

Astrophysique française aux fréquences radio, vers SKA

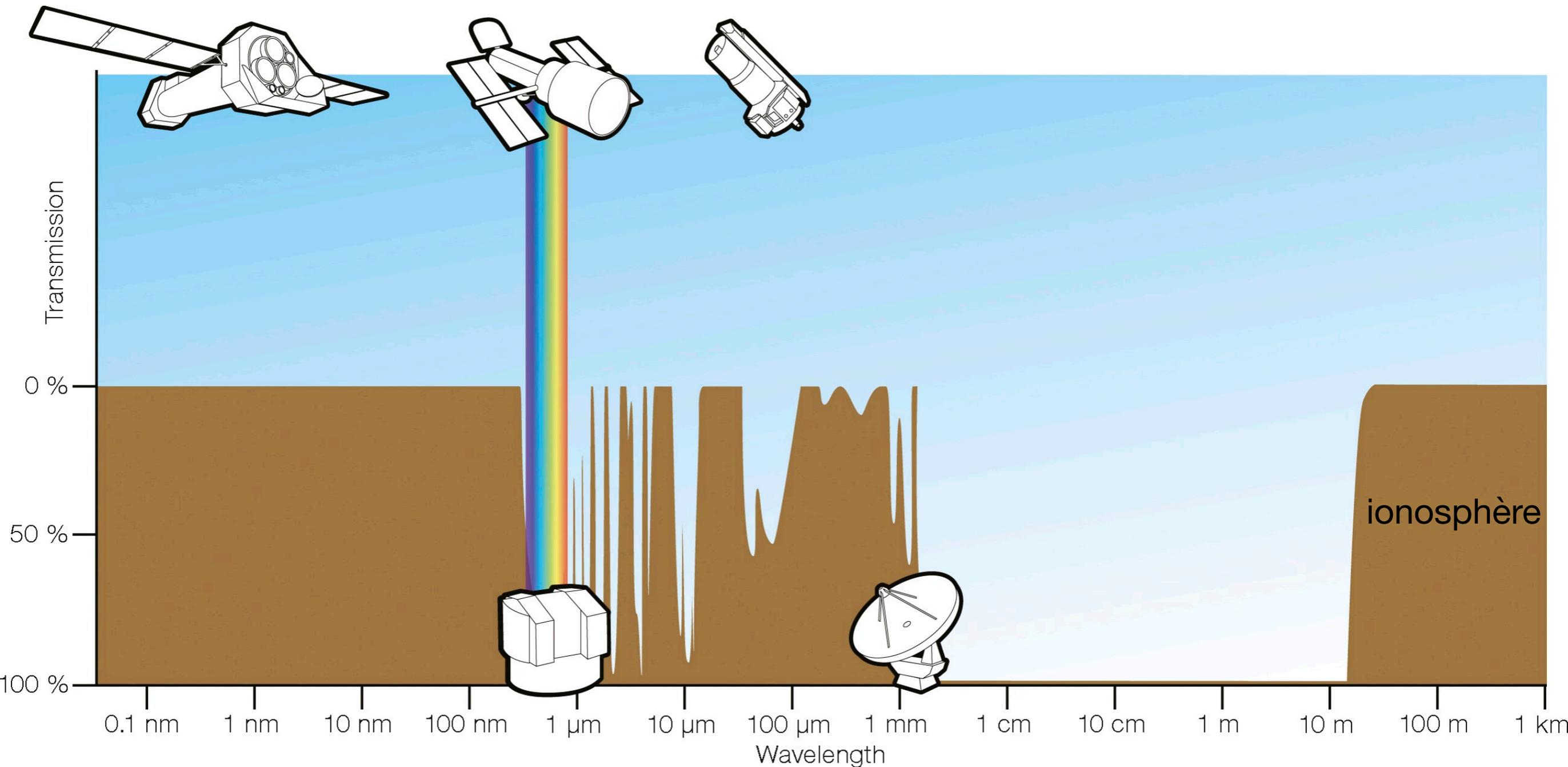
Marc-Antoine Miville-Deschênes

École Normale Supérieure, Paris



Radio-astronomie

10 MHz -> 1000 GHz (~300 micron)

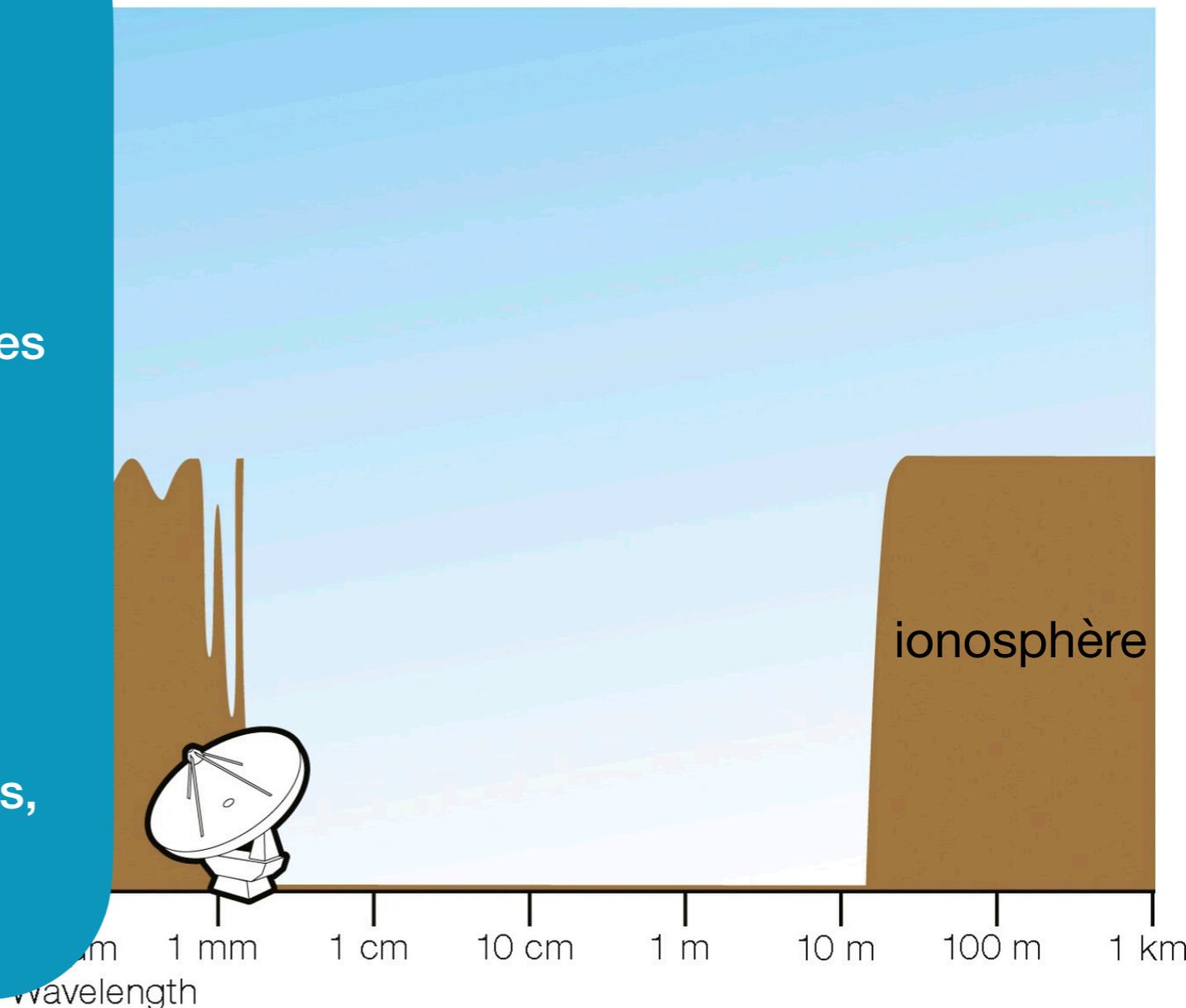


Radio-astronomie

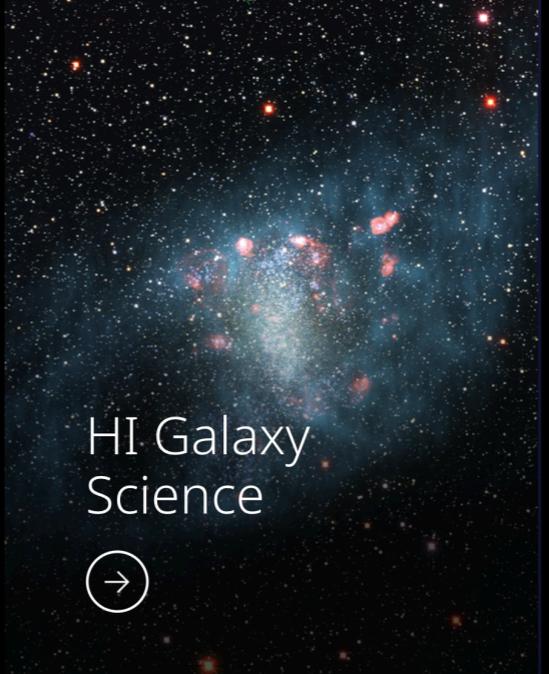
10 MHz -> 1000 GHz (~300 micron)

Traceurs uniques

- La raie à 21 cm : H neutre
- CMB
- Synchrotron -> magnétisme, rayons cosmiques
- Free-free : gaz ionisé diffus
- Raies de recombinaison : C, H
- Raies de molécules complexes
- Effet Zeeman
- Poussières (taille cm-m)
- Tracking rapide : Fast Radio Burst, transitoires, pulsars (-> ondes gravitationnelles)



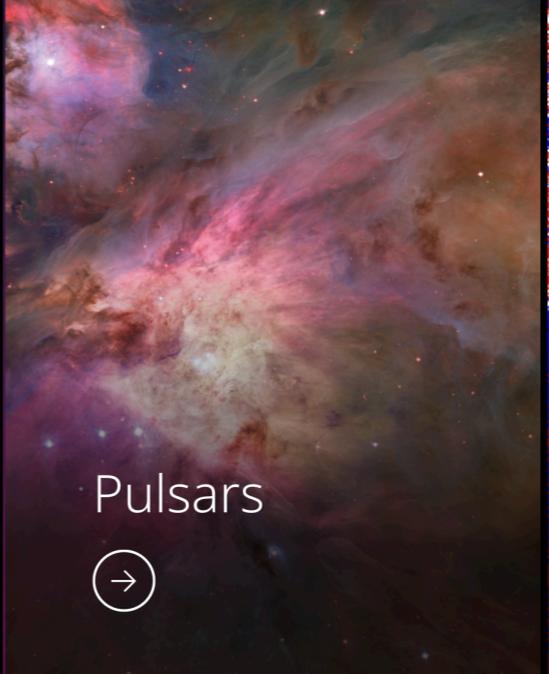
SKA Science working groups

A deep space image showing a galaxy with a bright blue core and surrounding reddish and white star clusters.

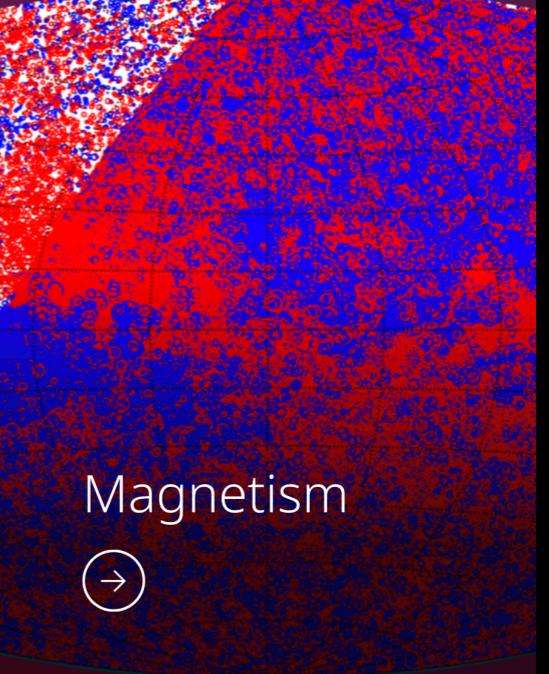
HI Galaxy
Science

A colorful, abstract image representing the Epoch of Reionization, with bright orange and red regions against a dark background.

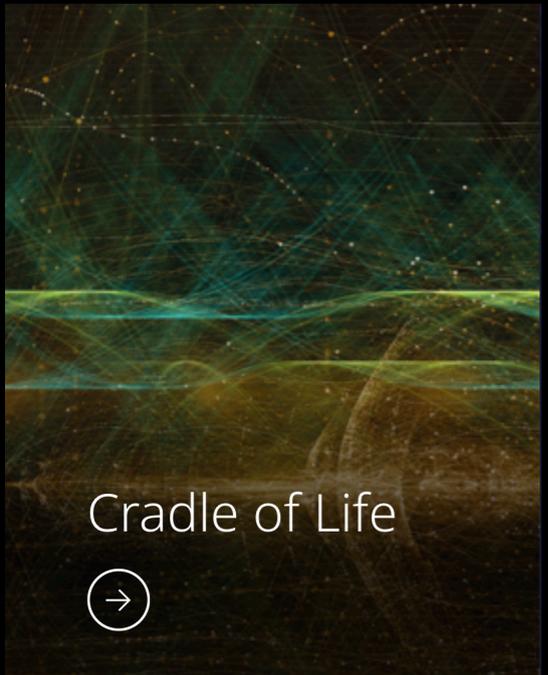
Epoch Of
Reionization

A nebula-like image with soft, glowing clouds in shades of purple, pink, and white.

