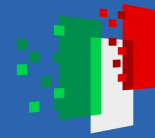




Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



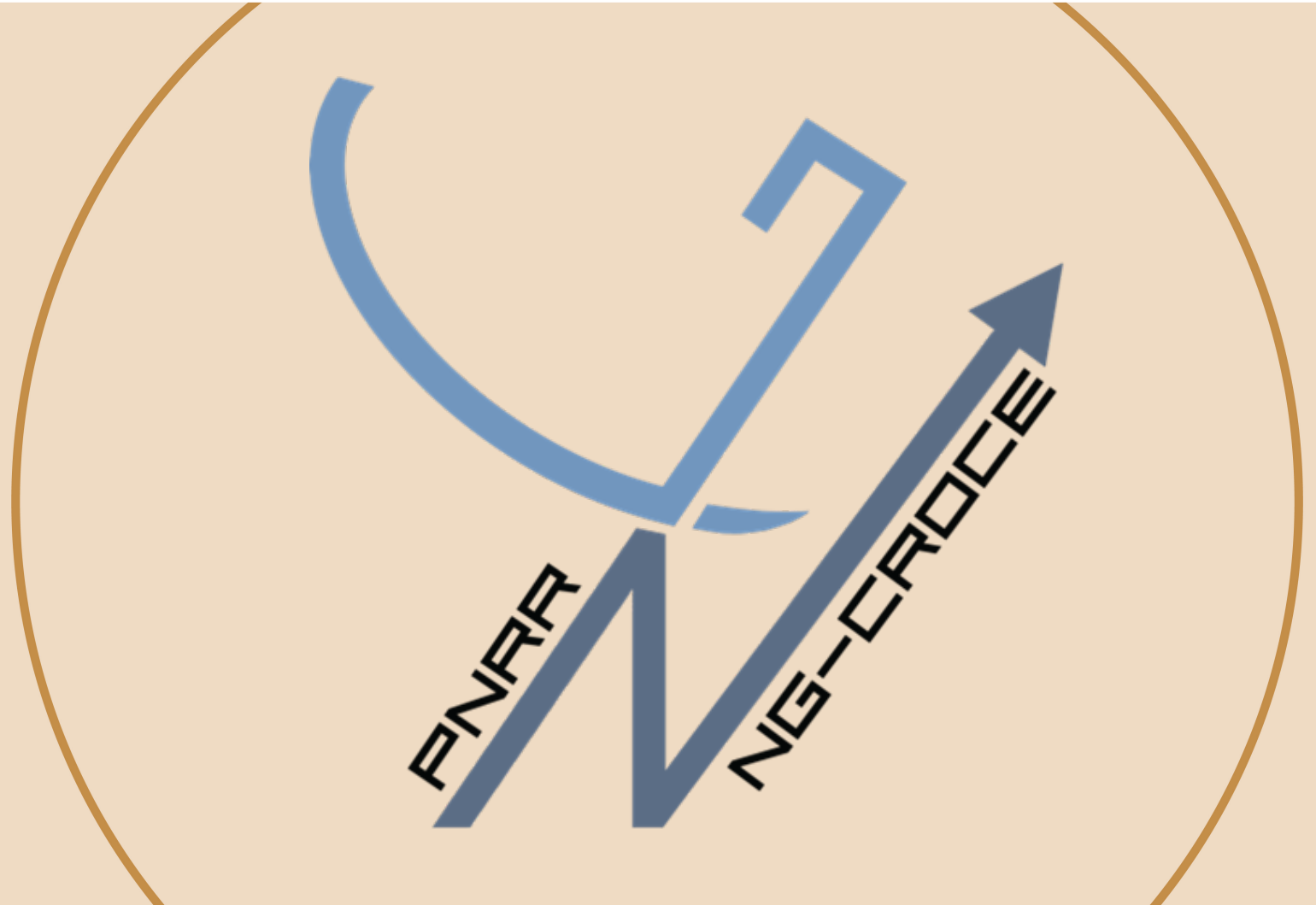
INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

CHORD status update and synergies with the Northern Cross

Final Meeting

Martedì 30 Giugno – Giovedì 02 Luglio

OAC - Osservatorio Astrofisico di Arcetri

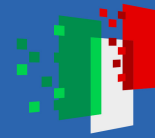




Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

The Canadian Hydrogen Observatory and Radio transient Detector

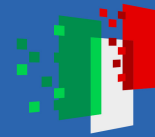




Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

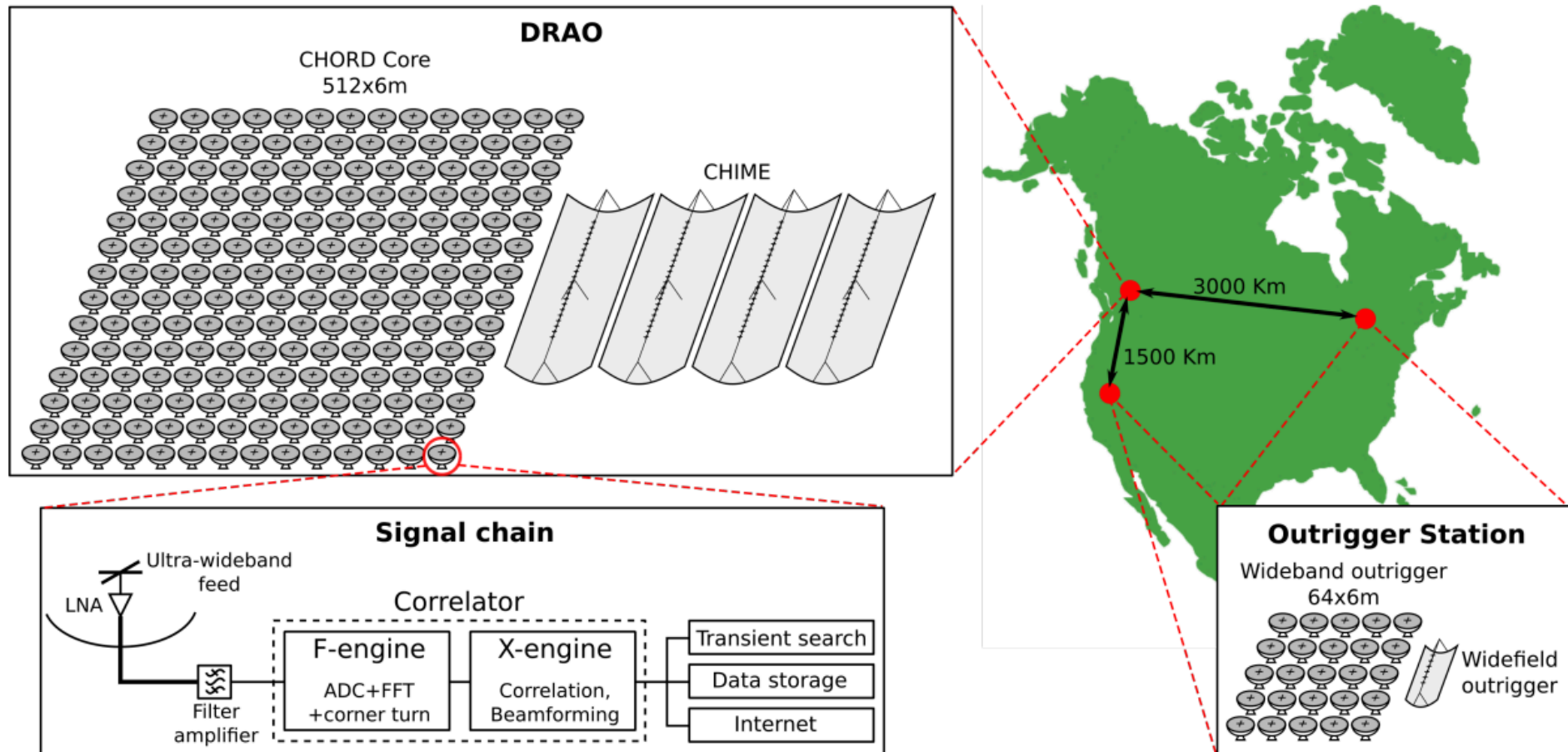


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

The CHORD telescope(s)

