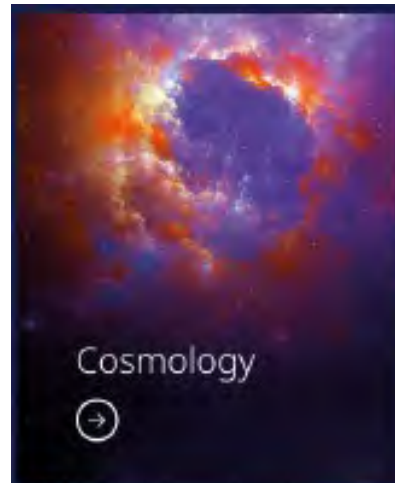
**Gravité en champ fort; pulsars et trous noirs**

**Magnétisme cosmique**

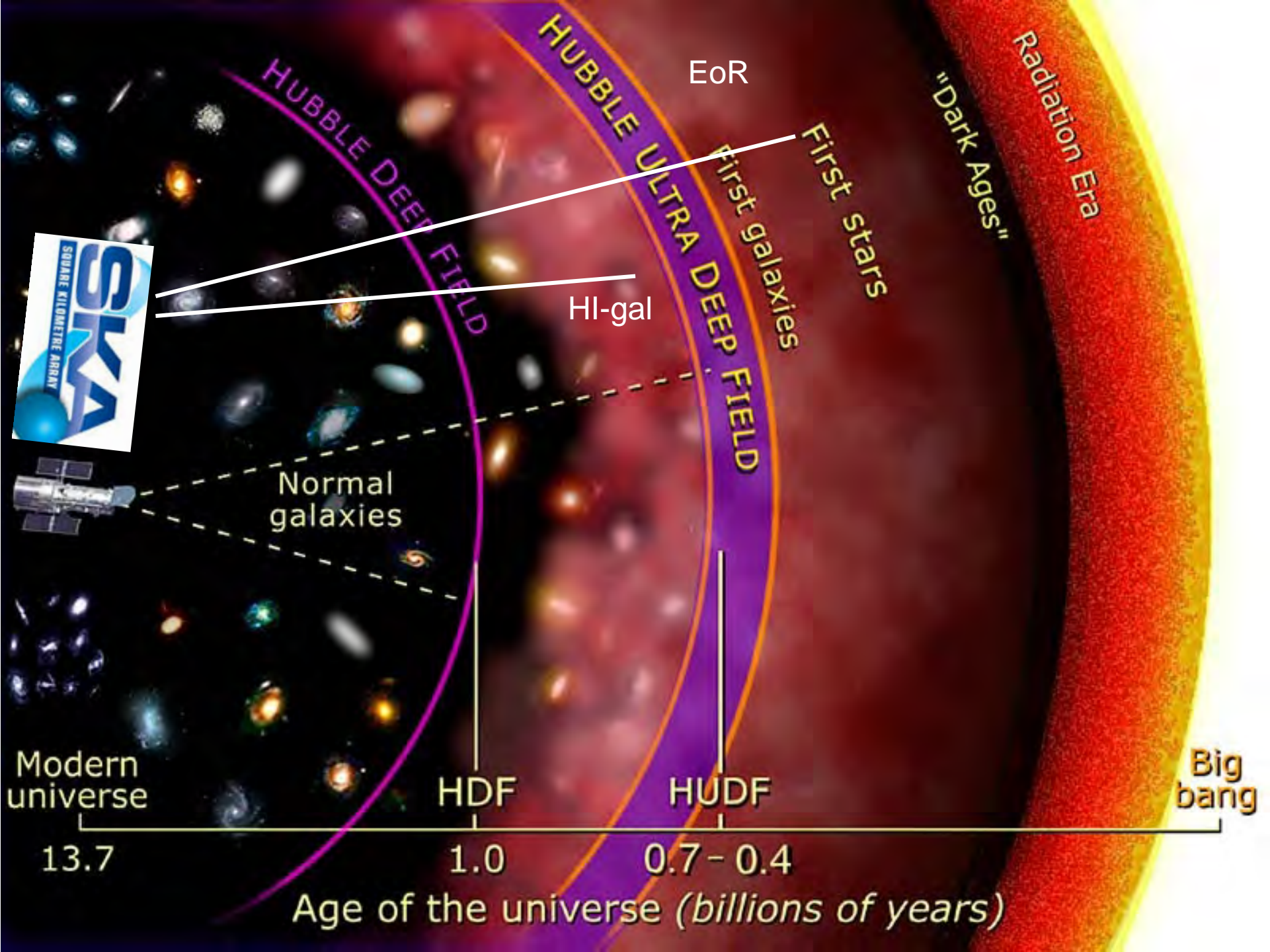
**Berceau de la vie**



# 14 groupes de travail

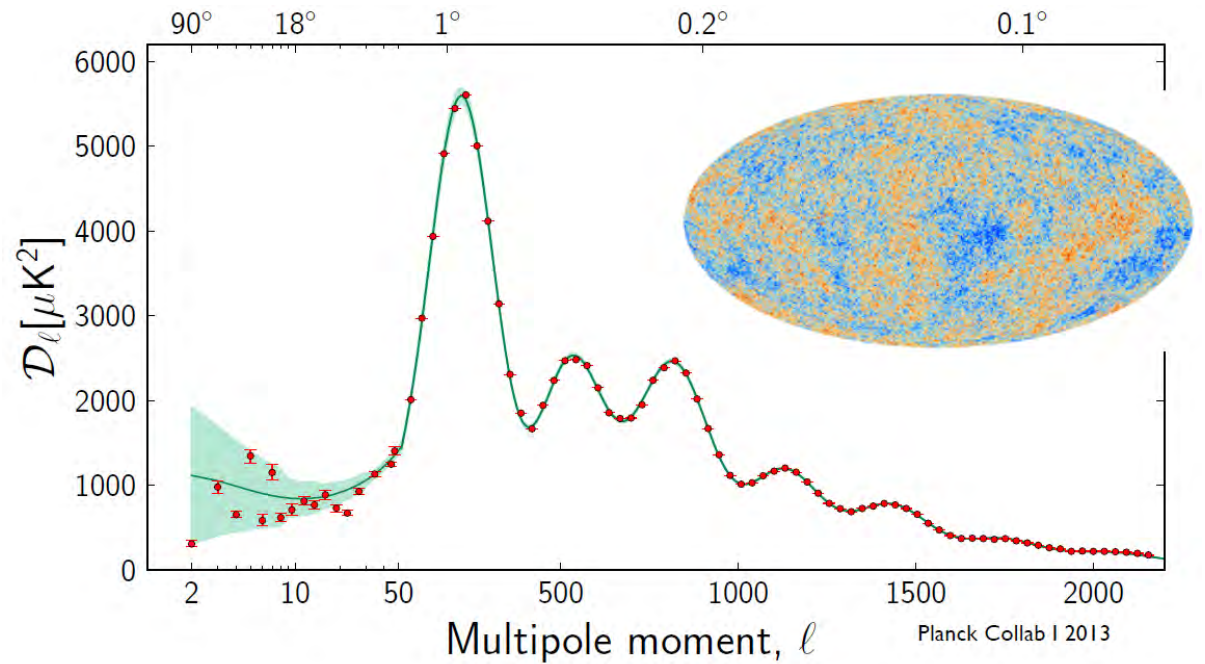






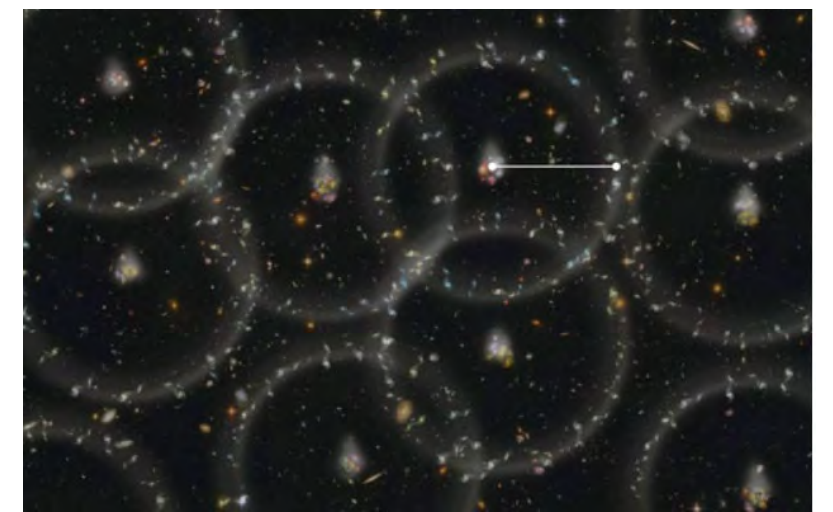
# BAO (Baryonic Acoustic Oscillations) avec SKA-1