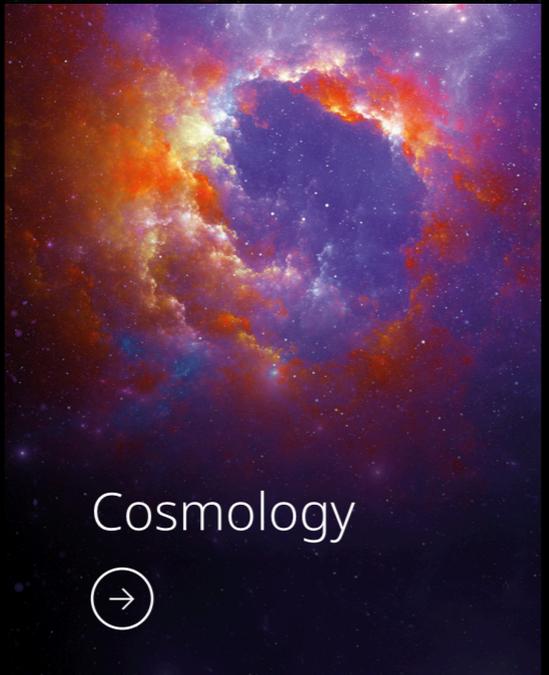
Pulsars

A grid-like image with a color gradient from red to blue, representing magnetic field data.

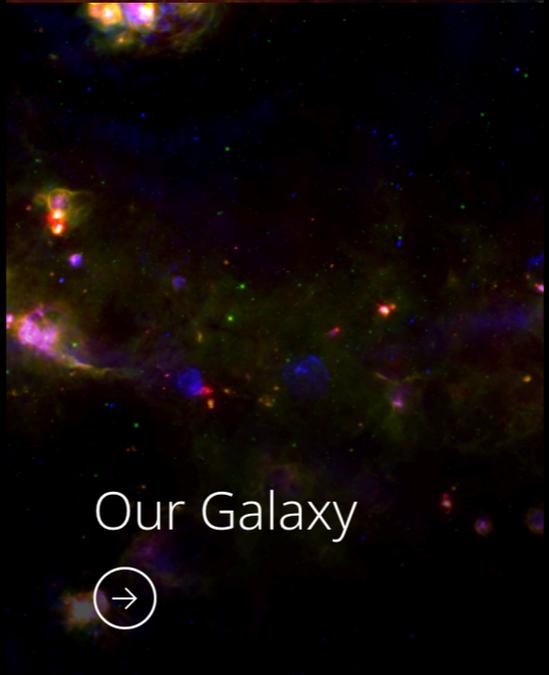
Magnetism

An abstract image with green and yellow light trails and patterns, representing the Cradle of Life.

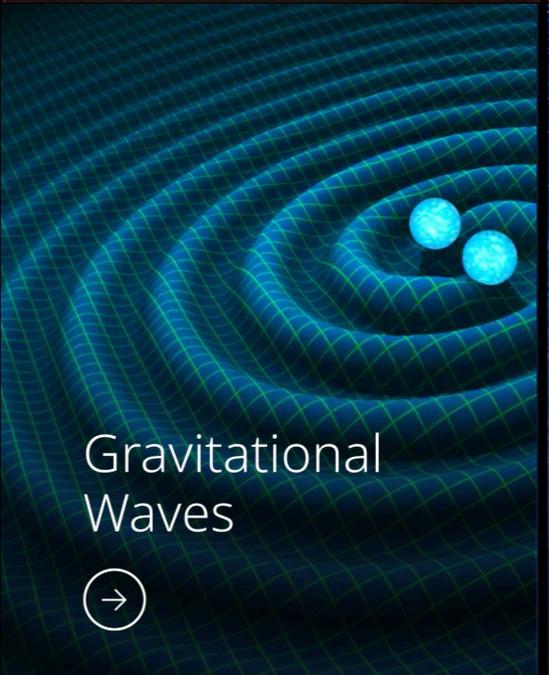
Cradle of Life

A colorful, swirling image representing cosmological structures, with orange, red, and purple hues.

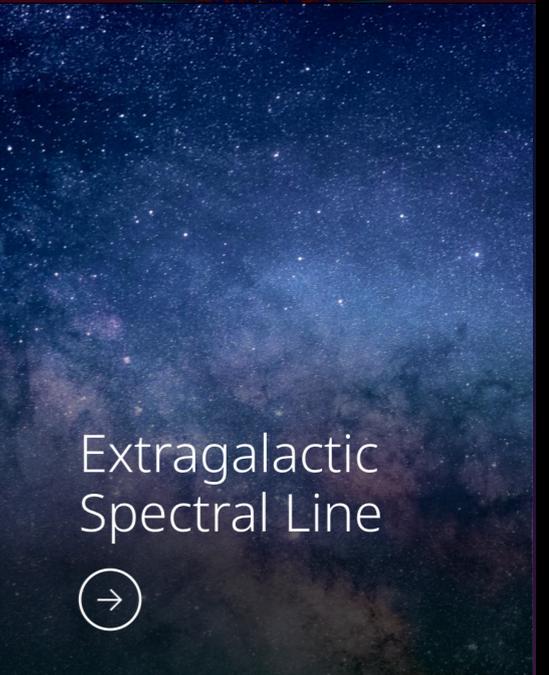
Cosmology

A dark space image with scattered stars and a faint, colorful nebula, representing our galaxy.

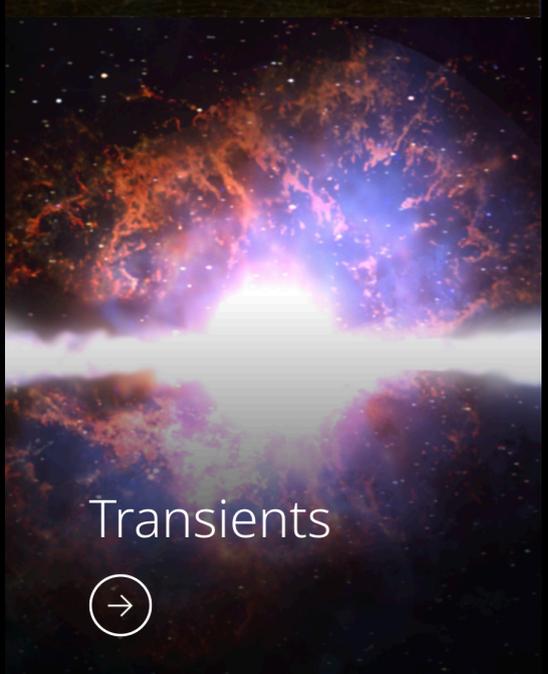
Our Galaxy

A 3D visualization of gravitational waves, showing blue spheres and green grid lines curving around them.

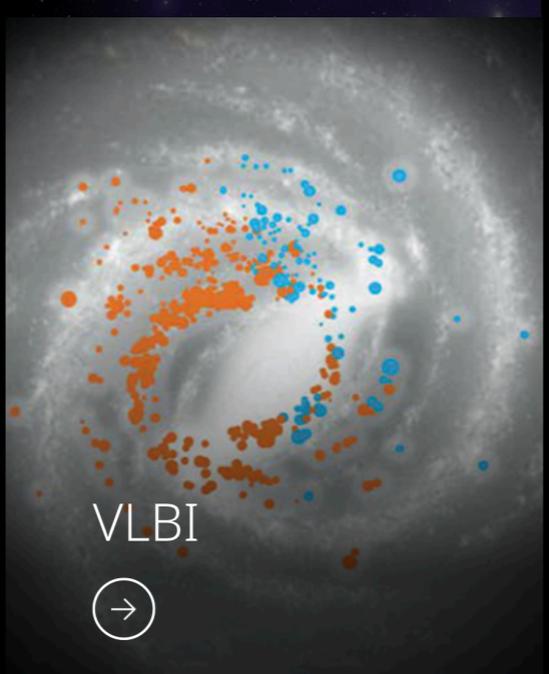
Gravitational
Waves

A dark space image with a faint, diffuse blue and white glow, representing an extragalactic spectral line.

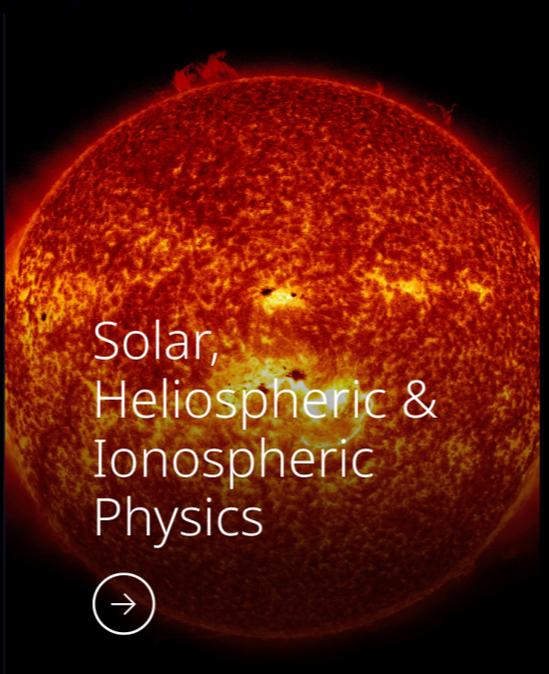
Extragalactic
Spectral Line

A bright, colorful image of a transient event, showing a mix of red, purple, and white light.

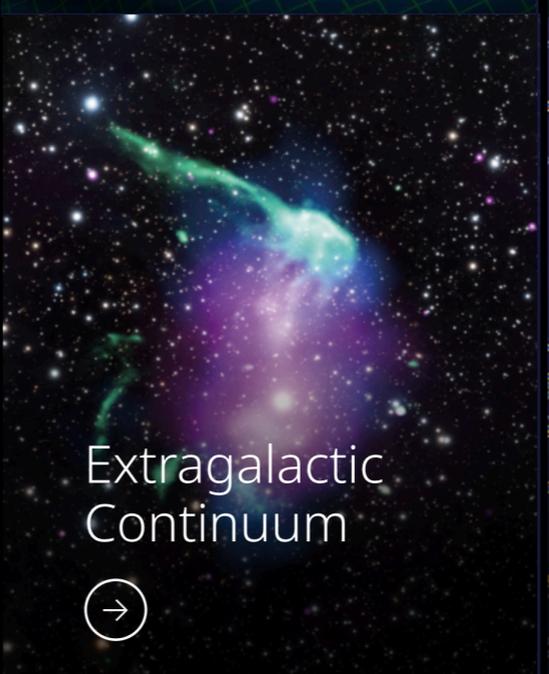
Transients

A grayscale image of a galaxy with orange and blue dots scattered across it, representing VLBI observations.

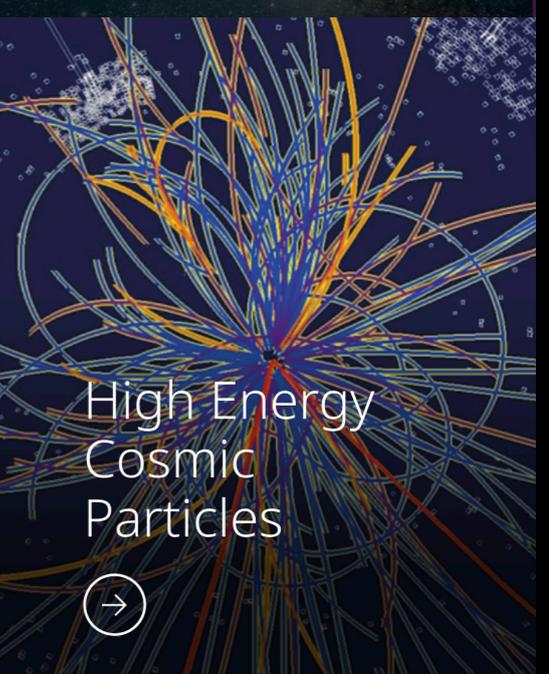
VLBI

A close-up image of the sun, showing its bright orange and yellow surface with solar flares.

Solar,
Heliospheric &
Ionospheric
Physics

A dark space image with a bright, colorful nebula and a green comet-like object, representing an extragalactic continuum.

Extragalactic
Continuum

A complex image with many thin, colorful lines radiating from a central point, representing high energy cosmic particles.