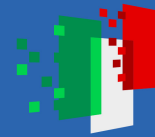




Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

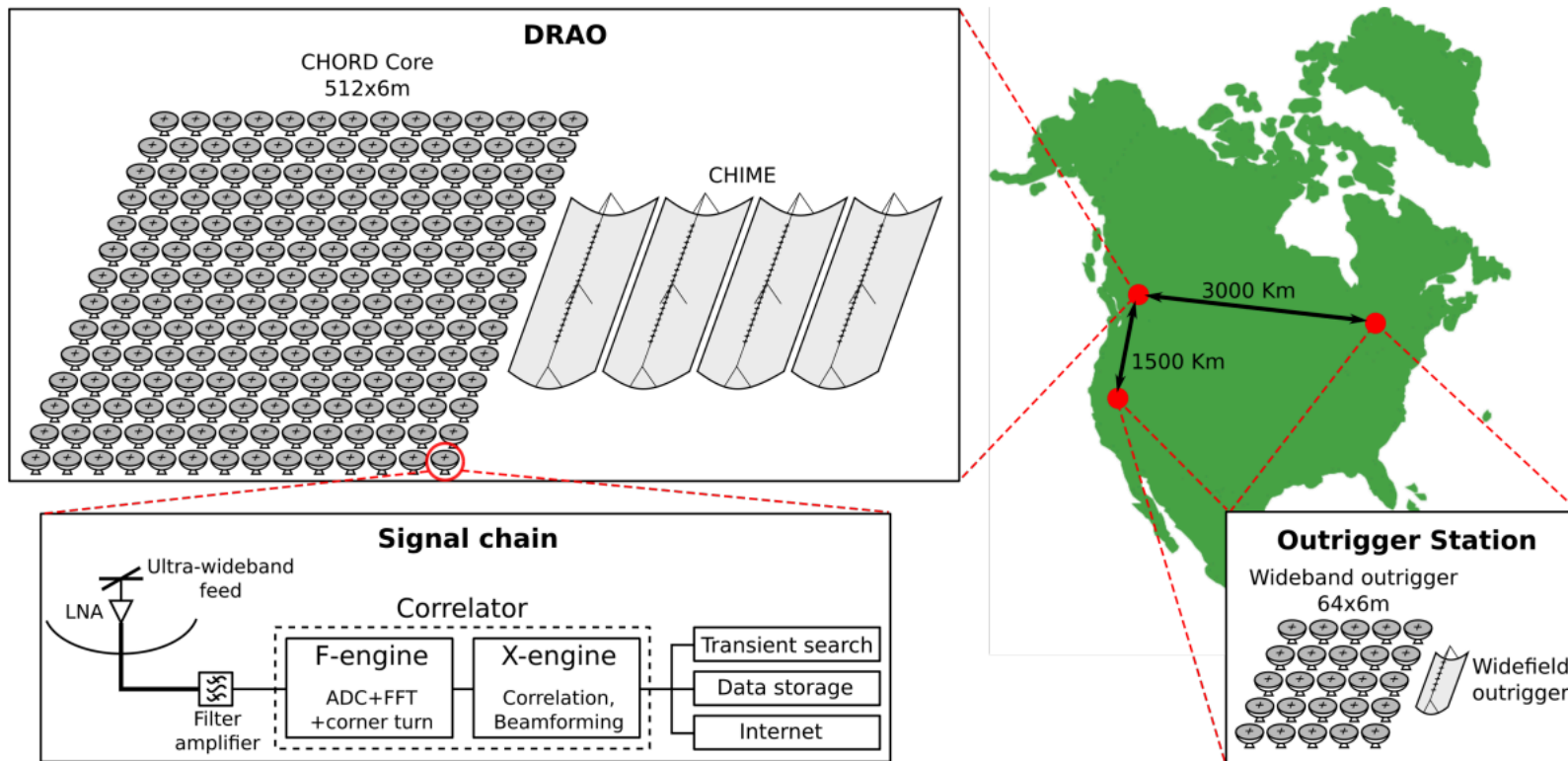


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA

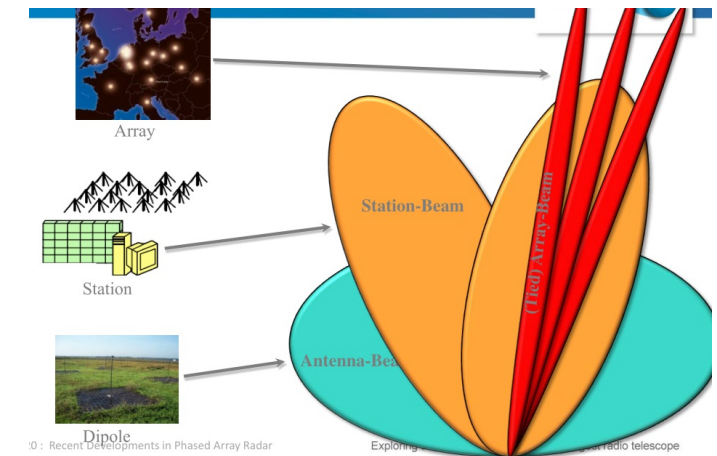


INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

The importance of interferometry



Vanderlinde et al. 2020, CASCA



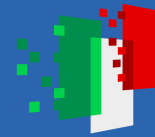
Credits: Bij de Vaate



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

Instrument Overview

N_{dish}	512	
Area	14,500 m ²	
T_{sys}	30 K + T _{sky} (ν)	
Aperture Efficiency	50%	
SEFD	12 Jy + SEFD _{sky} (ν)	
Transient Localization	< 50 milli-arcsec	
Bandpass	300 MHz	1500 MHz
PSF	17 arcmin	3.5 arcmin
Field of View	12 deg	2.5 deg