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)

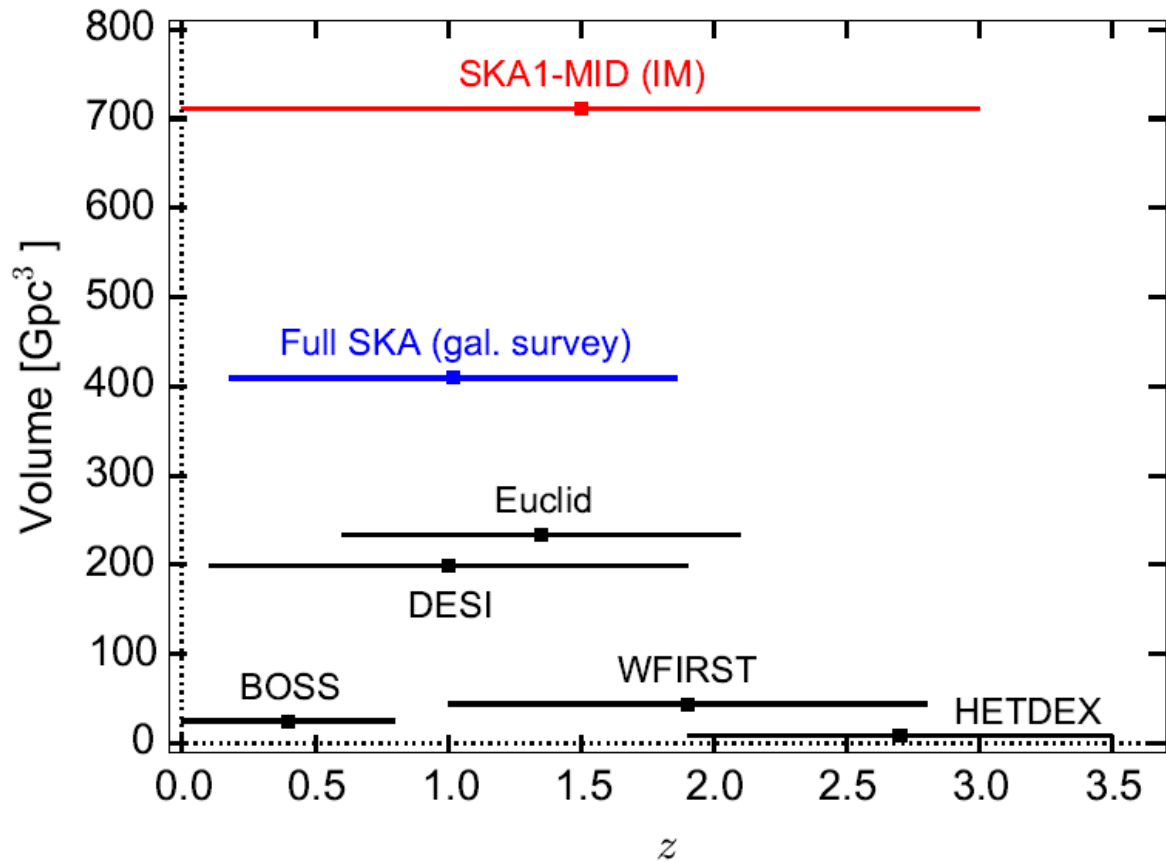


Après la recombinaison, l'hydrogène neutre se découple des photons, les oscillations sont gelées

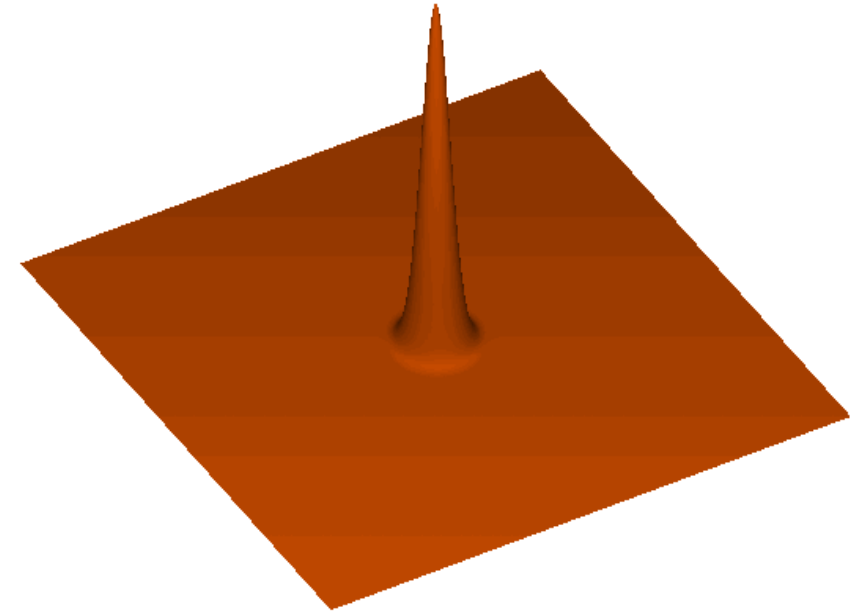
La plus grande taille est de 150Mpc  
Horizon sonore= 450 millions al  
➔ Règle pour mesurer l'Univers