High Energy
Cosmic
Particles

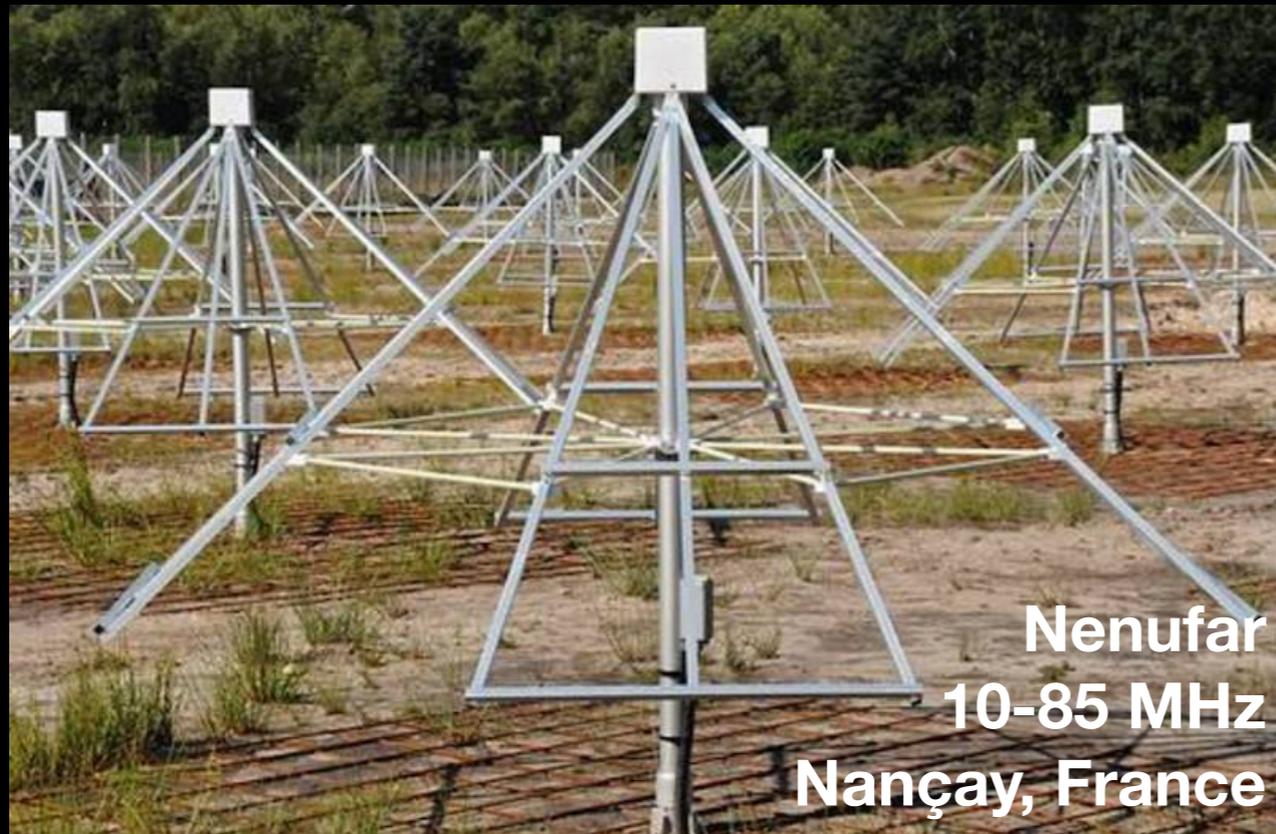


Les précurseurs de SKA

ASKAP, Australie



Meerkat, Afrique du Sud



**Nenufar
10-85 MHz
Nançay, France**



**LOFAR
10-250 MHz
Réseau de stations européen
Une station à Nançay, France**

SKAO : un observatoire, deux télescopes, trois sites

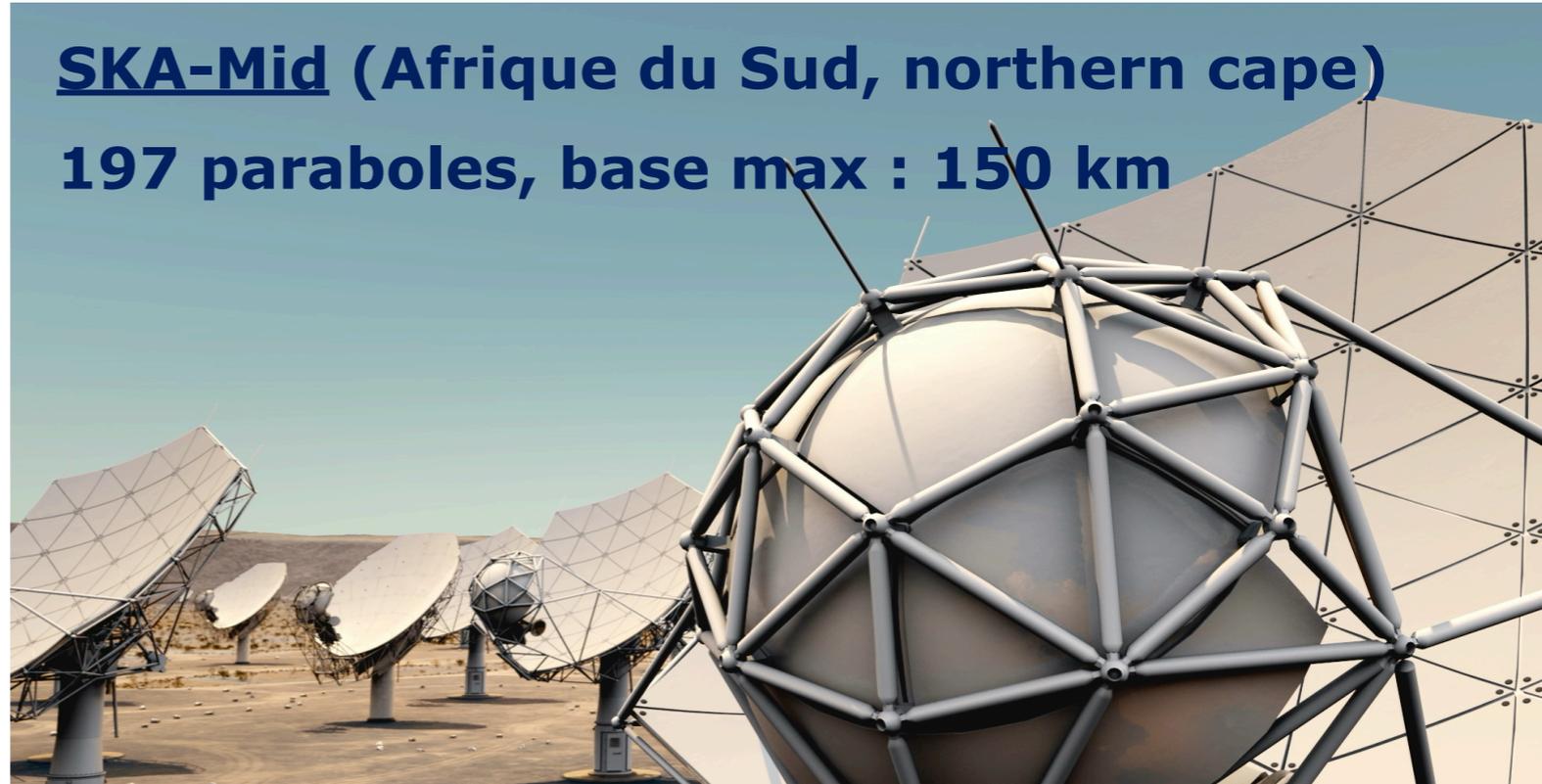
Construction en cours
Science verification : 2027
Opérations : 20230

SKA-HQ (Jodrell Bank, UK)



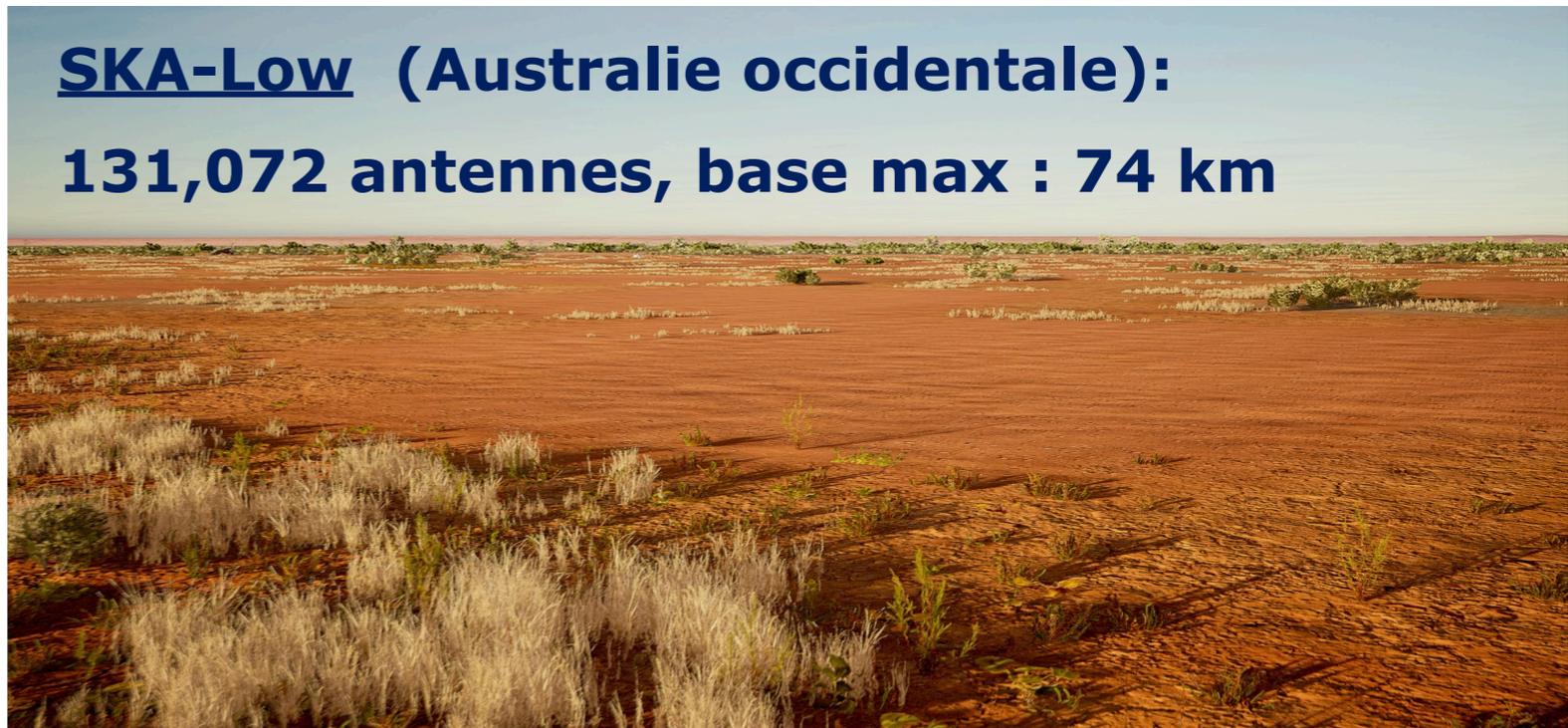
SKA-Mid (Afrique du Sud, northern cape)

197 paraboles, base max : 150 km



SKA-Low (Australie occidentale):