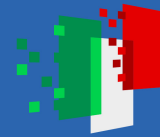
Photo by Brian Hoff



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

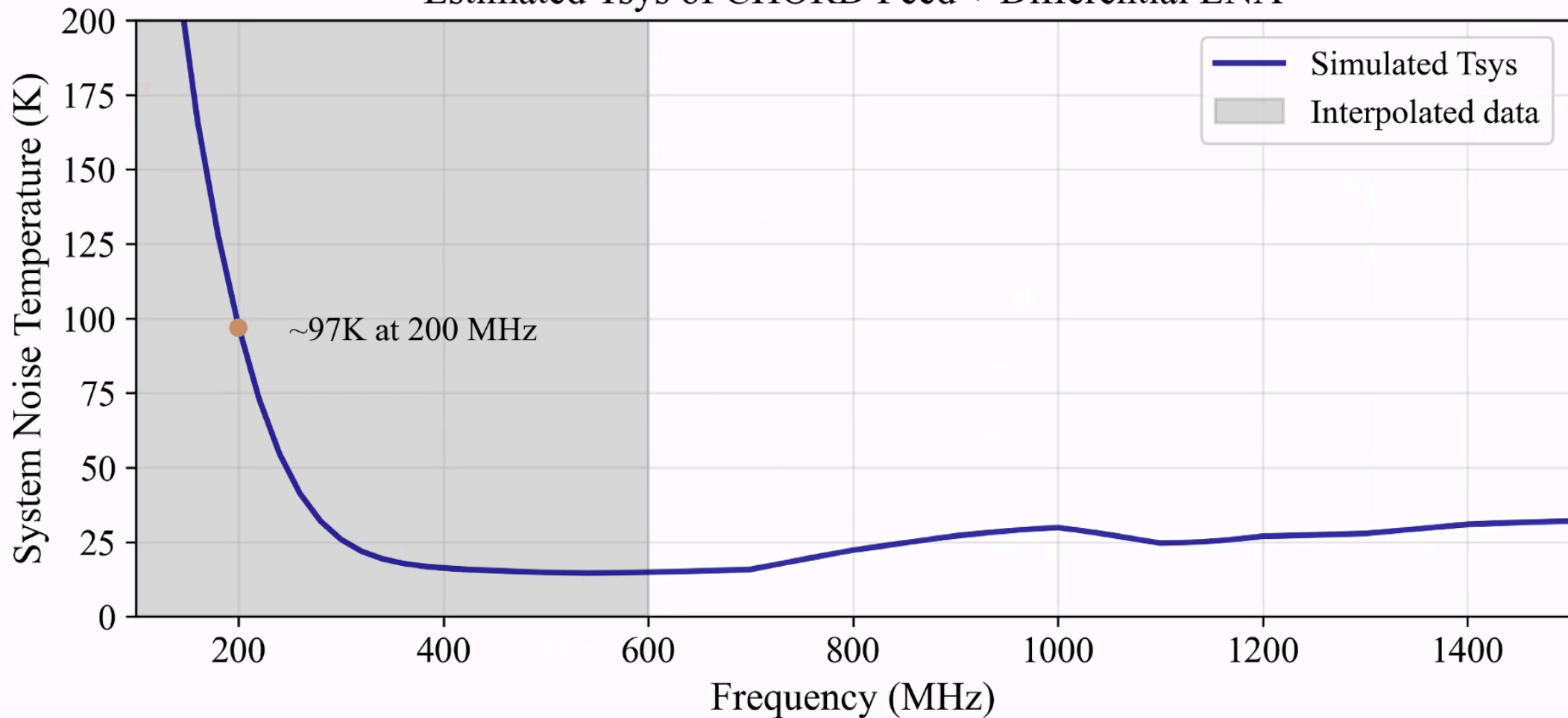


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

Estimated Tsys of CHORD Feed + Differential LNA

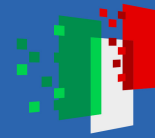




Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

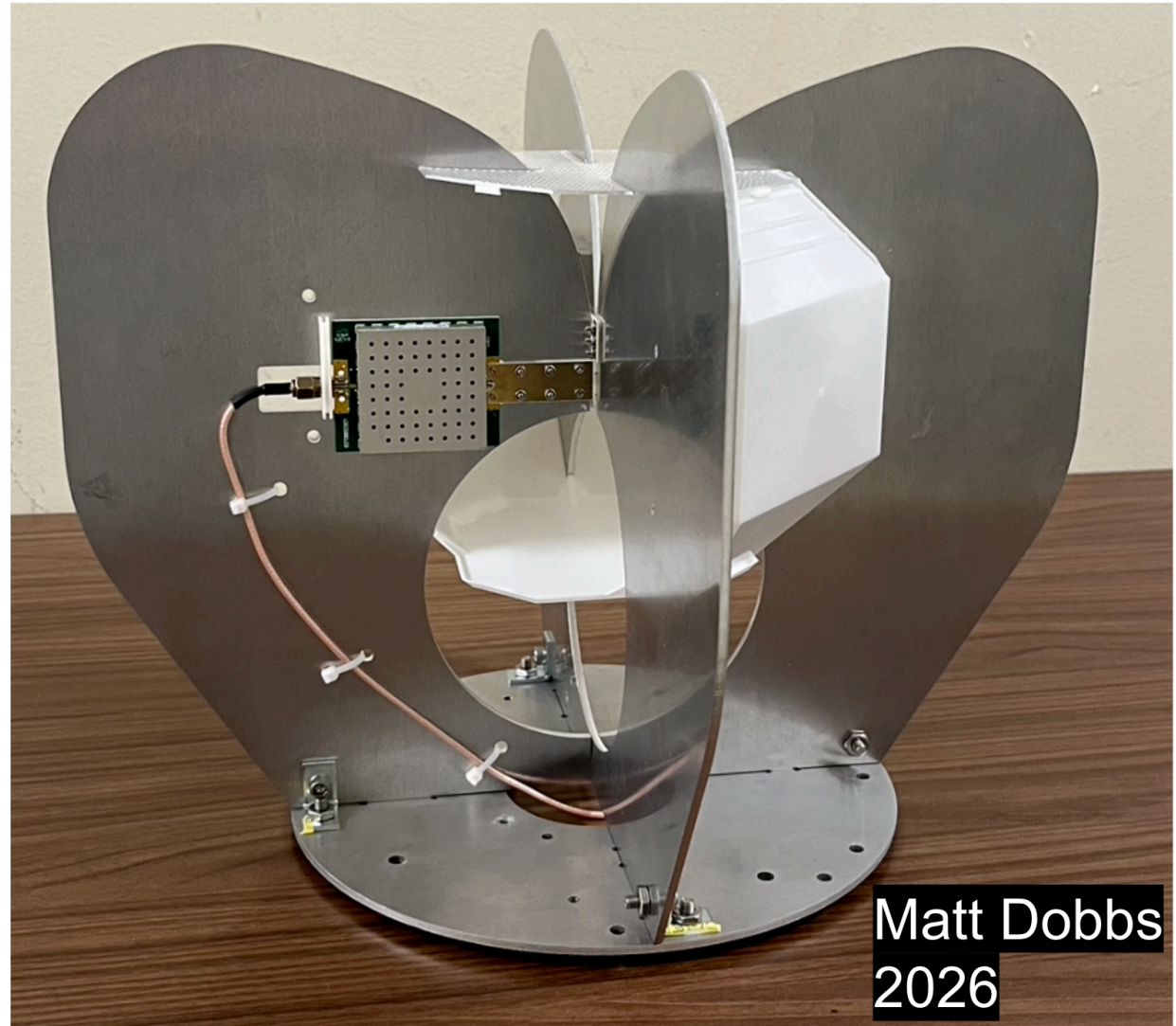
Ultra-wideband feeds

Dual-polarization

MacKay et al. 2023 (UofT)

Aperture efficiency 45-55%

Sidelobes below 20 dB down



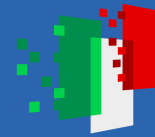
Matt Dobbs
2026



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

Observing Strategy

Drift scan

Azimuthal pointing: fixed to local meridian

Elevation pointing: manually adjusted
between Dec = 20° – 80°

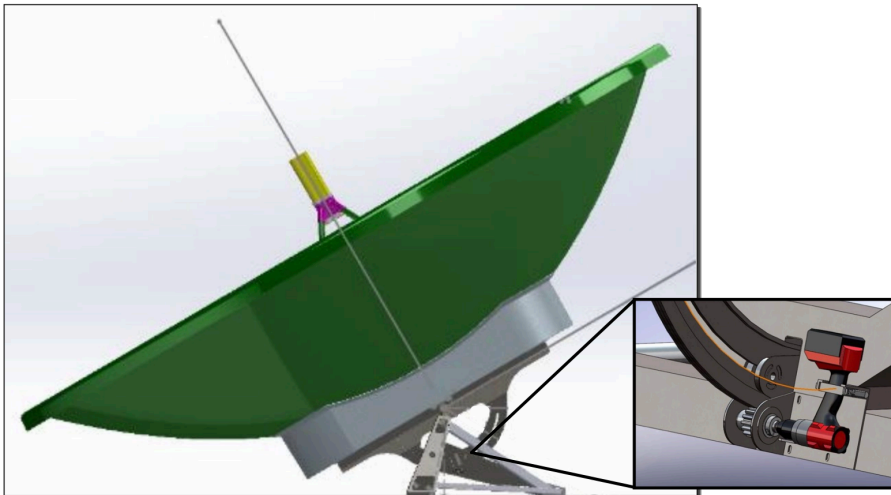
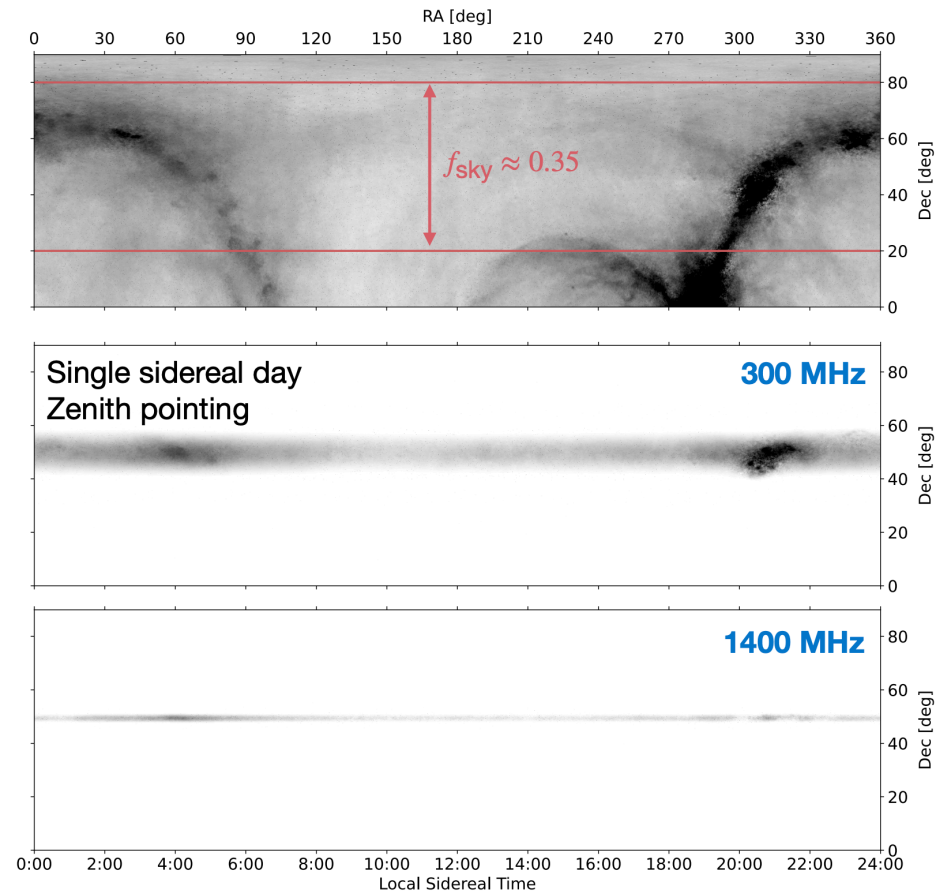


Image by Mohammad Islam (DRAO)