## Les BAO avec SKA



**SKA1:** HI cartes d'intensité 30 000 deg<sup>2</sup> jusqu'à z=3

Profond et large, grand volumes, ~Euclid

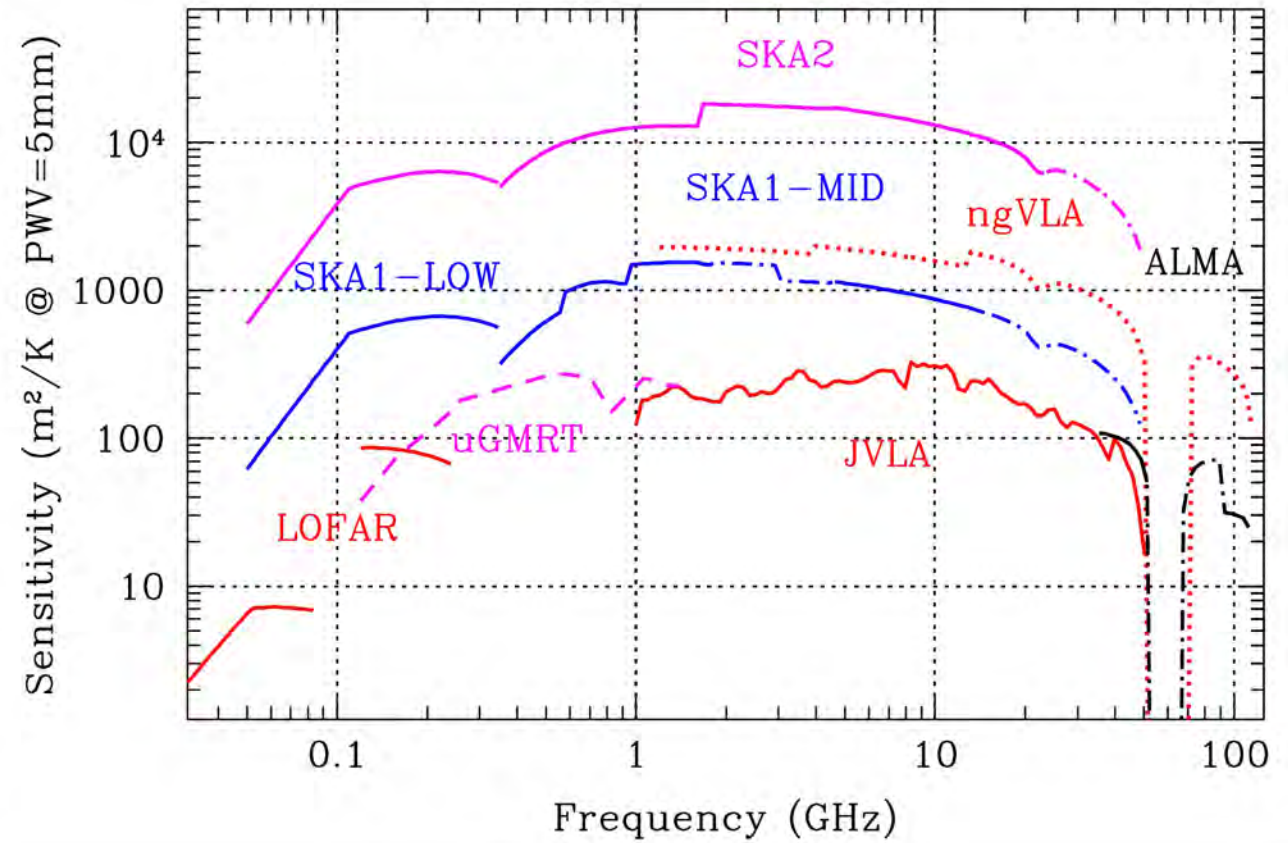
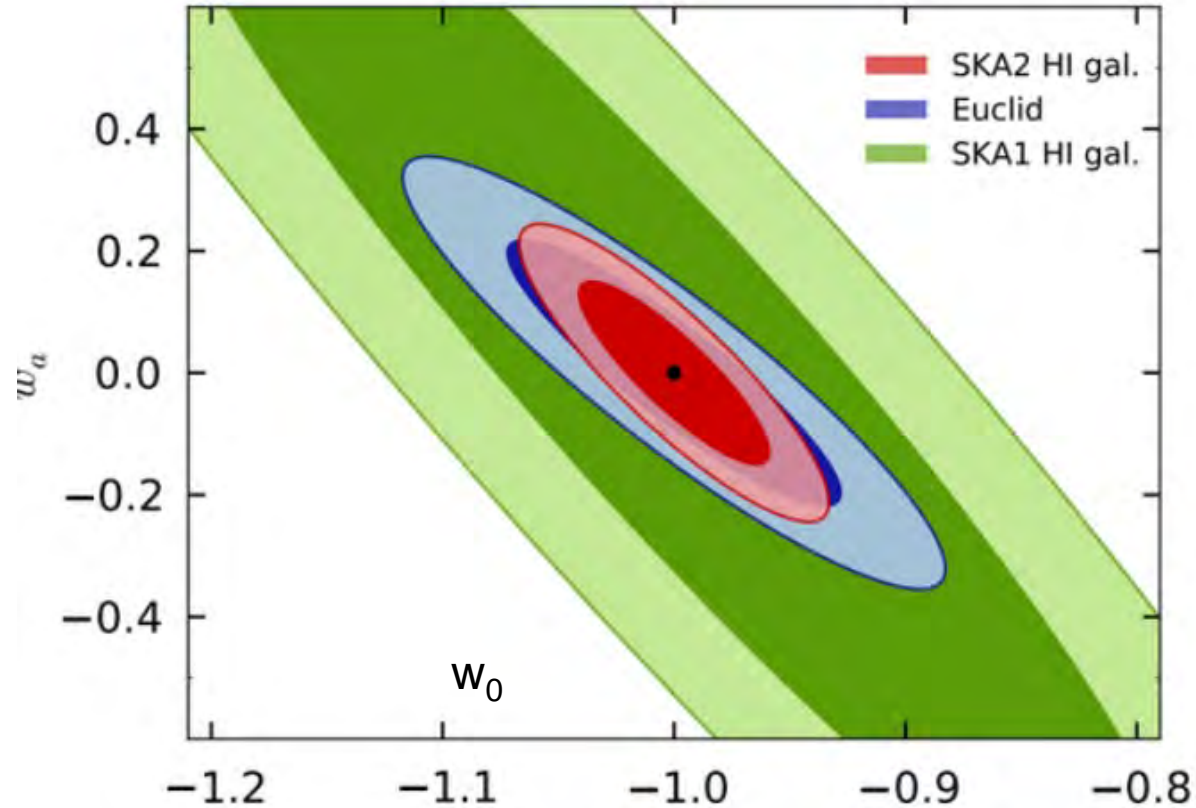
**SKA2** fournira un échantillon pur

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

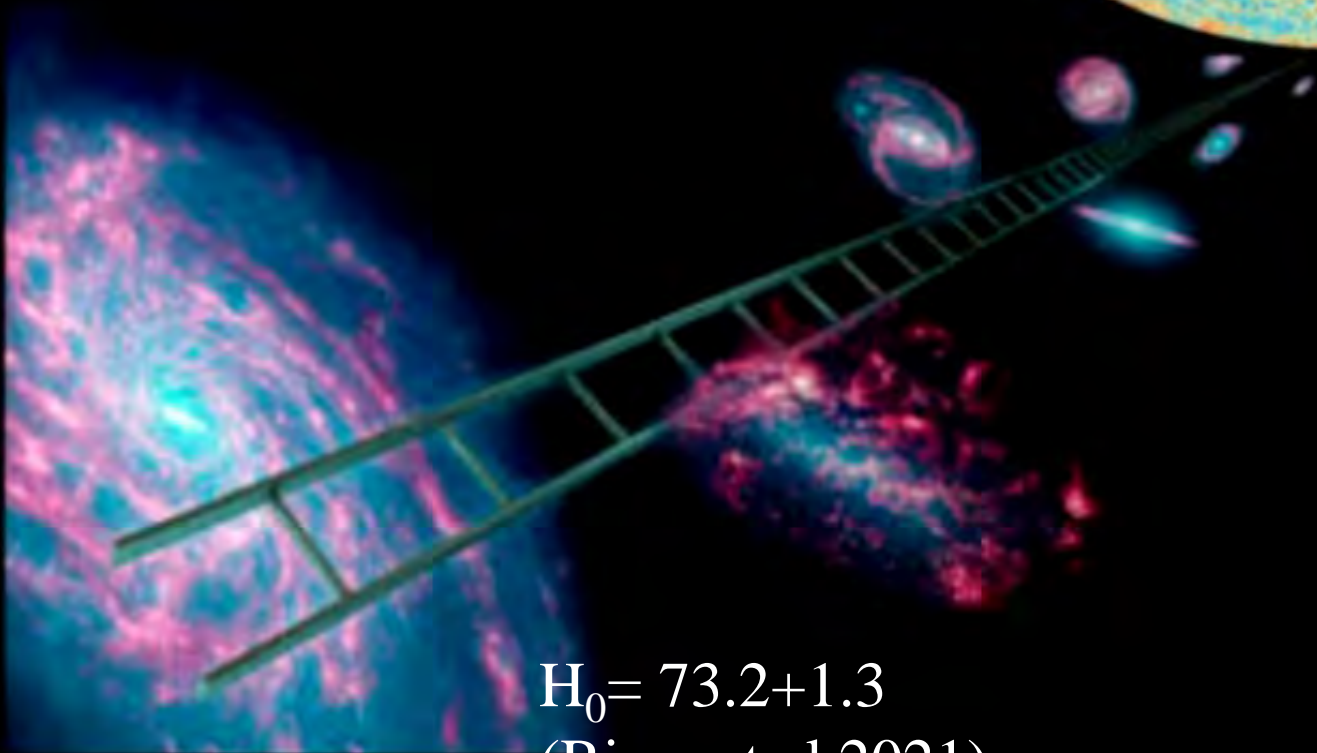
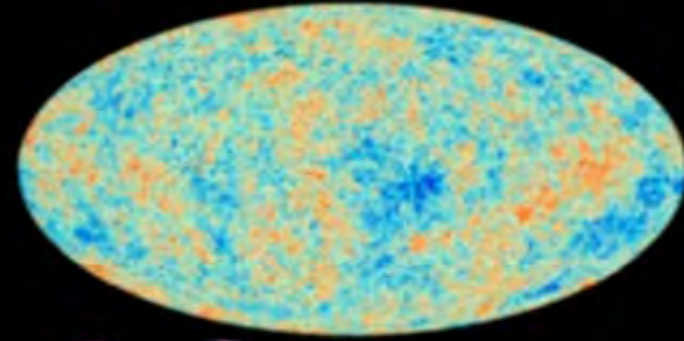