131,072 antennes, base max : 74 km



SKAO est construit par des radio-astronomes
pour tous les astronomes

SKA-Low



AA*



SKA-Mid

307
Stations

Up to **48**
station beams

Up to **1440**
substations

74 km
Max Baseline

SKA008 •

Up to **16** subarrays
Commensal Observations

Continuum

Spectral Line

Pulsar Timing

Pulsar Search

Transient Buffer

VLBI

Observing modes

Bands



50 - 350 MHz

0.35-1.05 GHz

1

2

0.95-1.76 GHz

4.6-8.5 GHz

5a



5b

8.3-15.4 GHz*

* split over 2 x 2.5GHz tunable bands

We expect to build up to
the full set of capabilities over time

144
Antennas
(including
MeerKAT/MK+)

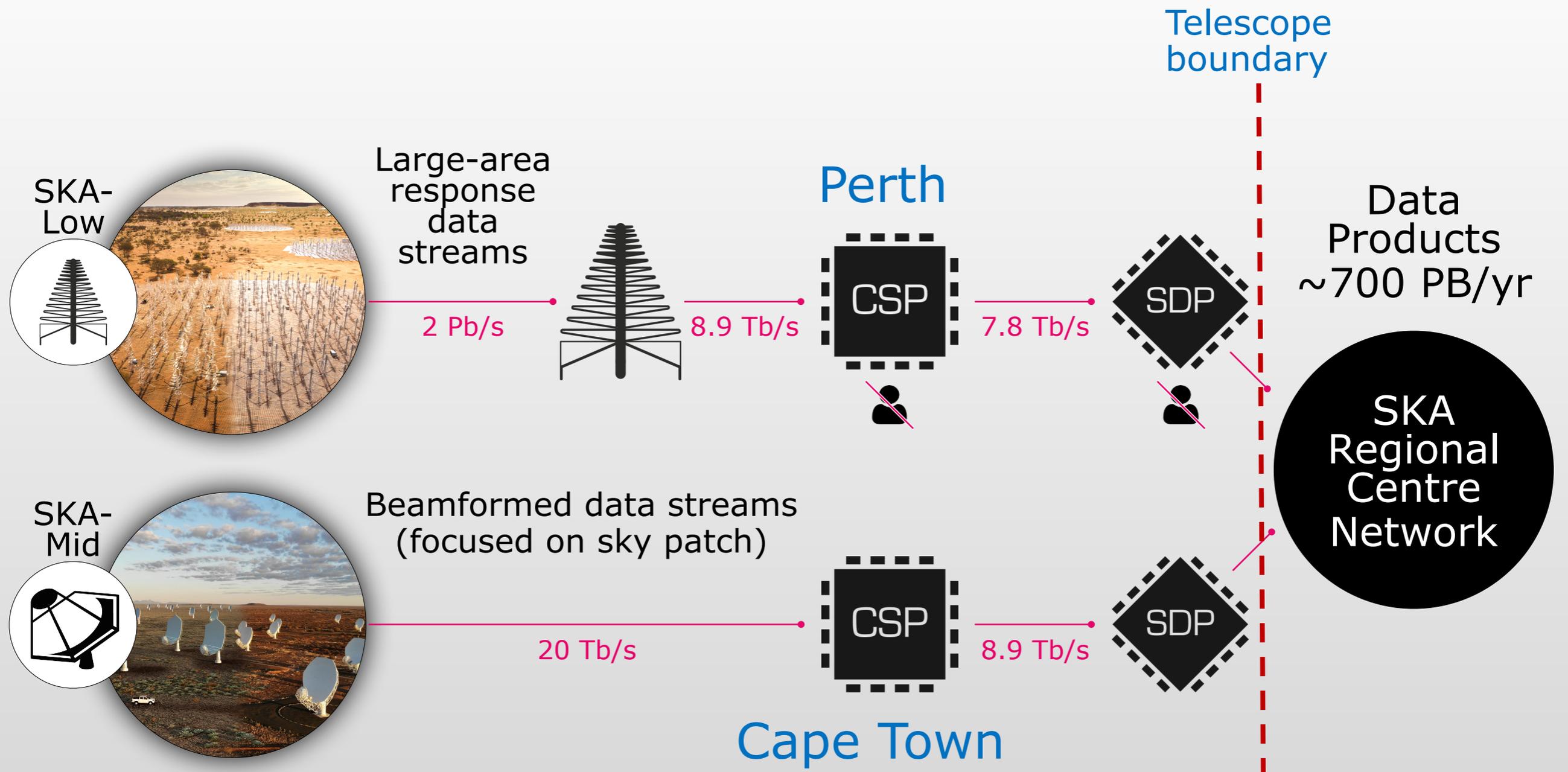
36 km

Max Baseline

*108 km including SKA008

prêt en 2029-2030
cycle 0 en 2030-2032

SKAO data processing: enormous data volumes

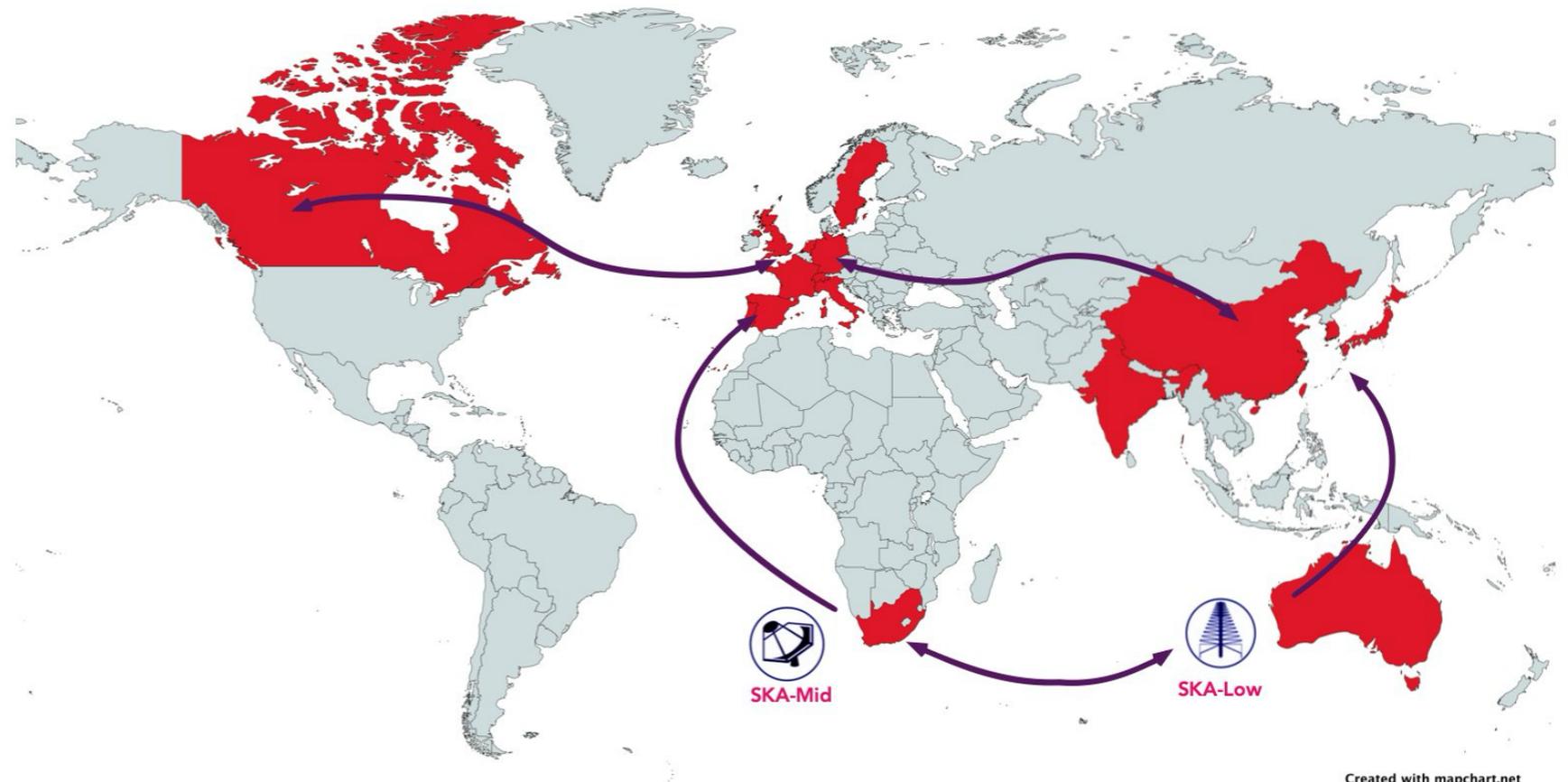


CSP: Central Signal Processor;
SDP: Science Data Processor (super-computer)

prêt en 2030

SKA Regional data Centres (SRCs)

- A federated global network of SRCs will provide user data access, host the SKA Science Archive, and support the SKA community.
- Will receive, curate and make available ~700PB/yr of SKAO science products.



First SKAO image



17th March 2025
4 SKA-Low stations

7-hour integration
25 MHz bandwidth
150 – 175 MHz
Noise level \sim 5-6 mJy/bm
70 arcsec resolution
25 sq degrees (100 full moons)
Central source is 56 Jy

 **1,024**
ANTENNAS

 **~85**
GALAXIES DETECTED

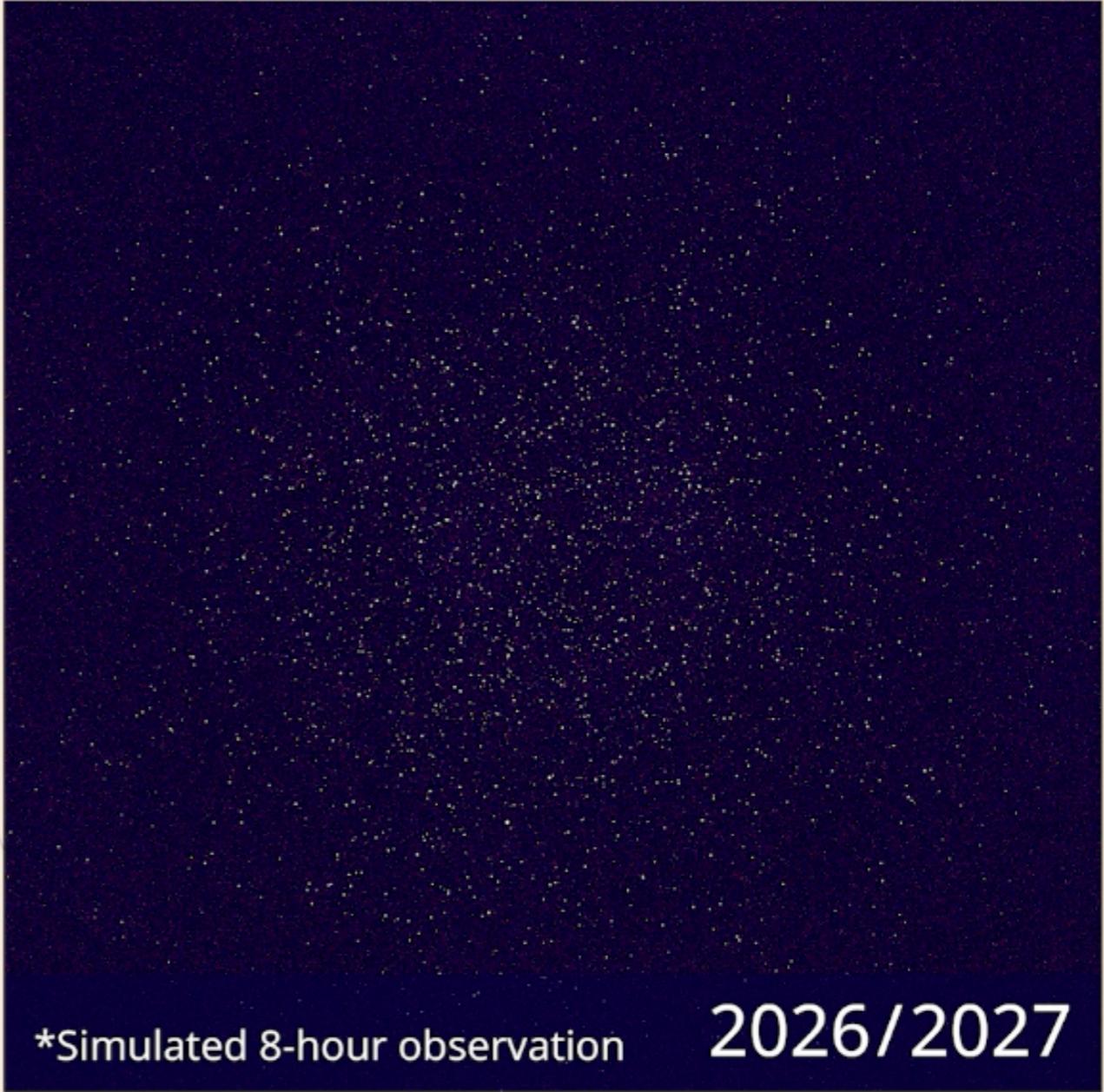
First SKAO image



March 2025

 **1,024**
ANTENNAS

 **~85**
GALAXIES DETECTED



*Simulated 8-hour observation

2026/2027

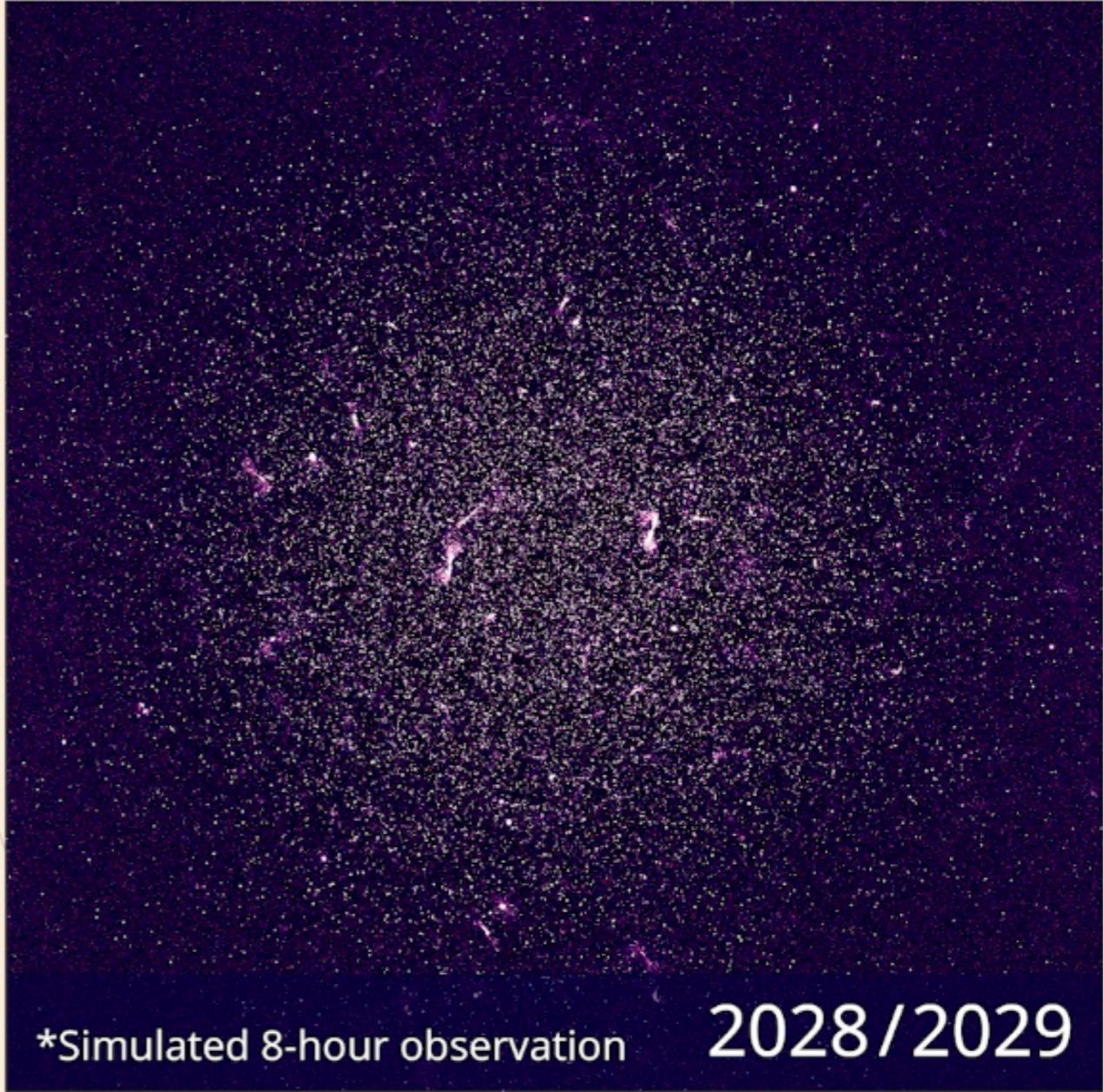
 **17,408**
ANTENNAS

 **~4,500**
GALAXIES DETECTED

First SKAO image



   **1,024**
ANTENNAS  **~85**
GALAXIES DETECTED



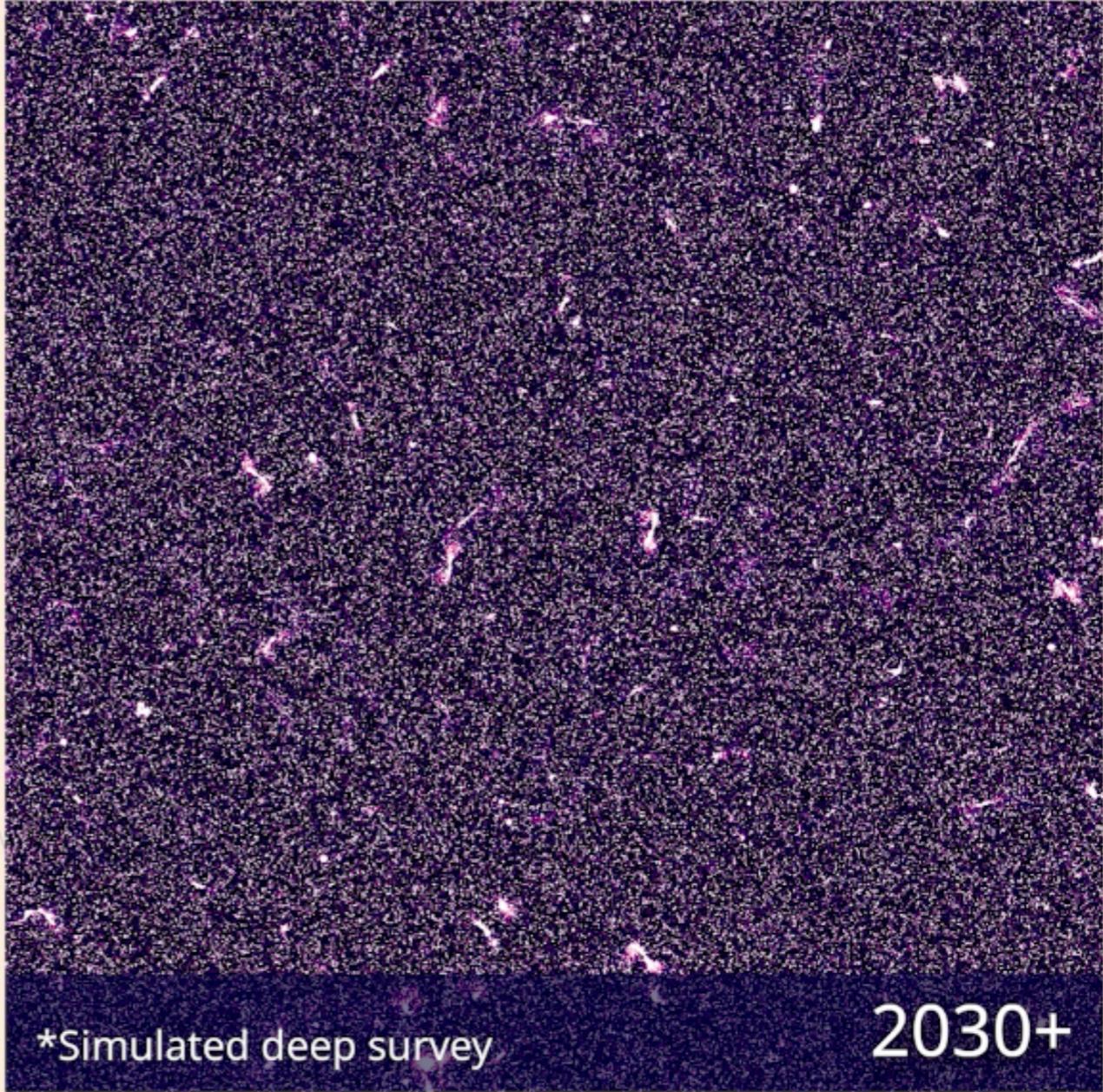
   **78,592**
ANTENNAS  **~26,000**
GALAXIES DETECTED