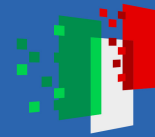




Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



The CHORD telescope

Dishes 512 x 6-m

SEFD ~ 10 Jy

Band 300 - 1500 MHz

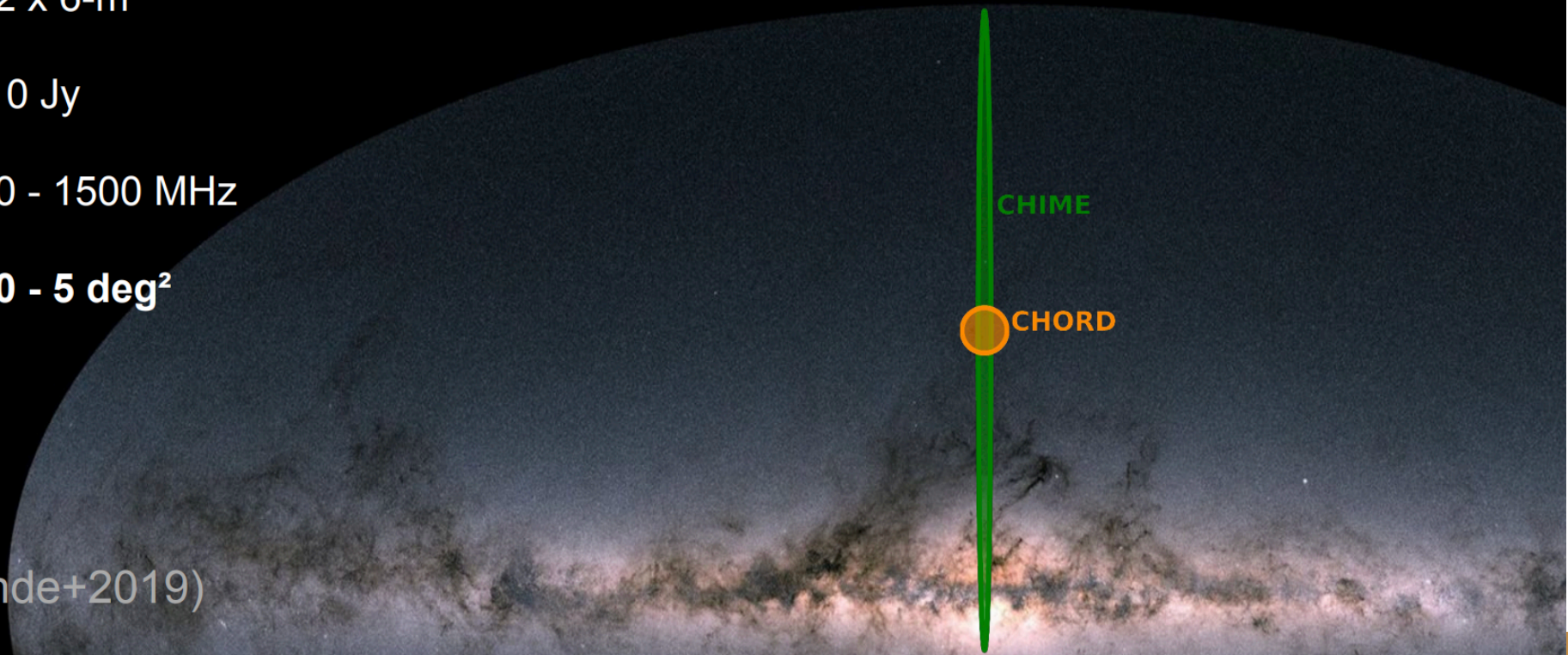
FoV 130 - 5 deg²

@ 600 MHz

CHIME

CHORD

(Vanderlinde+2019)

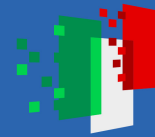




Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

Wider band (x3)

Finer angular resolution (x2)

Increased sensitivity (x4)

x2 larger collecting area

x2 lower system temperature

Simpler instrument response

Deep-dish design to reduce
cross coupling and spill over

More powerful FRB search (x10)