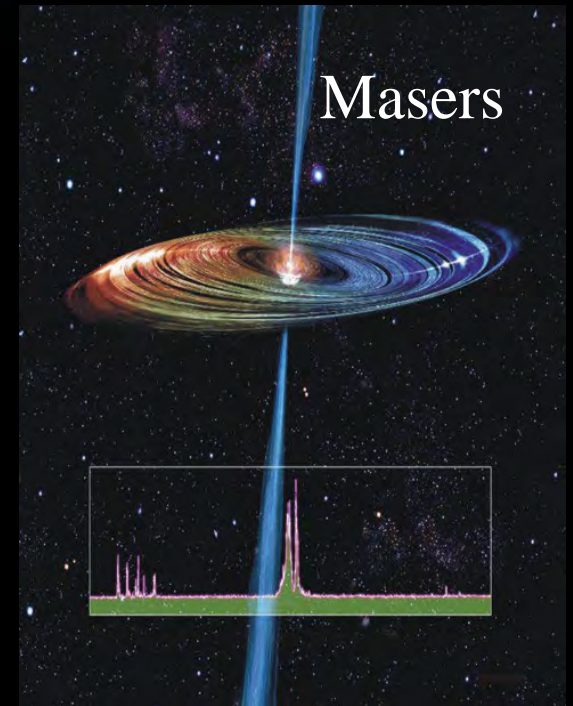
$H_0 = 67.4 \pm 0.5$  (Planck coll 2018)

# Le défi de $H_0$

Désaccord à  $5\sigma$

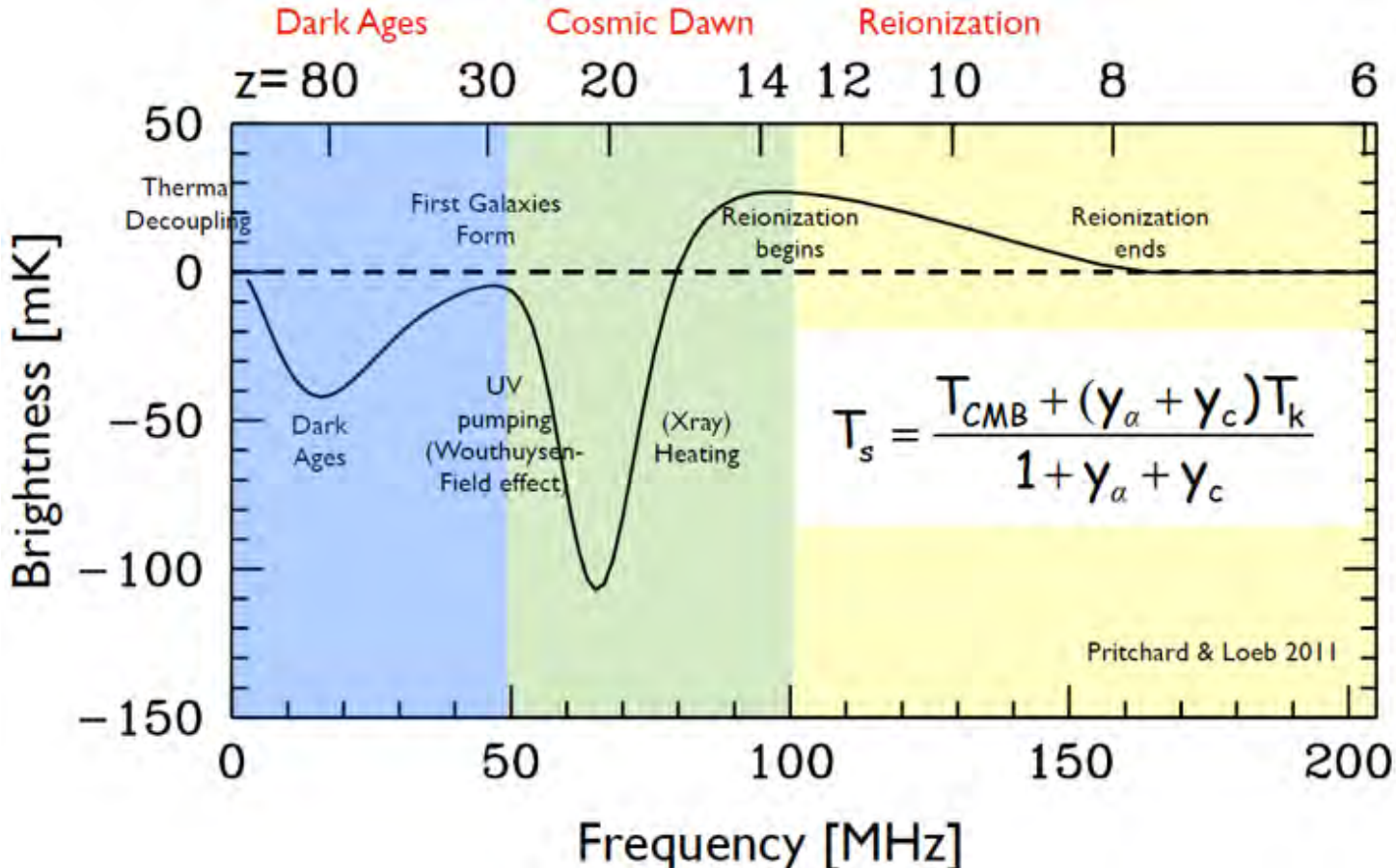
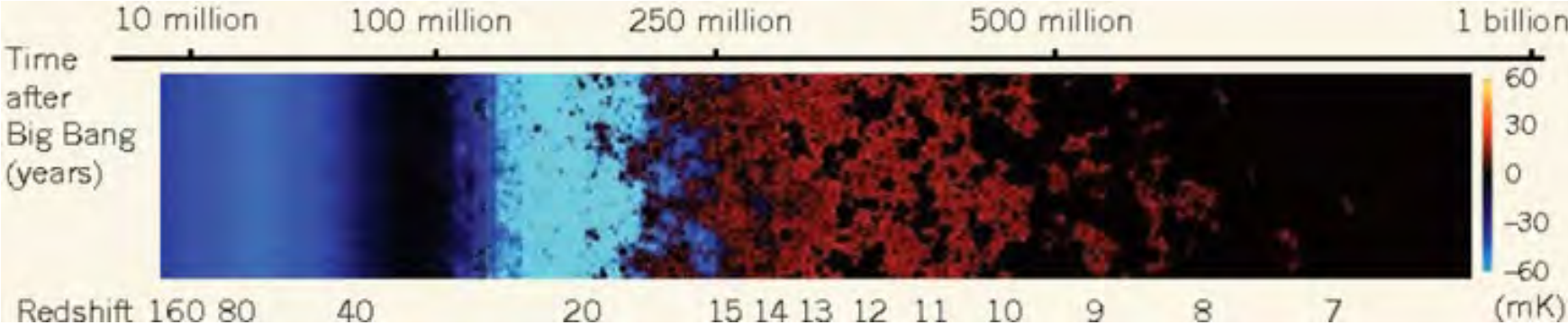


$H_0 = 73.2 \pm 1.3$   
(Riess et al 2021)