First SKAO image



 **1,024**
ANTENNAS

 **~85**
GALAXIES DETECTED

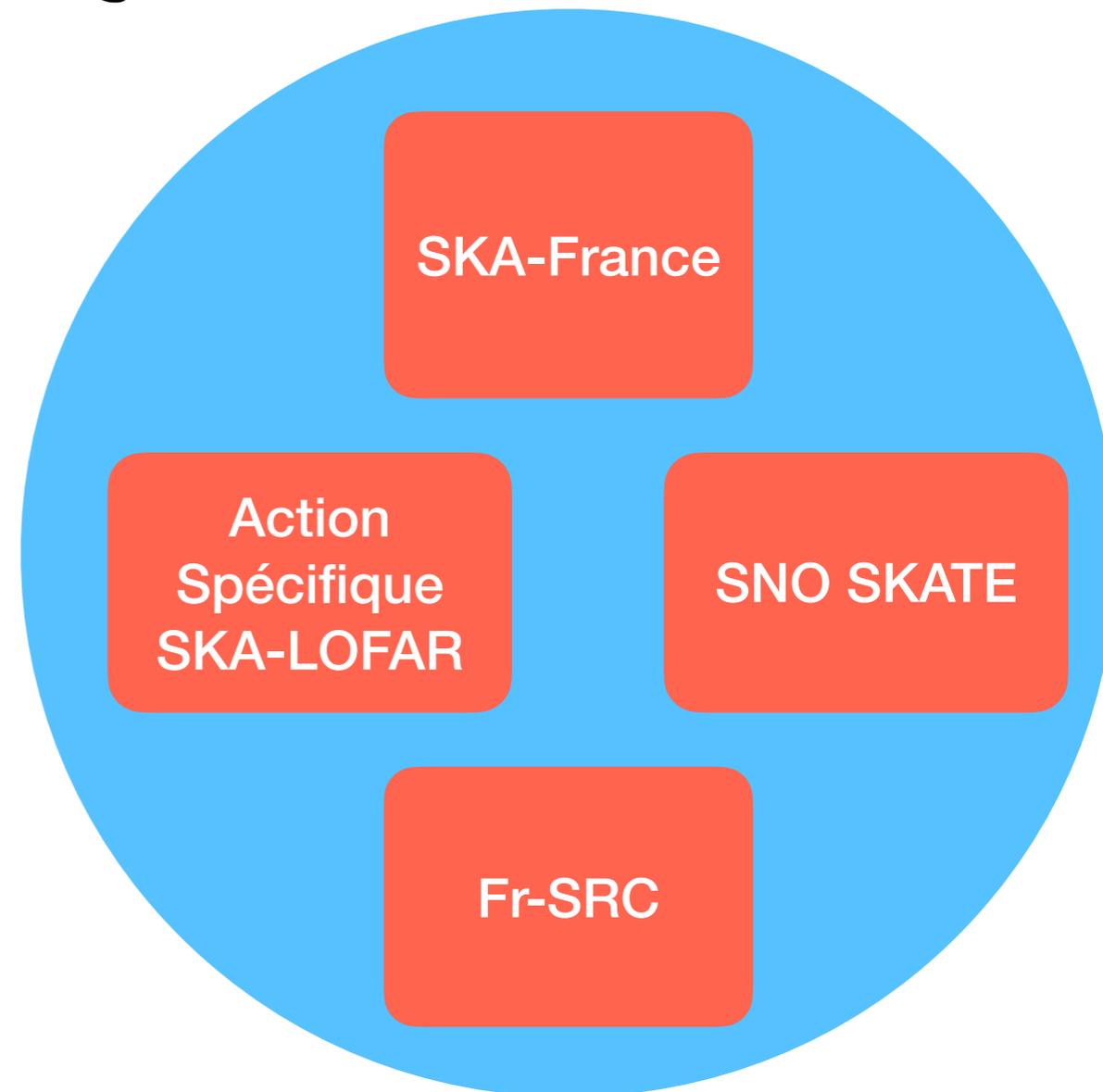


 **131,072**
ANTENNAS

 **600,000+**
GALAXIES DETECTED

La communauté radio française aujourd'hui

- ~90 scientifiques permanent actifs dans 16 laboratoires français, à travers la France
- Couverture quasi-complète des sujets scientifiques de SKA
 - Pulsars / ondes gravitationnelles
 - Transitoires, FRB
 - Galaxies, amas de galaxies
 - Cosmologie, Epoch of Reionisation
 - Soleil / étoiles, planétologie / exo-planètes
 - Milieu interstellaire



Grande évolution du paysage lors de 5 dernières années

- Mobilisation pour l'entrée de la France dans SKA
- Démarrage de NenuFAR+ASKAP+MeerKAT - élargissement thématique
- Construction du Fr-SRC, démarrage de NumPEX, intégration avec le CDS

L'Action Spécifique SKA-LOFAR

Création en 2009
directions précédentes :
Michel Tagger (2009-2012)
Stéphane Corbel (2012-2021)

- **Conseil Scientifique de 15 membres** : couverture thématique et géographie
- **Priorité du mandat qui s'achève** : préparation à l'exploitation de SKA
 - Accompagnement / renforcement de la communauté dans l'exploitation des précurseurs
 - Encourager l'implication dans les grands programmes scientifiques de SKA
 - Animer la réflexion amont sur la R&D technologique en radio basses et moyennes fréquences.
 - Construction du centre régional européen SKA
- **La prochaine direction sera un binôme**
 - Cherry Ng (LPC2E, expertise transitoire / FRB)
 - Antoine Gusdorf (LPENS, expertise formation d'étoiles, RRL)

Grande conférence française de radio-astronomie



astroradiofr24 | Astrophysique française aux fréquences radio, vers SKA

12-15 nov. 2024 Paris (France)

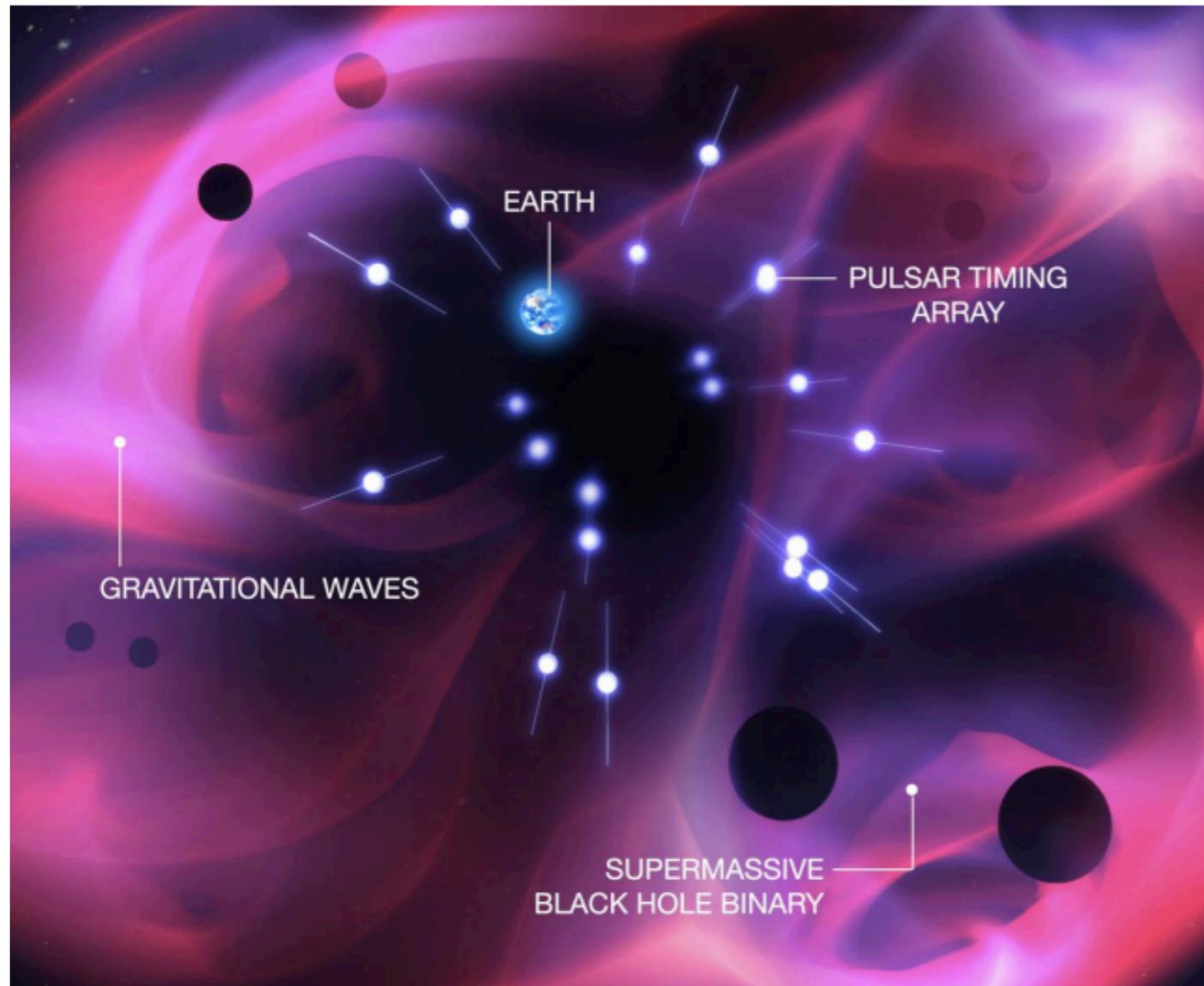
- <https://astroradiofr24.sciencesconf.org>
- 12-15 novembre 2024, Paris - 111 participant

Quelques faits marquants

- Détection de Starlink par LOFAR et NenuFAR : émission de l'électronique de bord - Xiang Zhang (LIRA)
- Deux SKAO data challenges (2022 et 2024) remportés par des équipes françaises pilotées par le LUX (F. Mertens, D. Cornu, B. Semelin...)
- Nouvelle méthode de détection d'exoplanètes : données LOFAR (C. Tasse, P. Zarka...)

Pulsar Timing Array

Détection d'un fond d'ondes gravitationnelles basse-fréquence



- Role central du NRT : monitoring de pulsars sur des décennies
- 70% des données de la collaboration Européenne
- Monitoring dans l'hémisphère nord, complémentaire à SKA
- Antoniadis+(2022)