GPU-based algorithm to search
160 Gbps in real-time

Compared to CHIME

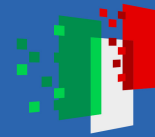




Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

Pathfinder 64 dishes



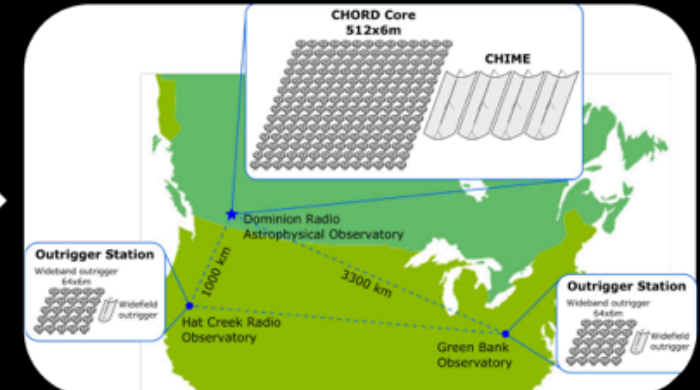
Spring 2026
Early science

Full array 512 dishes



End of 2027
Full sensitivity

Outrigger stations 64 dishes each



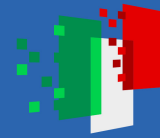
2028?
Transient mas localization



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

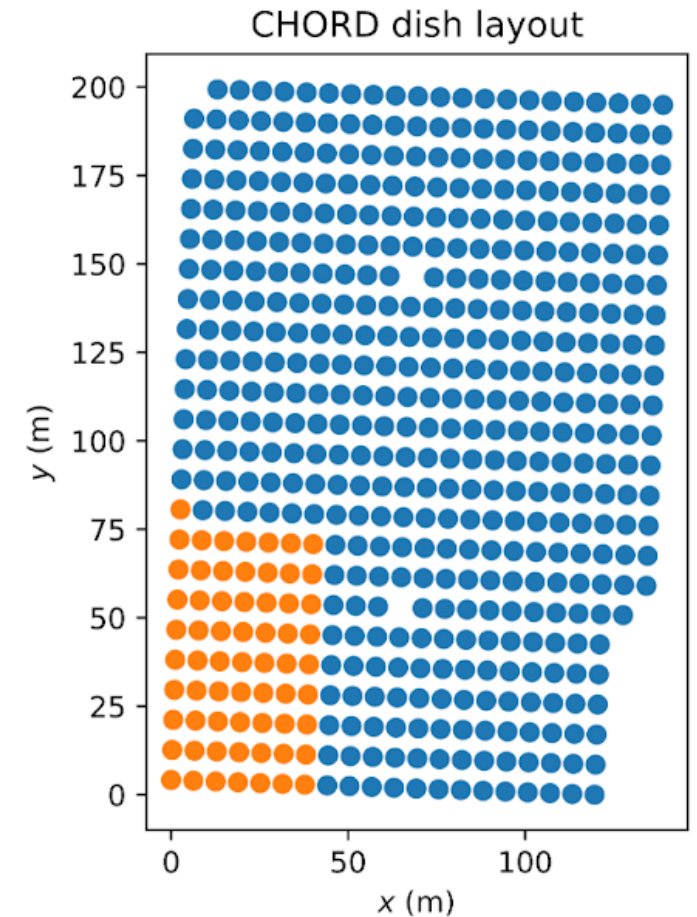


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

Current status

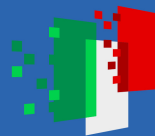




Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA



DRAO

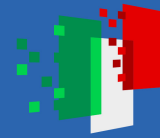
Missione 4 • Istruzione e Ricerca



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA



DRAO

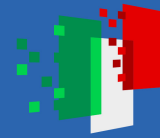
Missione 4 • Istruzione e Ricerca



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

CHORD radomes have doors for
easy access to antenna hardware

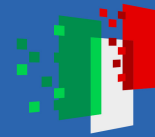




Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

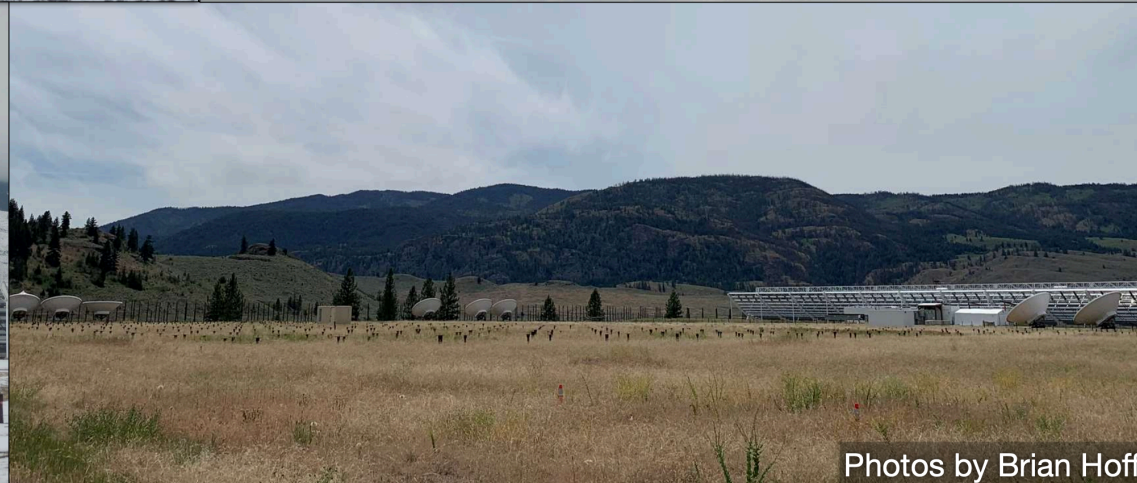


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

Progress on Dish Fabrication



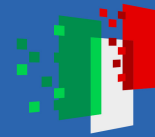
Photos by Brian Hoff



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

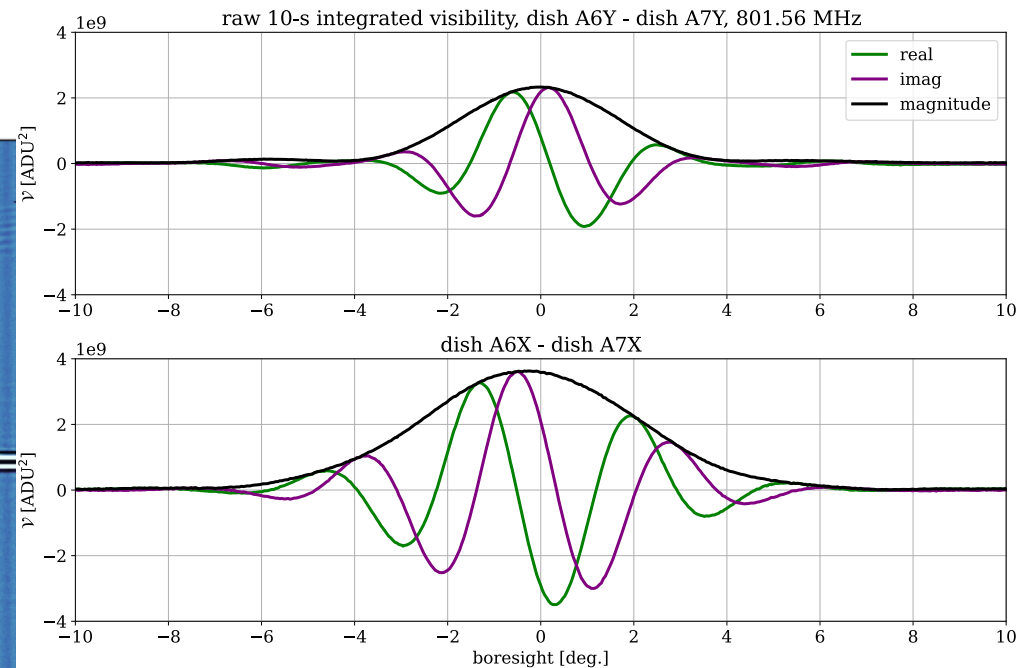
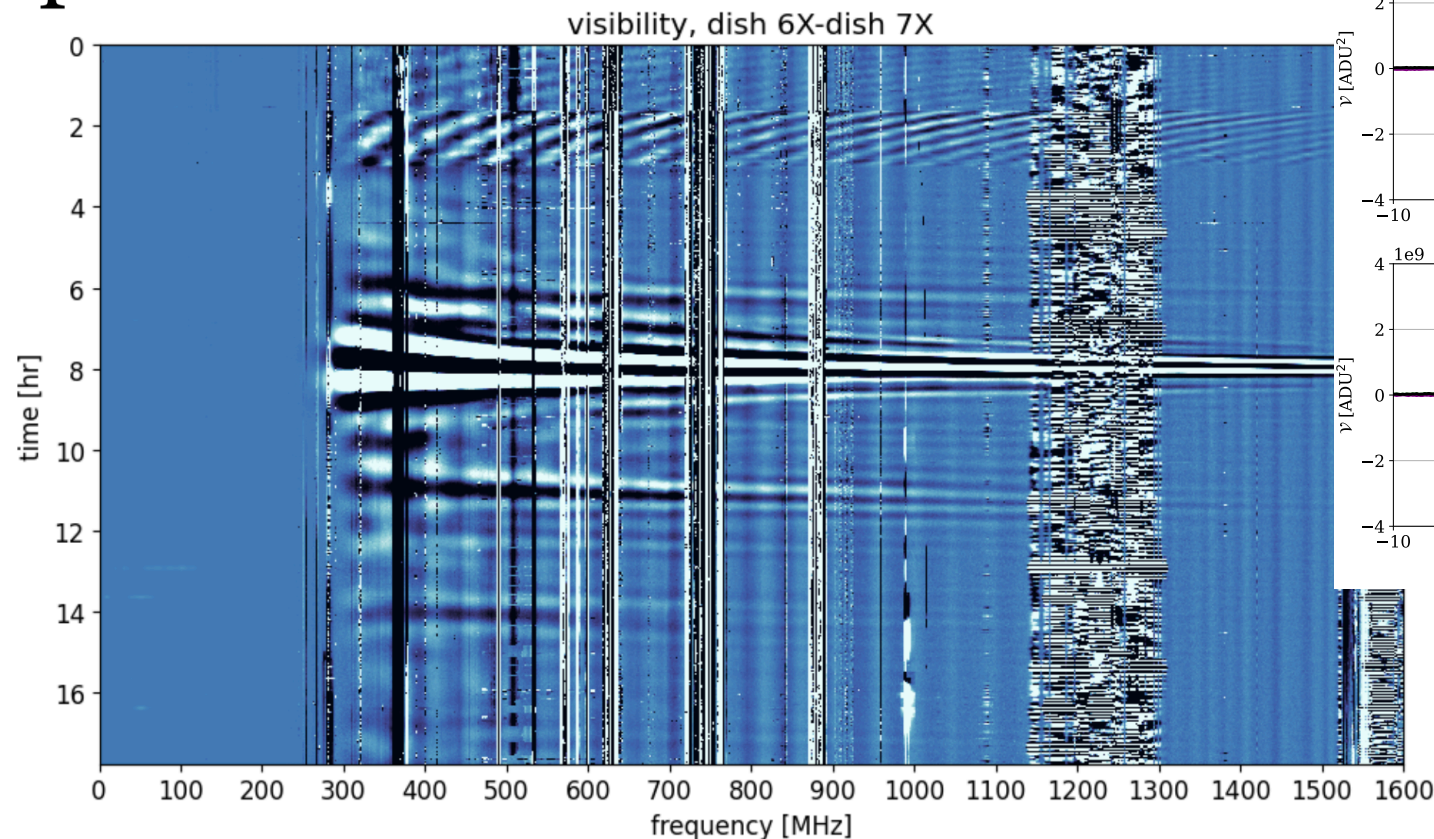


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

CHORD's first interferometric measurement: Cassiopeia A transit



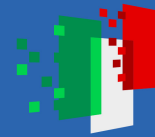
Ian Hendricksen



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

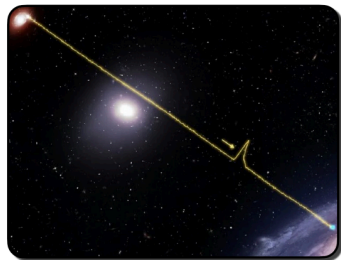


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA

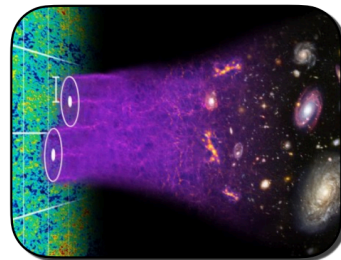


INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

CHORD Science Objectives



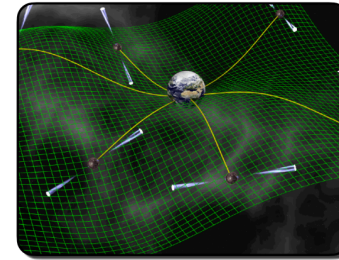
Fast Radio Burst
Search & Localization



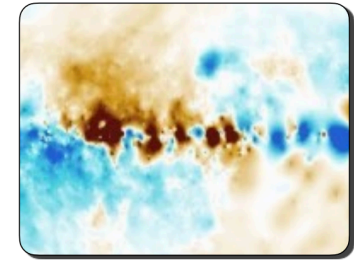
21 cm
Intensity Mapping



21 cm
Galaxy Search



Pulsar Search
& Timing



Galactic & Cosmic
Magnetism

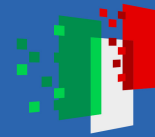
Images by C. Blake and S. Moorfield; Walter et al. 2008; M. Kornmesser; D. Champion; Opperman et al. 2012