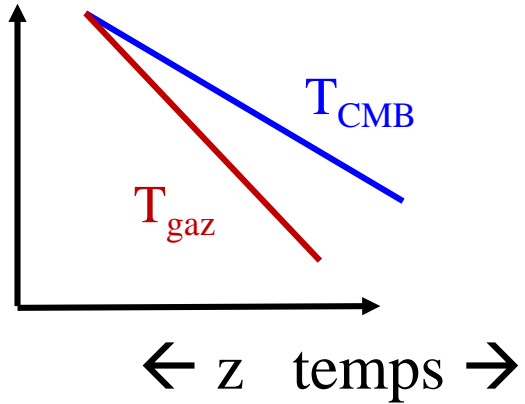
4000 jusqu'à  $z=1.5$

# EoR: Epoque de la réionization



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

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

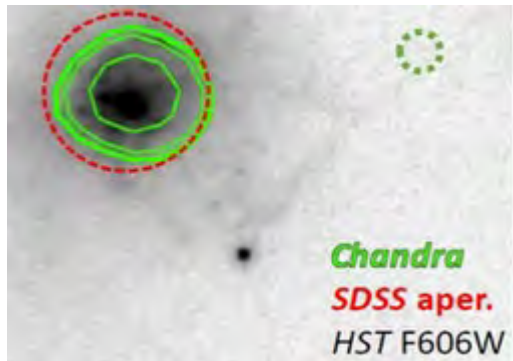




# Reionisation- galaxies primordiales JWST- ALMA



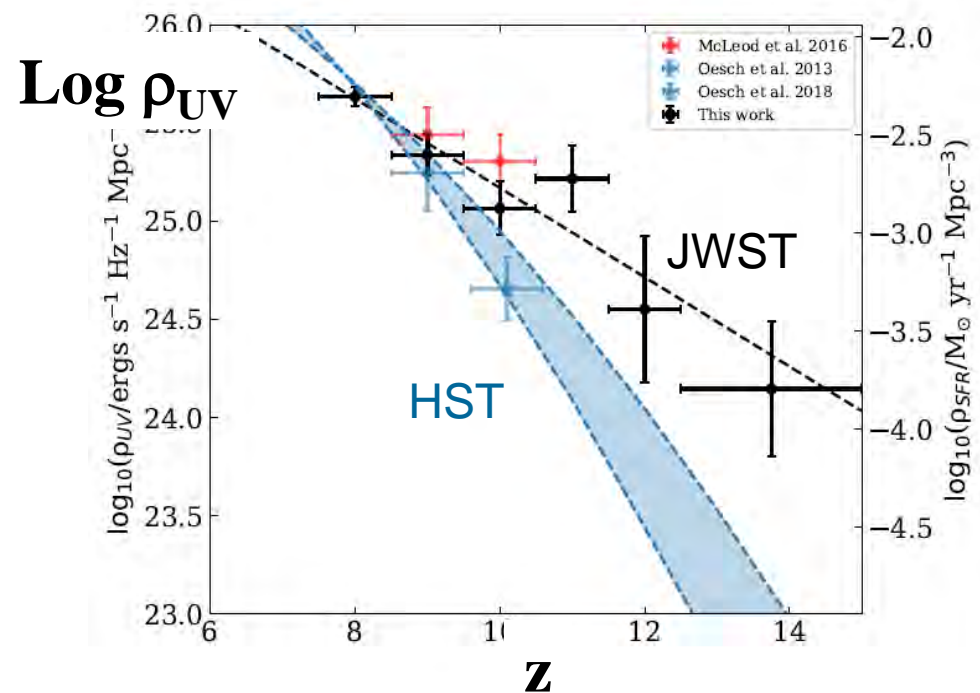
Quasars à grand  $z$ : émissin Ly $\alpha$



Ly $\alpha$  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  $\approx 4$  galaxies  $\text{arcmin}^2 (>10\sigma)$

PSF excellente qualité  $0.6 - 100''$

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

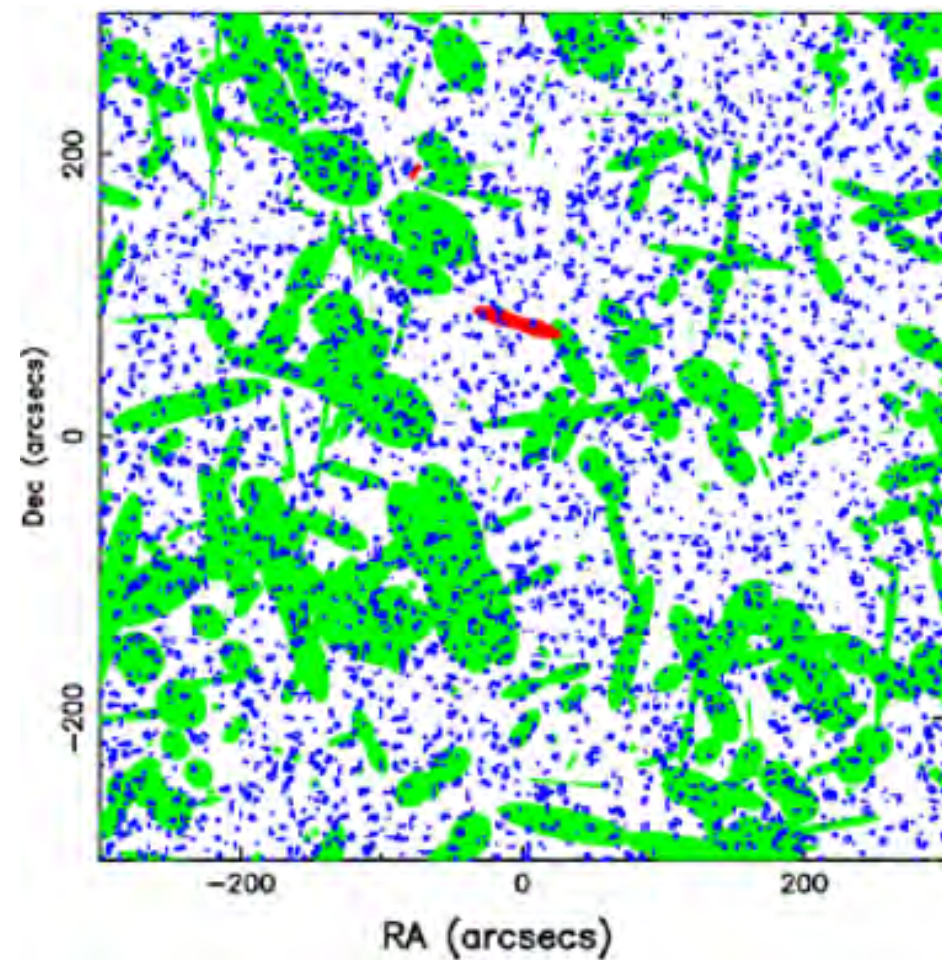
→ Total de **0.5 milliard de sources radio**

Cisaillement cosmique, effet Sachs Wolfe (WL, ISW)

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

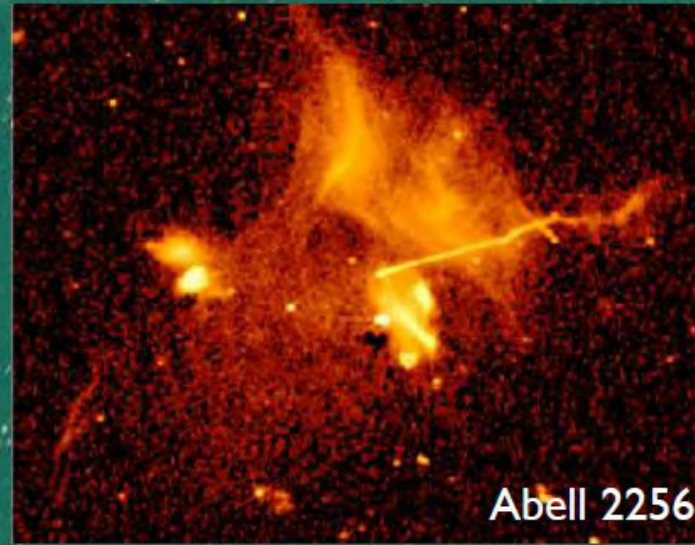
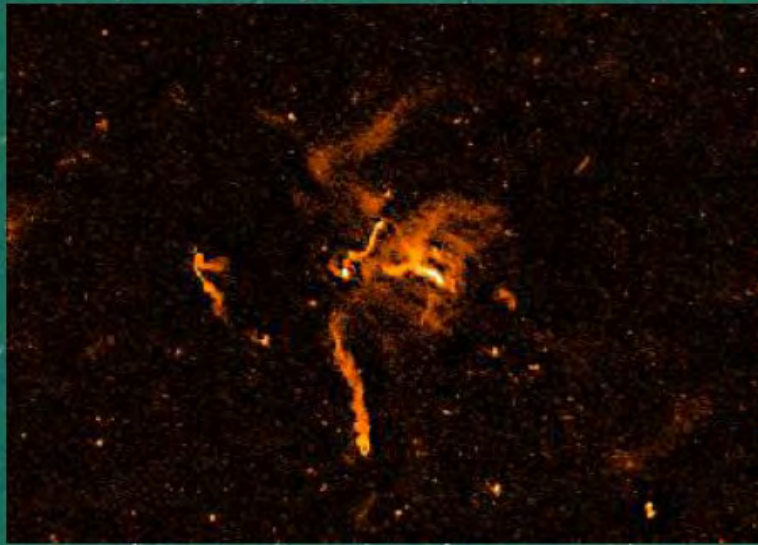
Champ profond ( $50 \text{ deg}^2$ )  $0.1 \text{ mJy rms}$ ,  $\approx 20$  galaxies  $\text{arcmin}^2 (>10\sigma)$