NenuFAR est en opérations



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



60 000 m²
d'aire effective
à 25 MHz



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



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



96
mini-réseaux



19
antennes dans
1 mini réseau



6
mini-réseaux
distants



3 km
de distance
au mini-réseau
le plus éloigné



400 m
de diamètre au
cœur du réseau



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



180 km
de câbles
coaxiaux



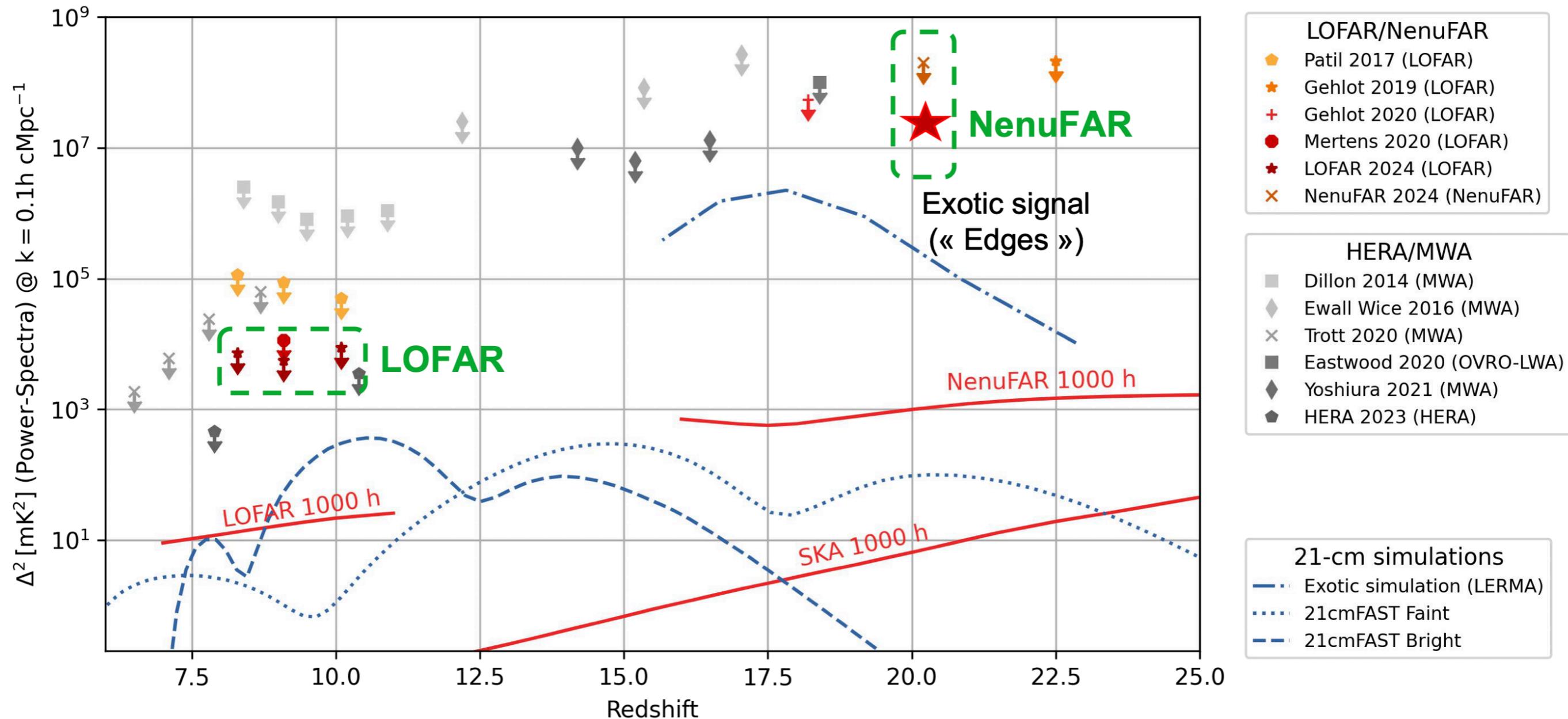
10 Po
de données brutes
traitées par an



Keys programs en cours. Deux appels annuels.
Plusieurs articles en rédaction

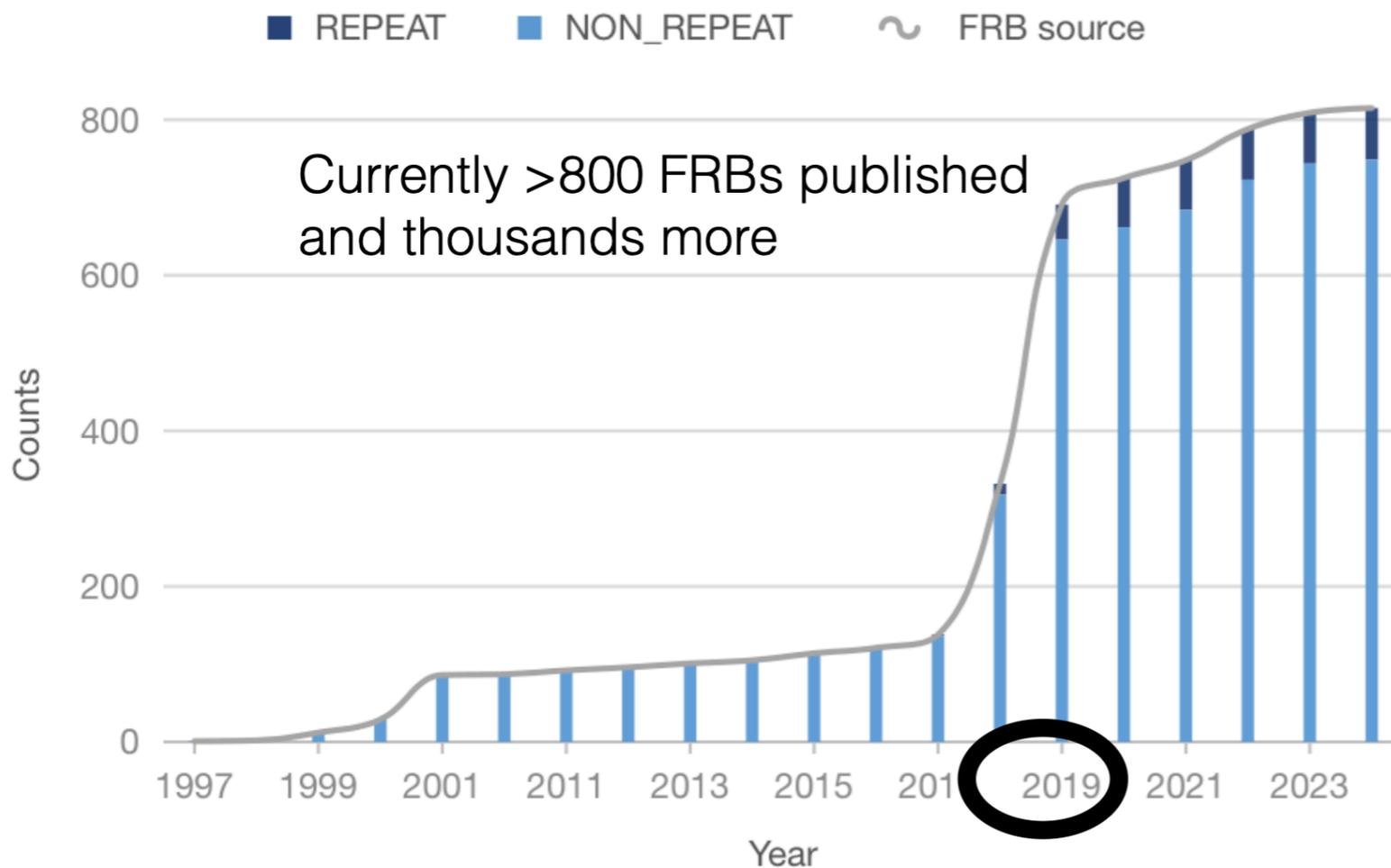
Epoch of Reionisation

Progress toward a detection



Chronology of the FRB discoveries

Plot from Blinkverse website



CHIME radio telescope (Canada)



Transit telescope = a large field-of-view and a high discovery rate

La dispersion du pulse permet de mesurer DM sur des distances cosmologiques

Programme d'observations de FRB avec NenuFAR en cours (les plus basses fréquences observées)