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



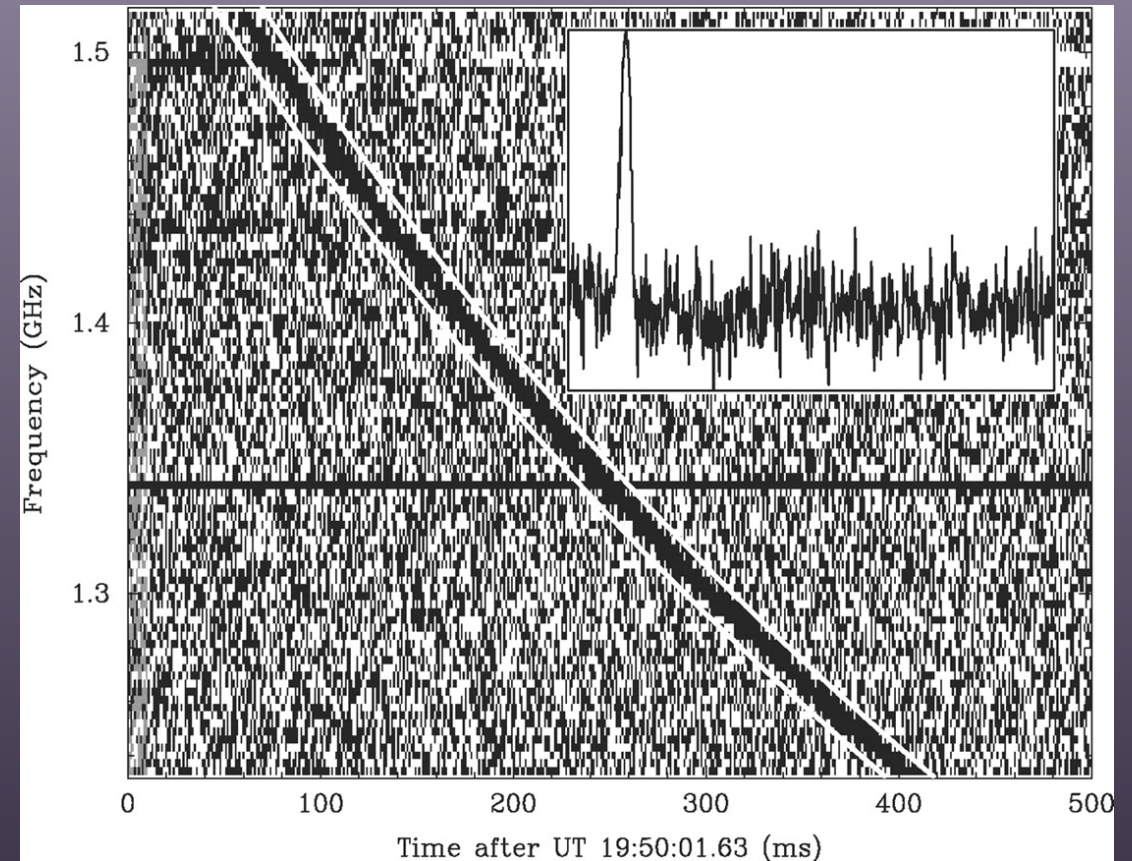
Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



- ▶ **F**ast: millisecond duration transient
- ▶ **R**adio: detected only at radio frequencies
- ▶ **B**urst: Jy-intense flashes



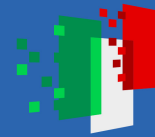
Lorimer et al. 2007



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



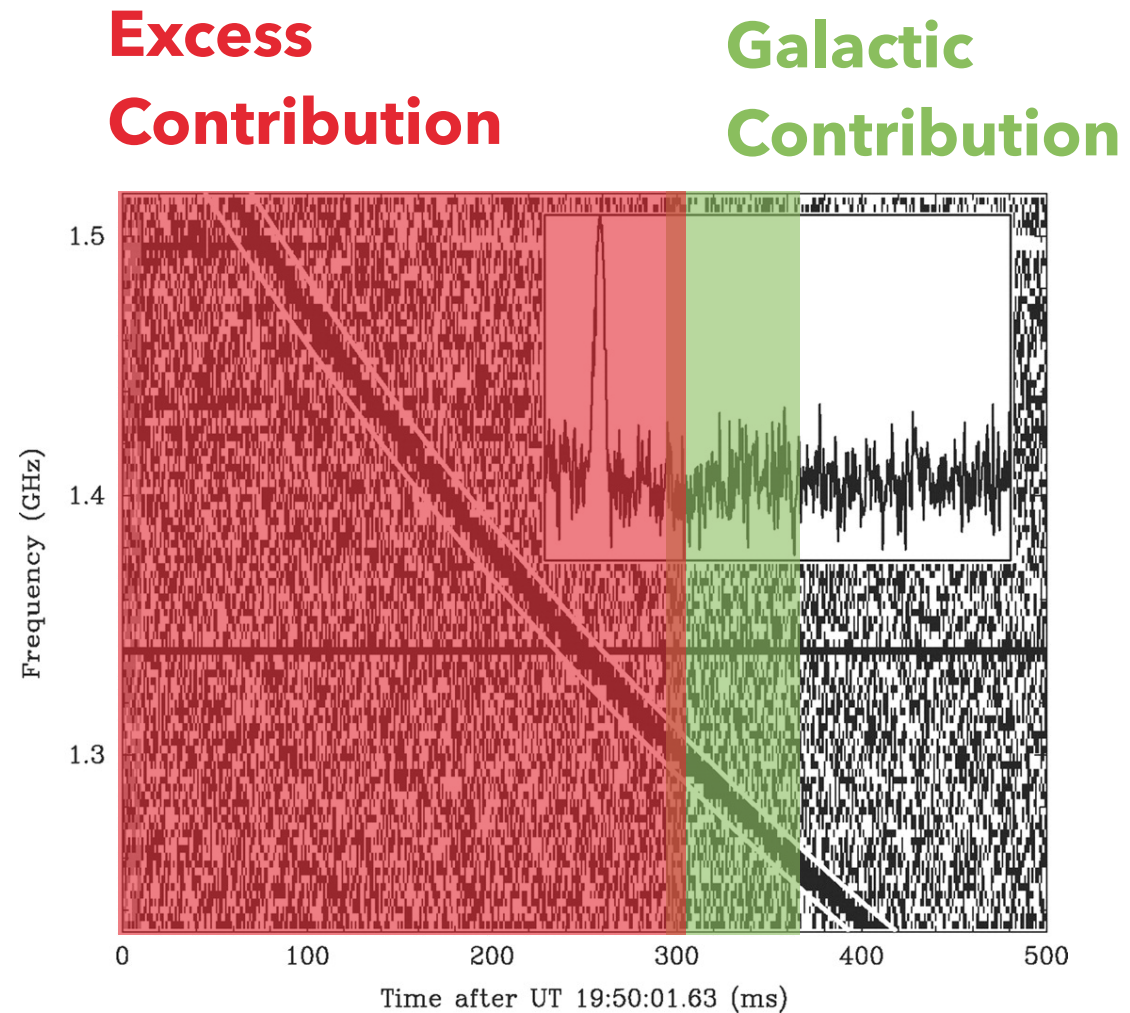
INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

The Lorimer burst

- “Highly dispersed signals”

$$DM = \int_0^d n_e(s) ds$$

Dispersion Measure



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



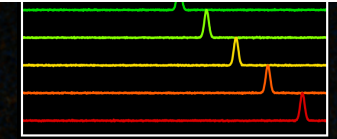
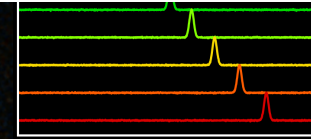
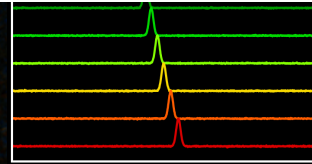
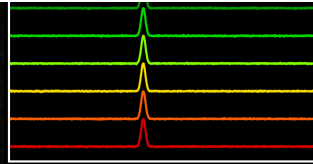
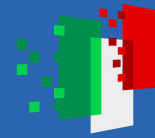
Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA



0

+

$DM_{HG}(z)$

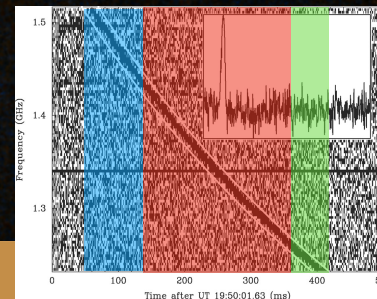
+

$DM_{IGM}(z) + DM_{MW,Halo} + DM_{MW,ISM} = DM$

Host Galaxy

Milky Way

?