→ **Lentilles faibles**



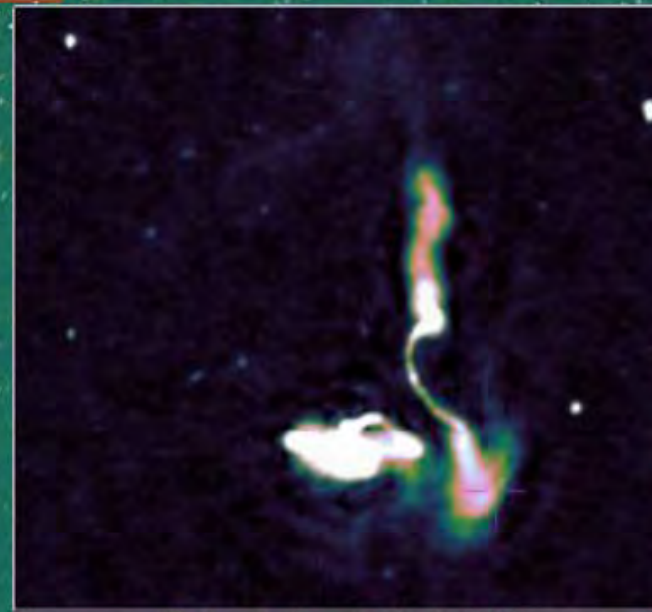
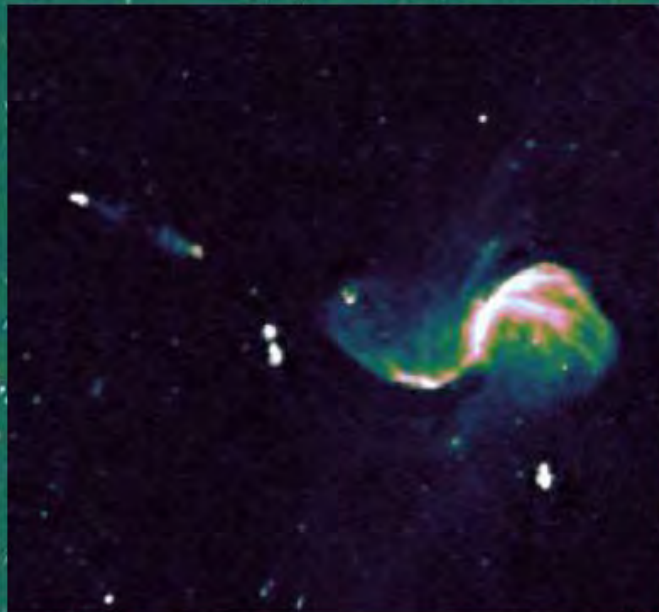
**FRII**  
**FRI**  
galaxies