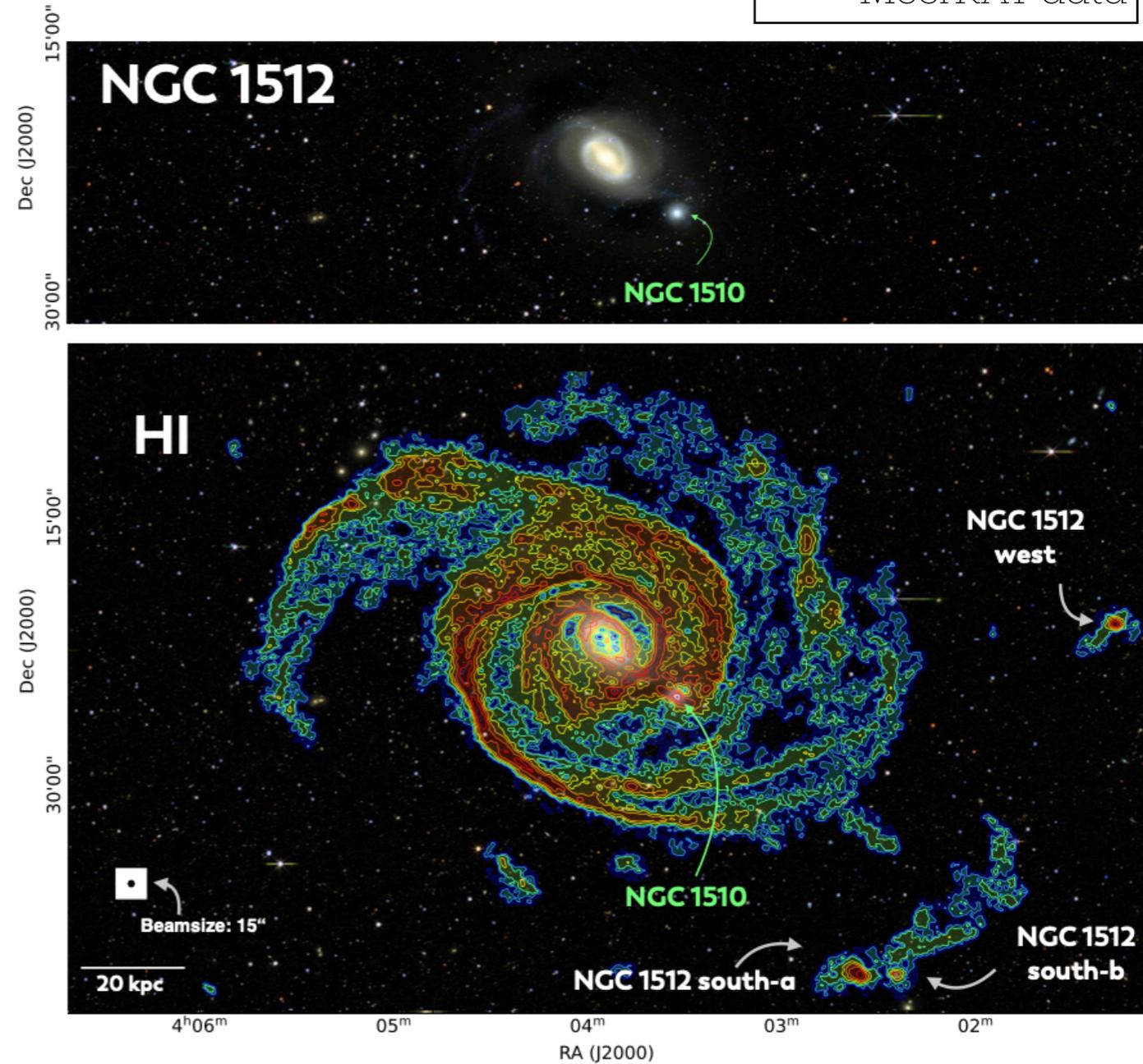
crédit : Cherry Ng

HI in galaxies

M81 triplet - de Blok+(2018)
VLA + GBT data

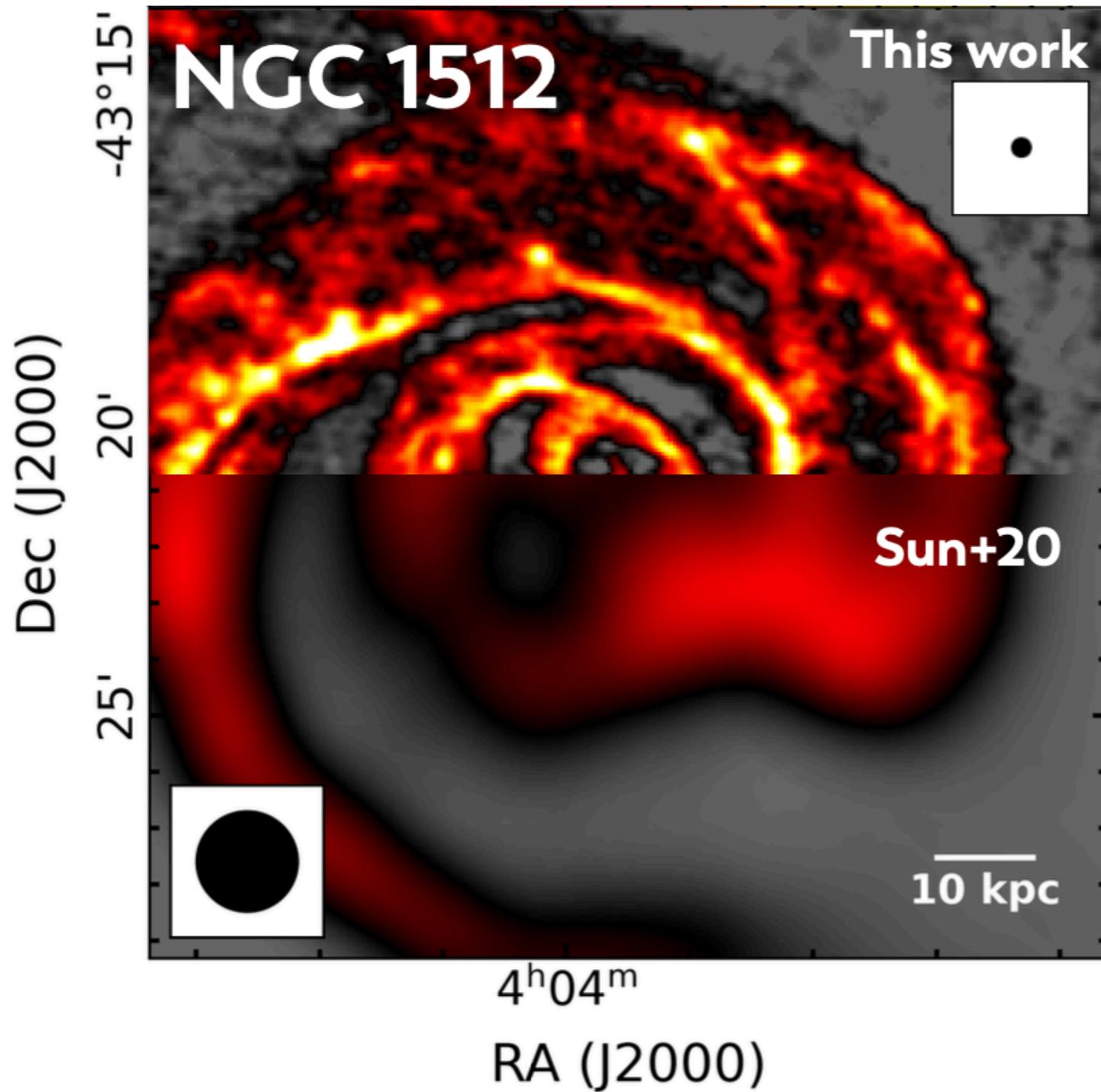


Eibensteiner+2024
MeerKAT data

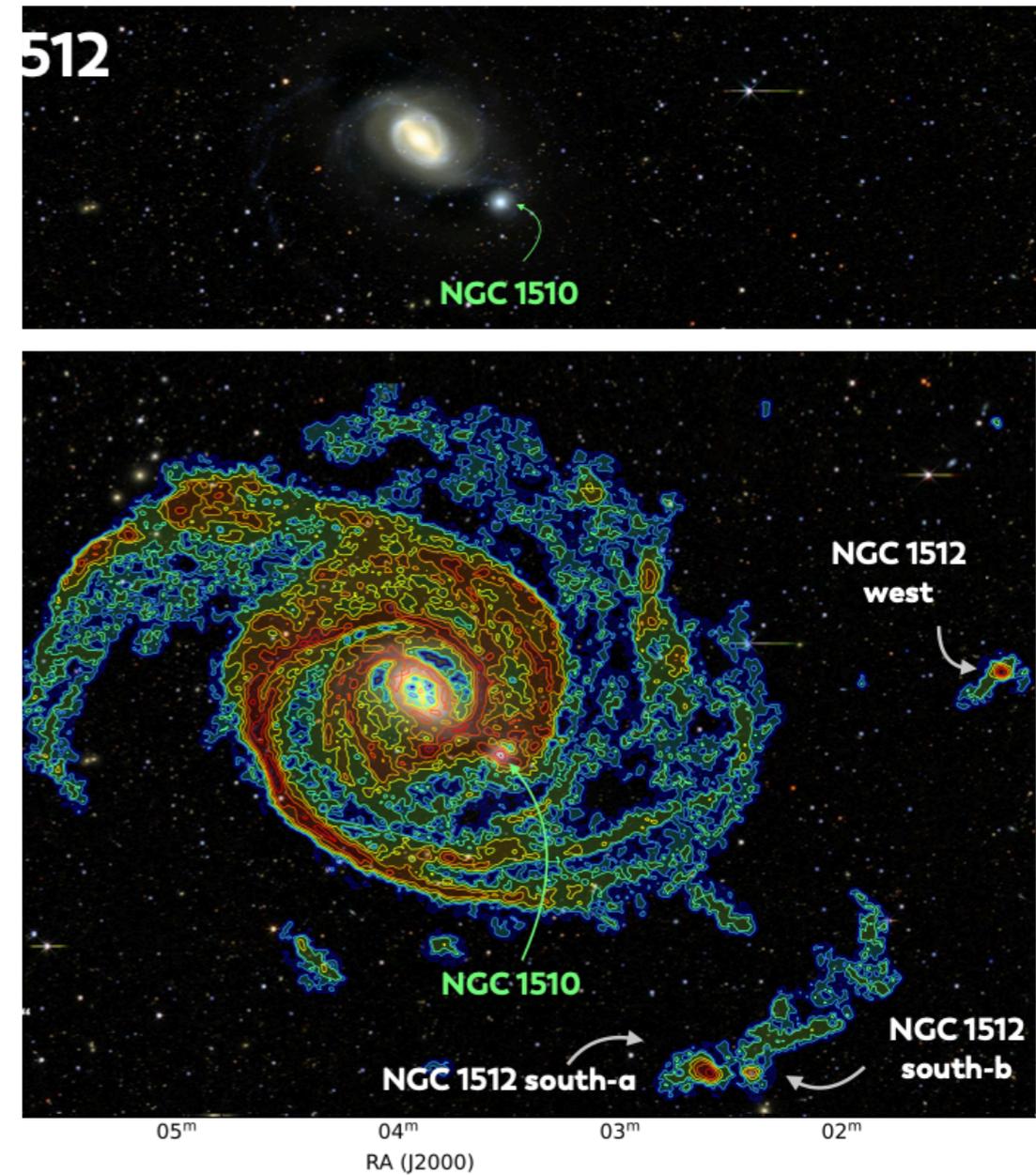


Interactions, halos, fountain, IGM relation, full disk dynamics...

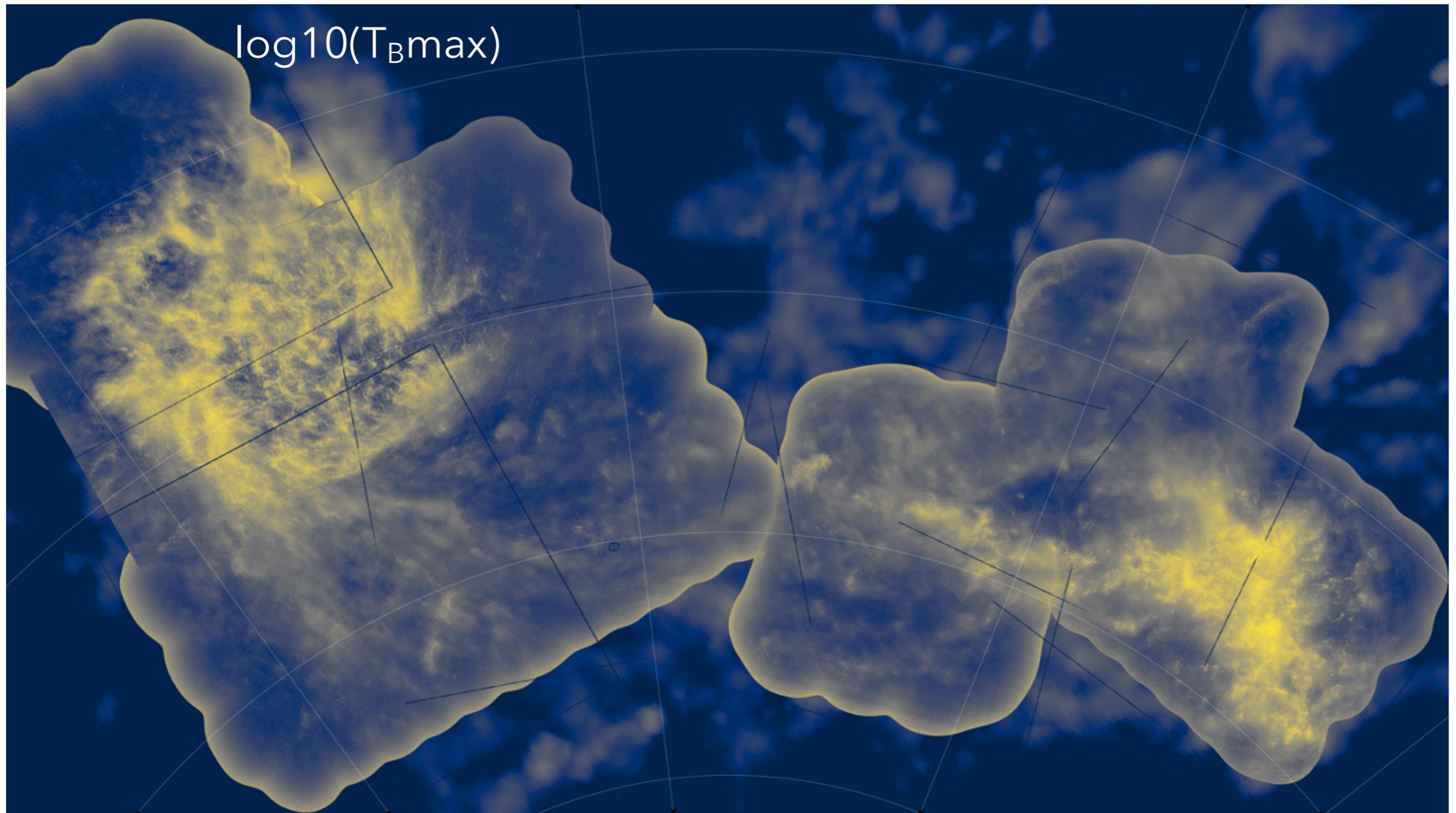
HI in galaxies



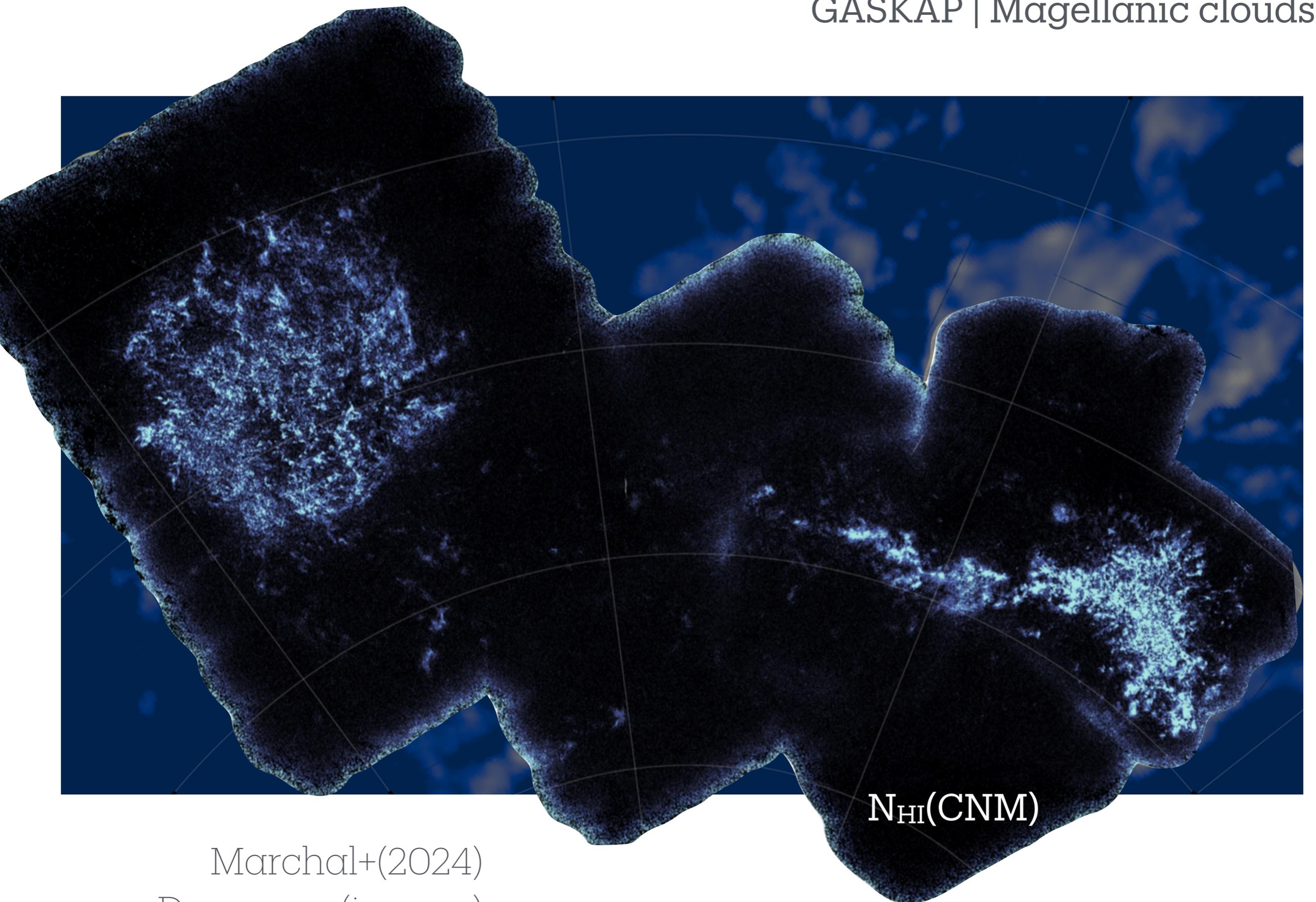
Eibensteiner+2024
MeerKAT data



Interactions, halos, fountain, IGM relation, full disk dynamics...



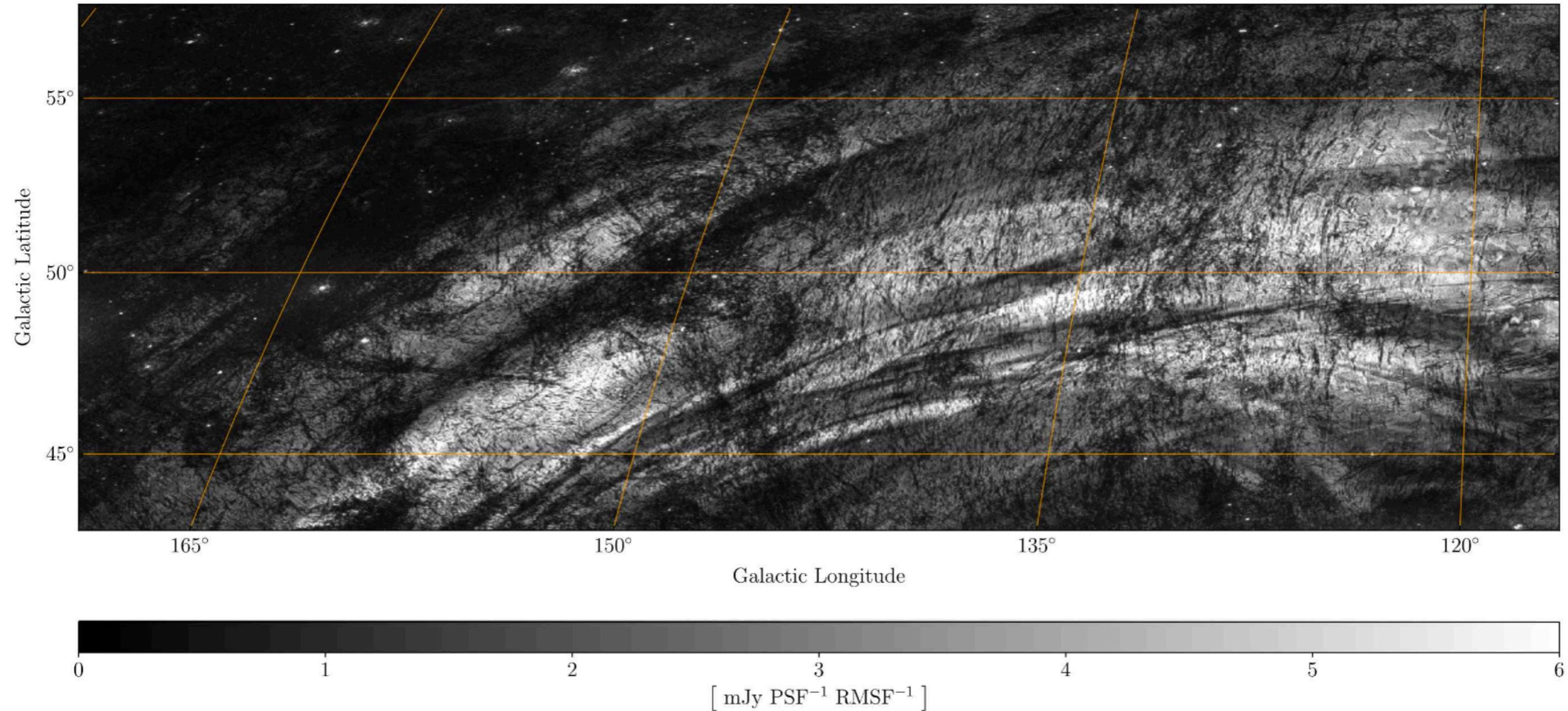
Marchal+(2024)
Dempsey+(in prep)