MW Halo

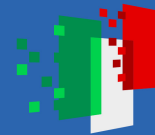




Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



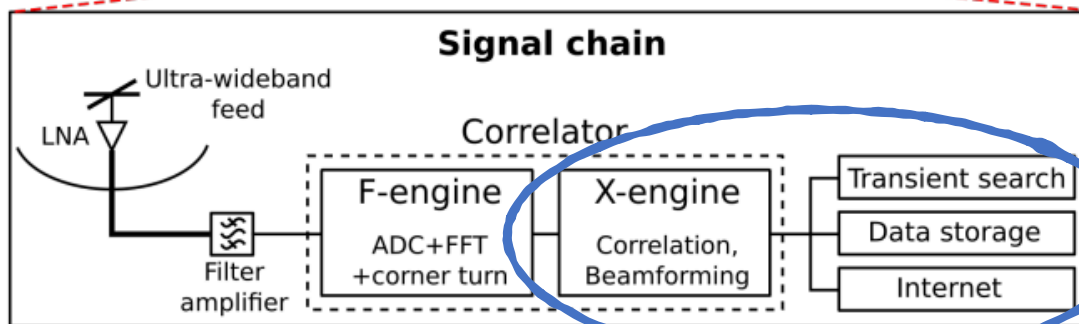
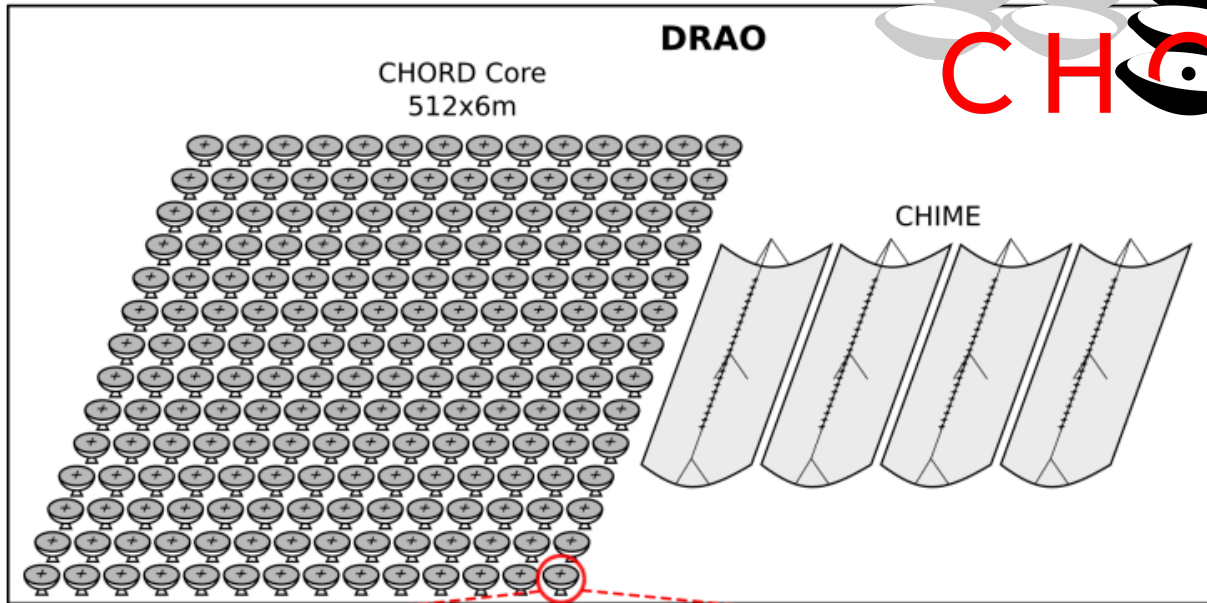
Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

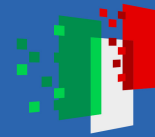


Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca





FRB Search Backend

New GPU-based FRB search algorithm.

Computational cost of search roughly proportional to “data rate”:

$$N_{\text{beam}} \times N_{\text{freq}} / t_{\text{sample}}$$

Expect to process 10 Gbps per GPU.

Comparison of Different FRB Searches				
	N_{beam}	N_{freq}	t_{sample}	Data Rate
CHIME	1000	16,000	1 msec	16 Gbps
CHORD	5000	32,000	1 msec	160 Gbps
SKA-low	500	8000	0.8 msec	5 Gbps
SKA-mid	1500	4000	0.08 msec	75 Gbps

Table by Kendrick Smith

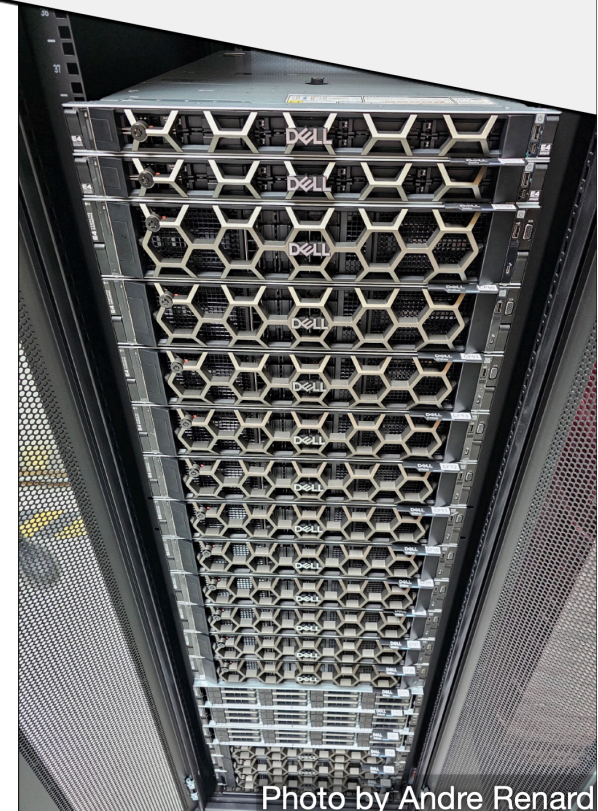
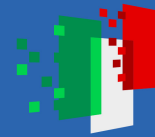


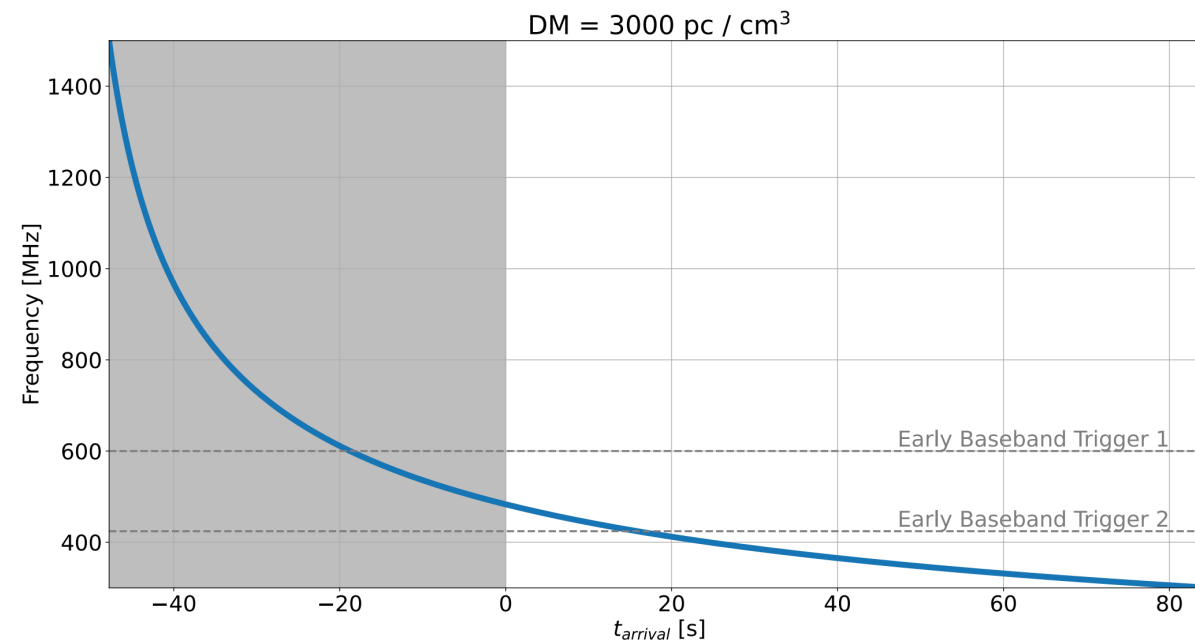
Photo by Andre Renard



Features include:

- 100 sec baseband buffer
 - 85 sec effective length
 - Comfortably fits FRBs with $DM < 2000 \text{ pc / cm}^3$
- Early baseband triggers