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

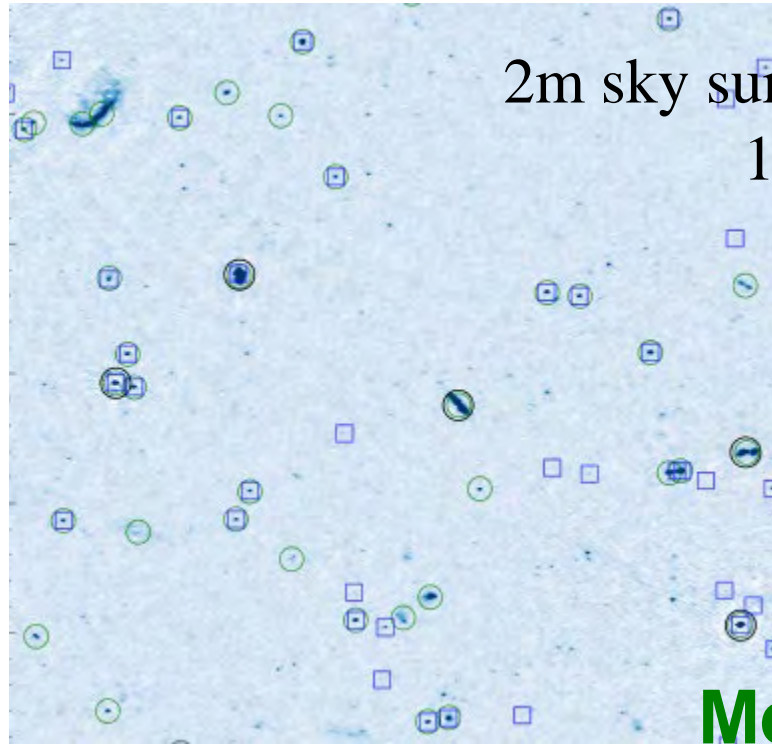
LOTSS: LOFAR 2m Sky Survey



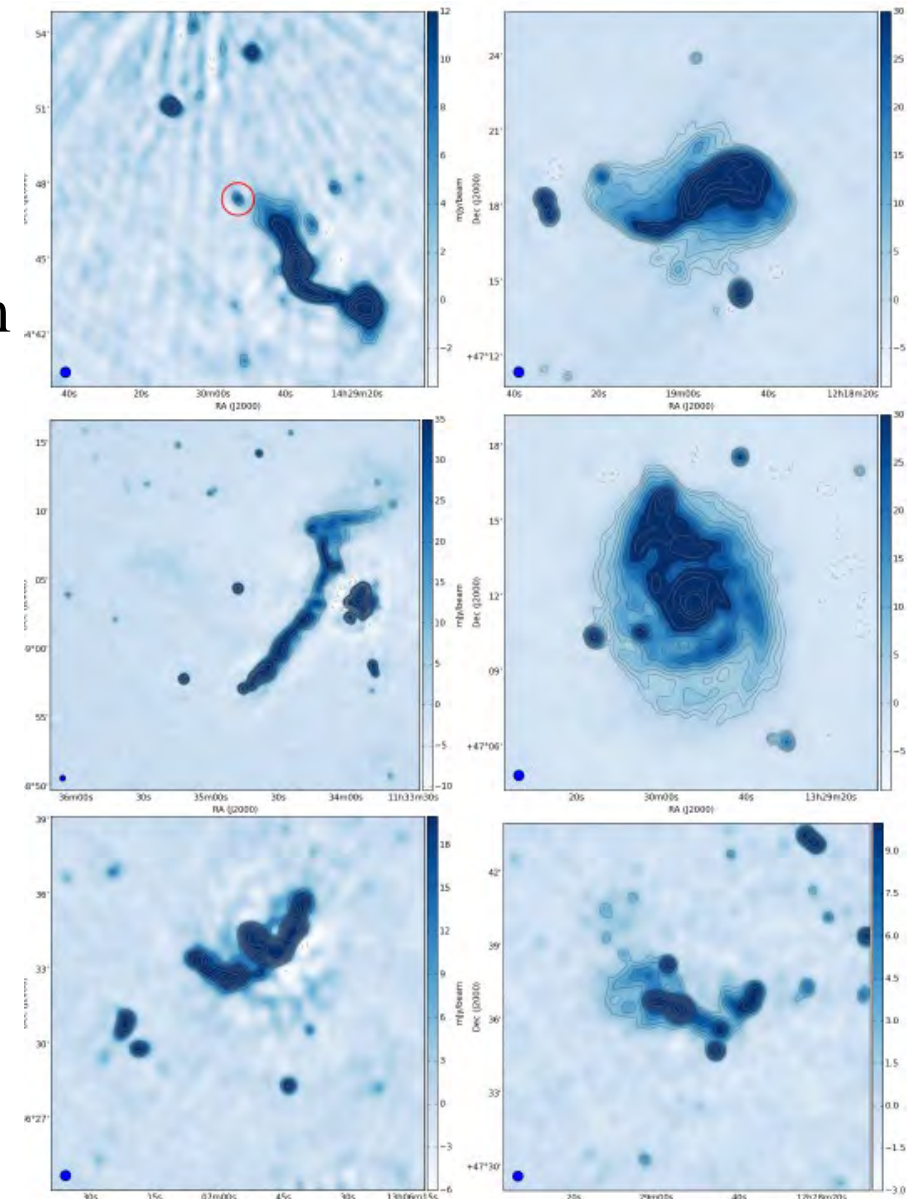
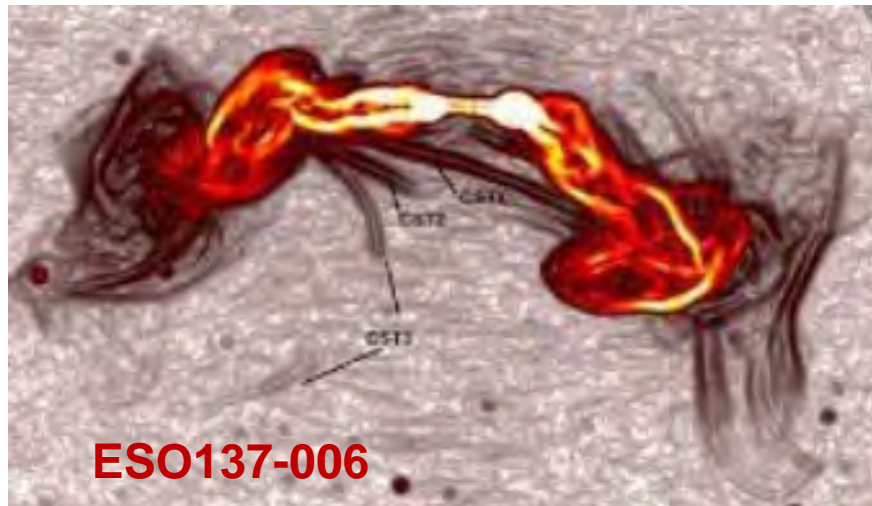
AGN anciens  
e- relativistes



# LOFAR LOTSS



MeerKAT

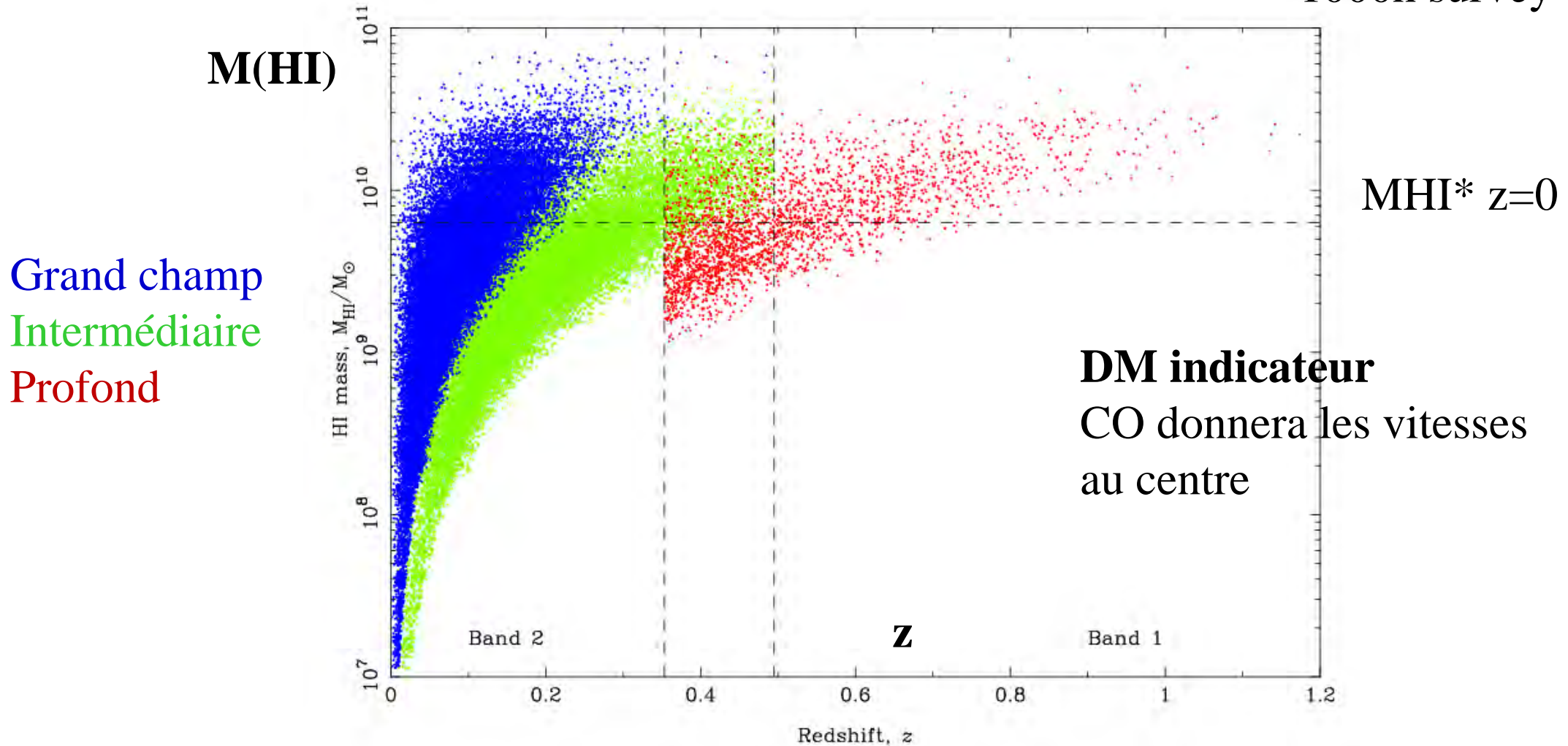


Des structures synchrotron nouvelles  
Entre les lobes radio



# 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 m<sup>2</sup>**  
d'aire effective  
à 25 MHz

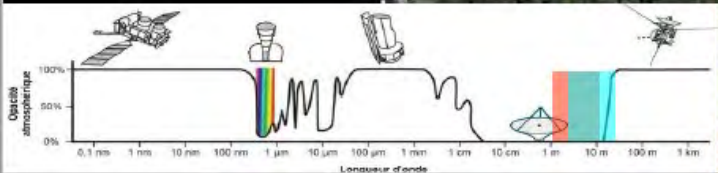
**10 à 85 MHz**  
de gamme de fréquence  
(longueurs d'onde  
de 3,5 m à 30 m)