Marchal+(2024)
Dempsey+(in prep)

$N_{\text{HI}}(\text{CNM})$

LOFAT (LoTSS) - magnétisme interstellaire



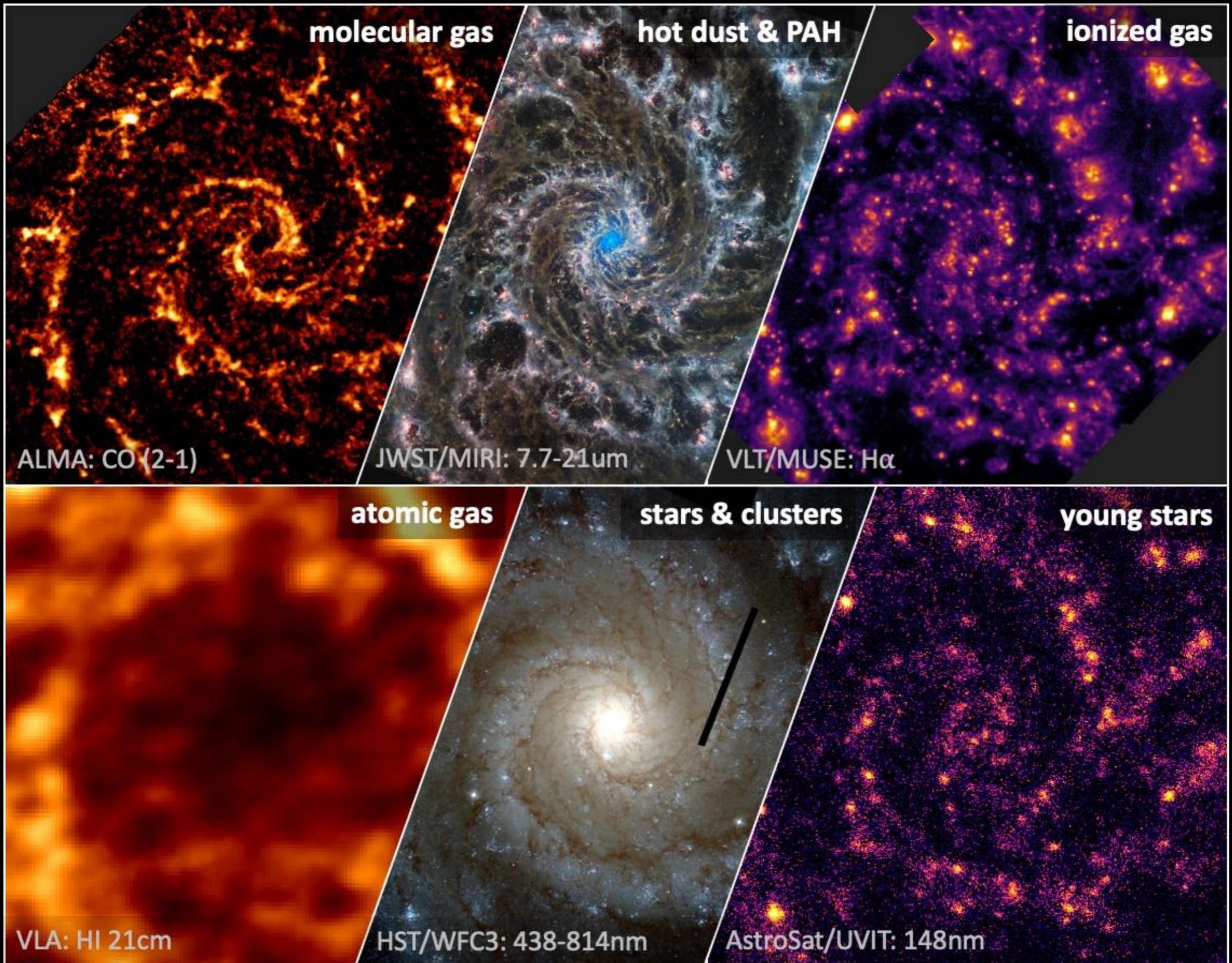
Erceg+(2022), Bracco+(2020), Bérat+(in prep)

Milky Way HI

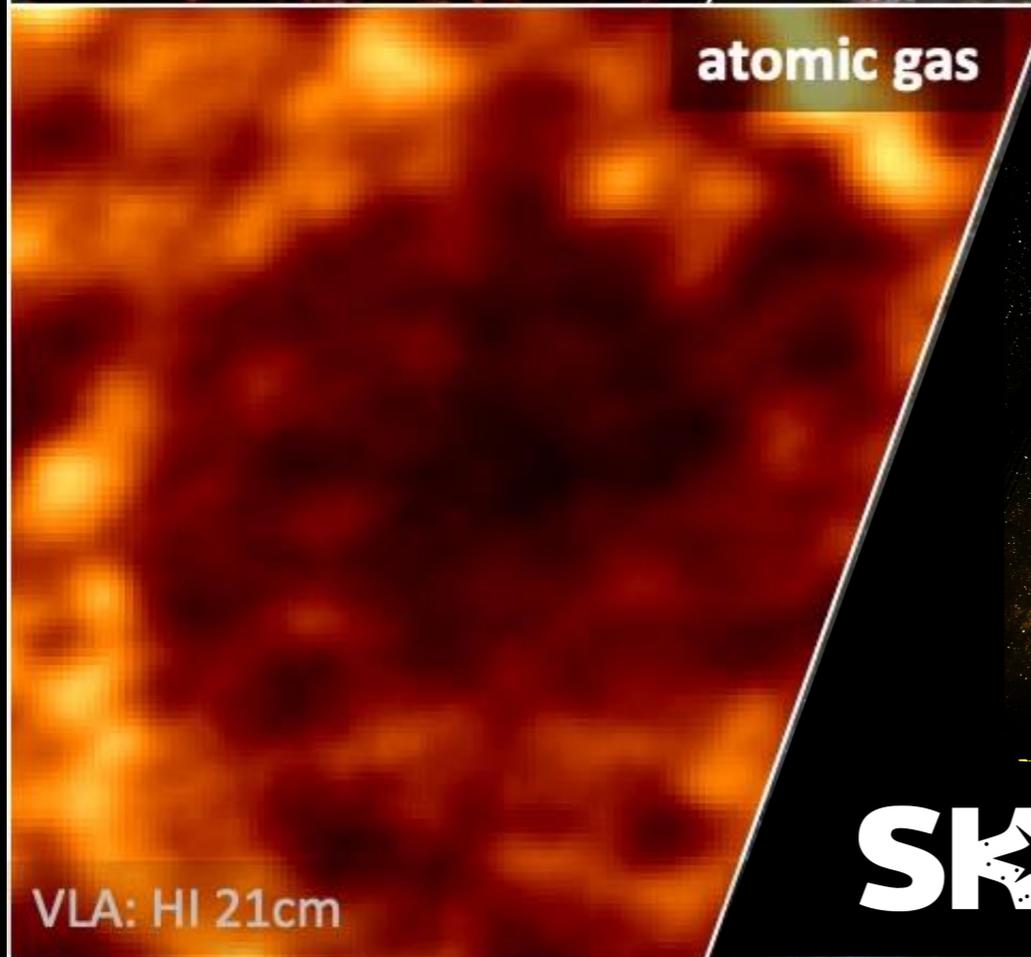
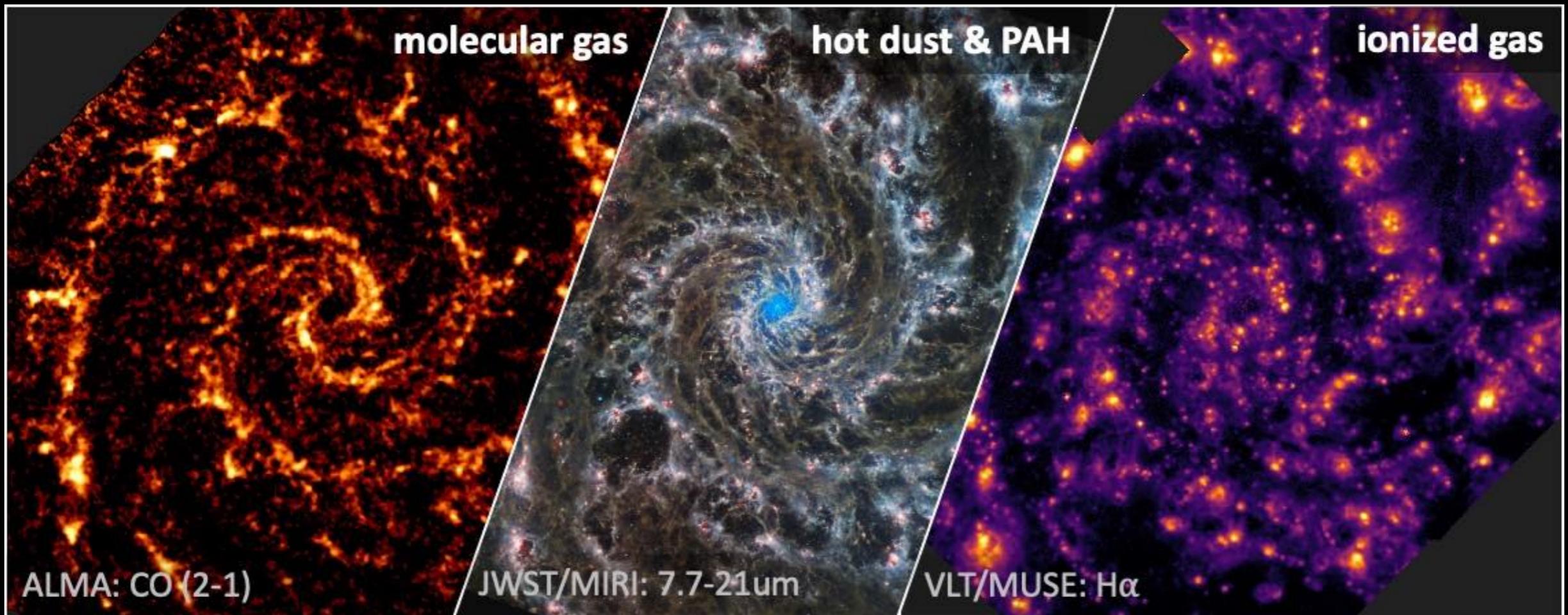


21 cm - GALFA, Arecibo. credit Joshua Peek

PHANGS : NGC 628



PHANGS : NGC 628



Le milieu diffus à 1 arc-seconde

HI (WNM-CNM)

H+ (WIM)

H₂ (OH)

Champ magnétique

Rayons cosmiques

Supernovae

Dynamique; turbulence, chocs



Utilisation de SKA

Le temps d'observation n'est pas encore attribué

- Les Science Working Groups de SKA ne sont pas des Key Programs
- Il y aura du temps ouvert (3 cycles complets avant les KP) et 30-50% du temps pendant les KP (appel en 2030, observations en 2033)
- Le temps d'observation sera accordé par un TAC indépendant des Science Working Group. Ce sera un appel ouvert à tous.
- Chapitre du SKA Science Book (automne 2025) : ce sont des espaces de réflexions sur l'utilisation future de SKA.
- Sources d'information pour connaître les possibilités de SKA pour tous les domaines de l'astrophysique et de la cosmologie
 - Advancing Astrophysics with the SKA (2014)
 - Le livre blanc français de SKA : Acero+(2017)

La suite pour l'AS SKA-LOFAR

- Contribuer à **maximiser l'exploitation scientifique des programmes d'observation actuels** avec les précurseurs
- Aider à la **participation française aux programmes d'observation SKA.**
 - Amplifier les liens avec les non radio-astronomes
 - Première science en 2026-2027
 - Un grand champ d'exploration s'ouvre pour 50 ans
- **Agir pour** construire une radio-astronomie internationale **eco-responsable** (observation + calcul)
- **Participer à la construction du Fr-SRC**
 - Faire passer les pipelines actuels (données précurseurs) à l'échelle du HPC
 - Le Fr-SRC est une grande opportunité pour la communauté AA en générale
 - Intégrer la modélisation, les simulations numériques et les observations synthétiques

Vers le Centre de données SKA français

- Le Fr-SRC se construit en collaboration avec diverses structures liées au calcul, en particulier ECLAT, NumPEX et le NenuFAR-DC
- ECLAT (P.I. Damien Gratadour) : permet entre autre le développement de DDFacet (Cyril Tasse) sur d'autres données
- Financement NumPEX (2025-2029 - évaluation ANR en cours) pour 2 ingénieurs à temps plein sur 4 ans pour développer des éléments du SRC-Fr basé sur des projets actuels, en coordination avec les ingénieurs de NumPEX
 - EoR avec LOFAR & NenuFAR : Florent Mertens (LUX)
 - Surveys LOFAR et NenuFAR : Juline Girard (LUX) et Cyril Tasse (LIRA)
 - Magellanic Clouds avec ASKAP : Antoine Marchal (LPENS)
 - Pulsar Timing Array : Antoine Petiteau (AIM)
 - coordination : Marc-Antoine Miville-Deschênes (LPENS)
 - Test de calcul et stockage distribués sur des cas réel avec des données de radio-astronomie semblables à ce qui sera traité avec SKA.

c.f. présentation de Baptise Cecconi demain matin

Conférence SKA, juin 2025, Allemagne

~500 participants, dont 27 français



Conférence SKA, juin 2025, Allemagne

~500 participants, dont 27 français