**19**  
antennes dans  
1 mini-réseau

**3 km**  
de distance  
au mini-réseau  
le plus éloigné

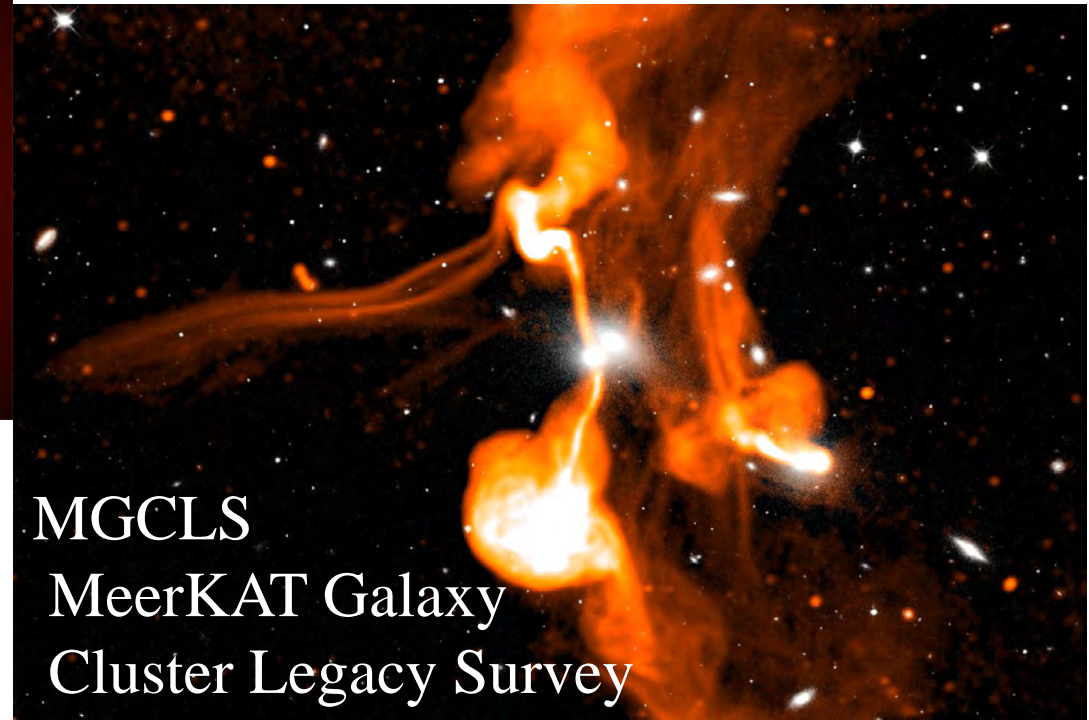
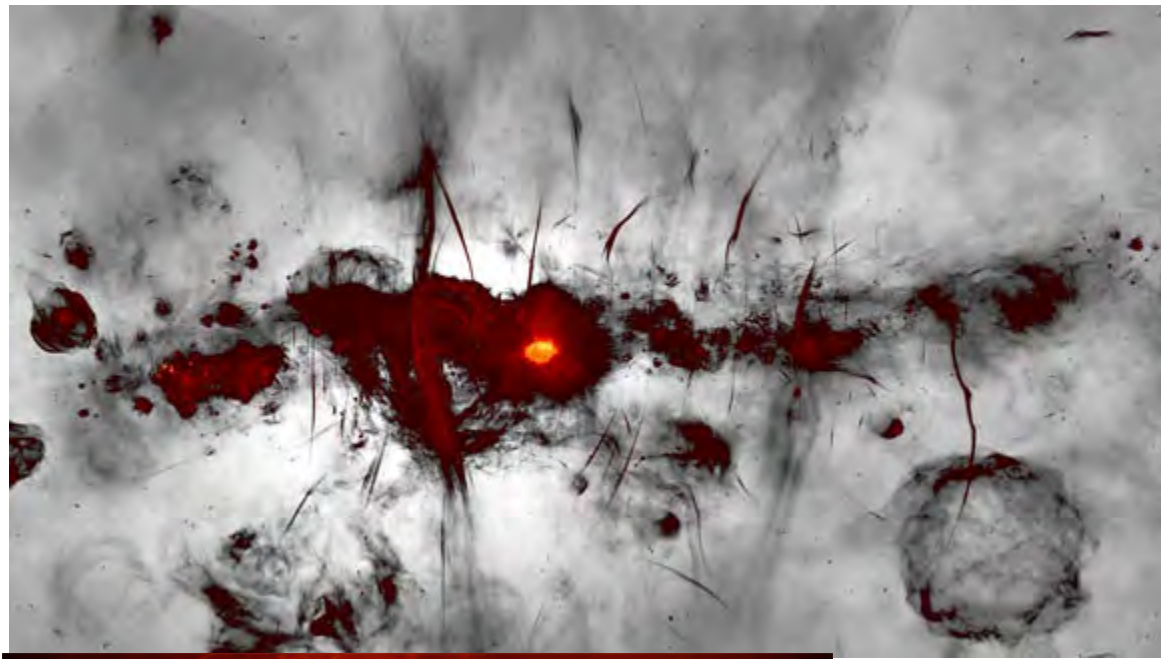
**600 Gbits/s**  
de volume de données  
traitées en temps réel  
24/7

**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

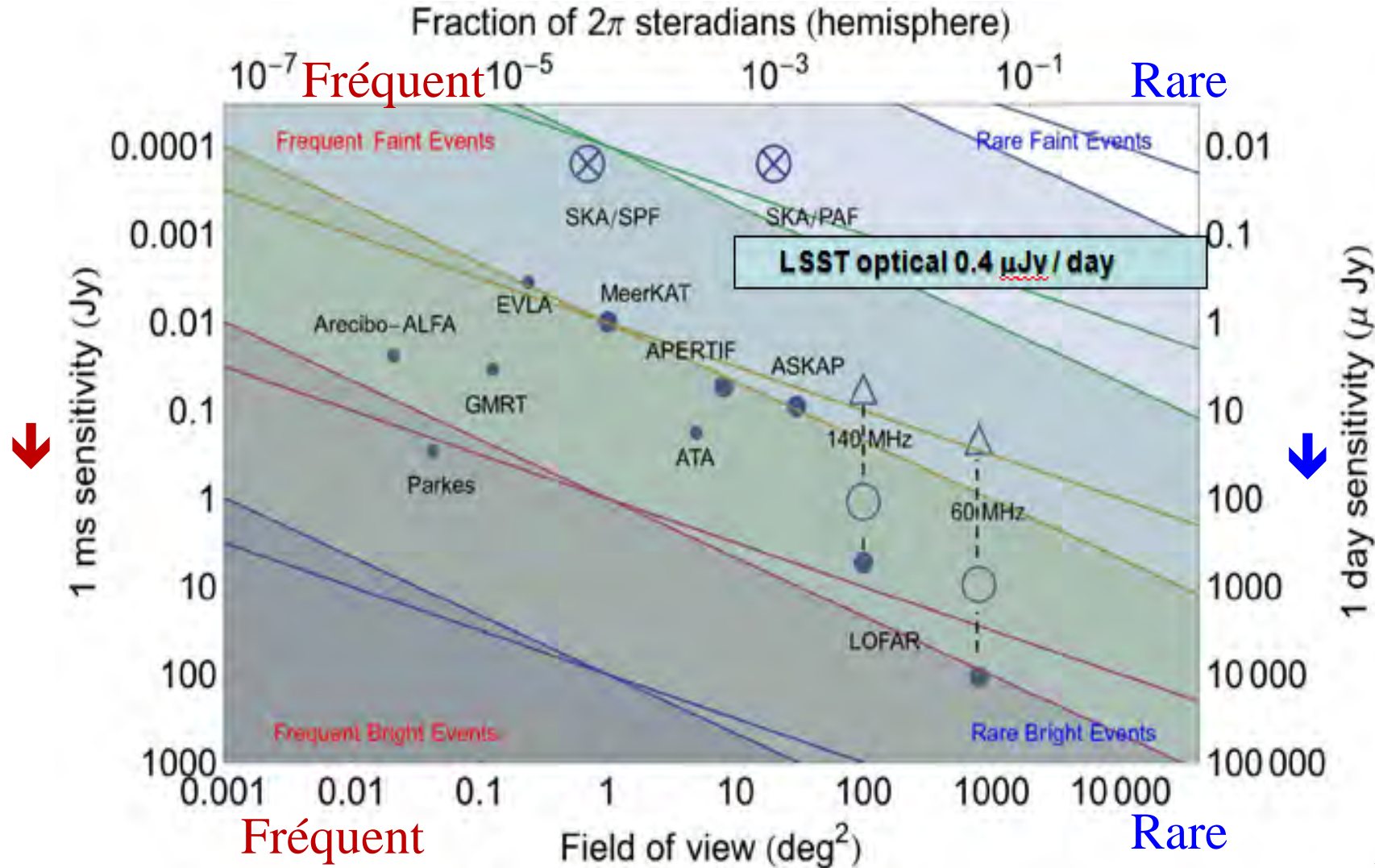




# Une nouvelle dimension: le ciel variable

**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 deg<sup>2</sup>, 15s/pose**

**LSST**

**Euclid:**

**100Gb/jour**