FRB Search Backend

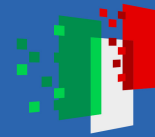




Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA

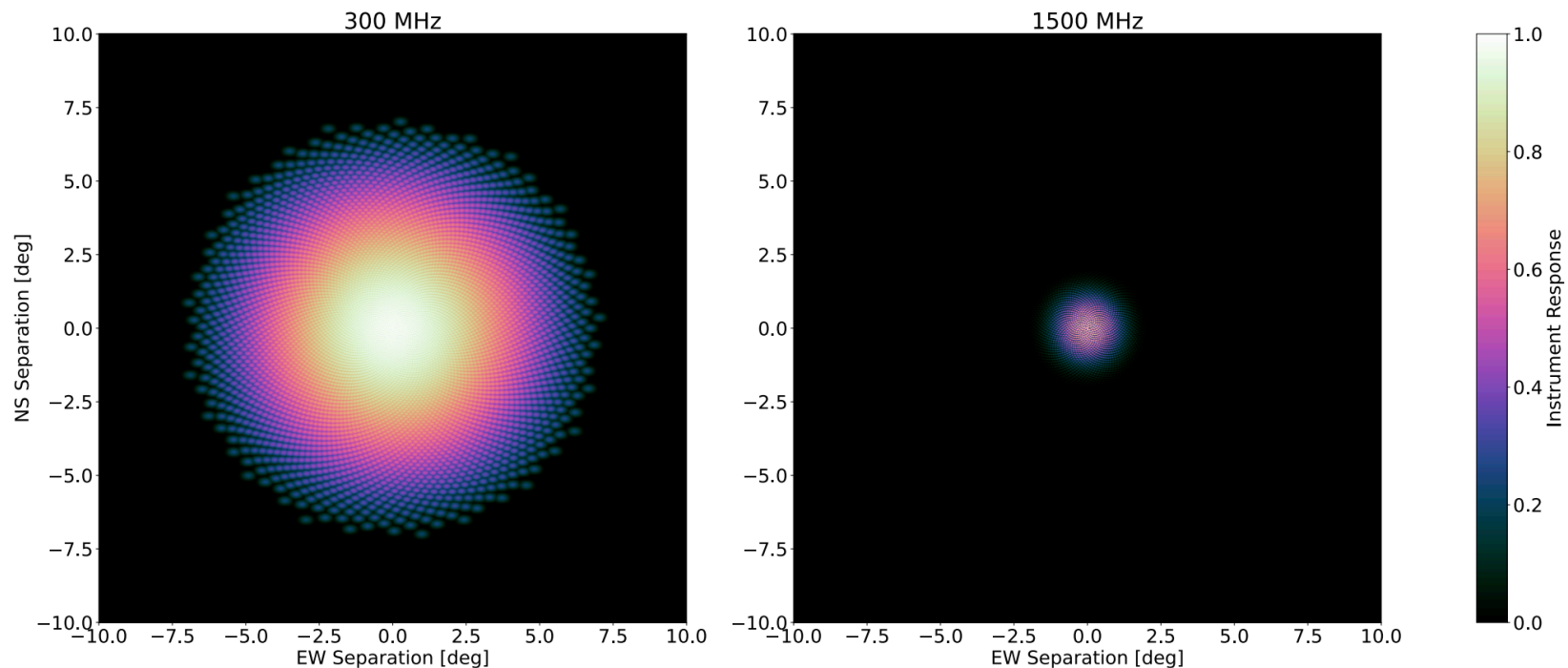


INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

Features include:

- Arbitrary formed beam locations

FRB Search Backend

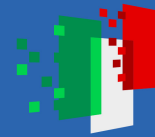




Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA

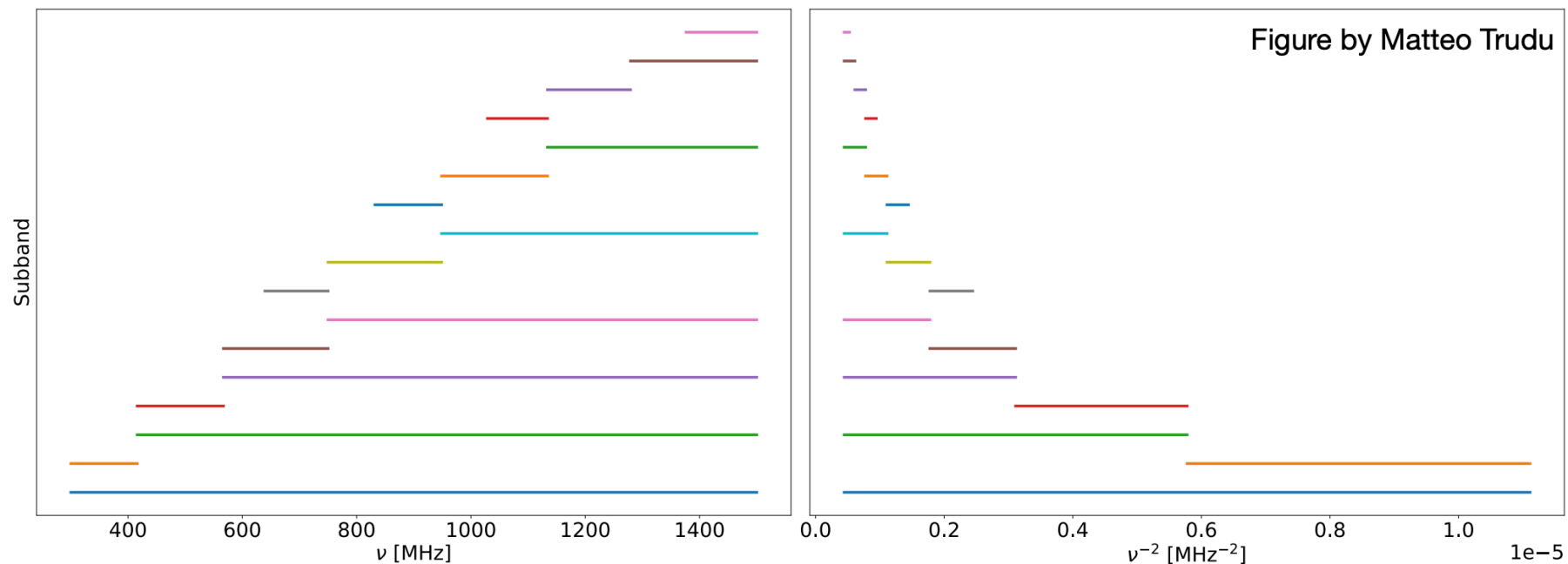


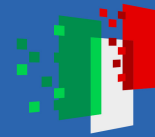
INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

Features include:

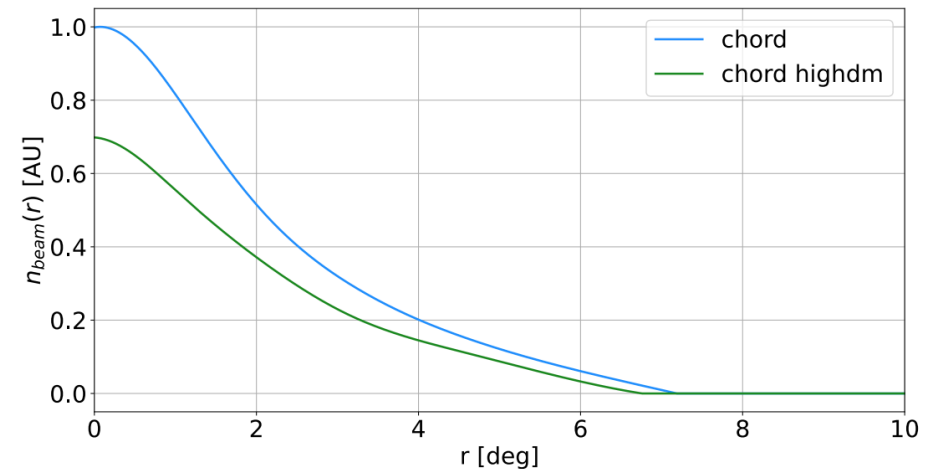
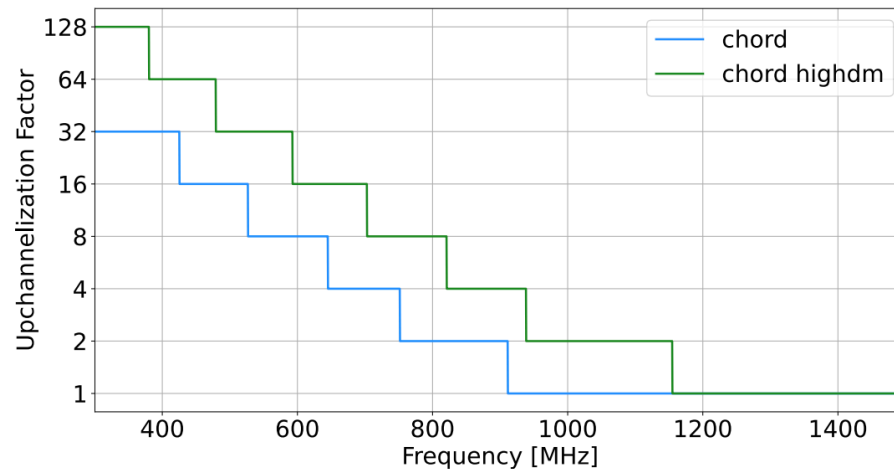
- Multiple sub-band searches

FRB Search Backend





Optimizing CHORD



Find the following parameters optimize the CHORD search:

$$t_{\text{sample}} = 0.9 \text{ msec}, \quad N_{\text{beam}} = 7,000, \quad N_{\nu} = 21,500$$

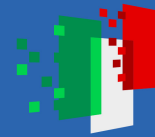
assuming an FRB population as measured by CHIME/FRB Catalog 1.



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

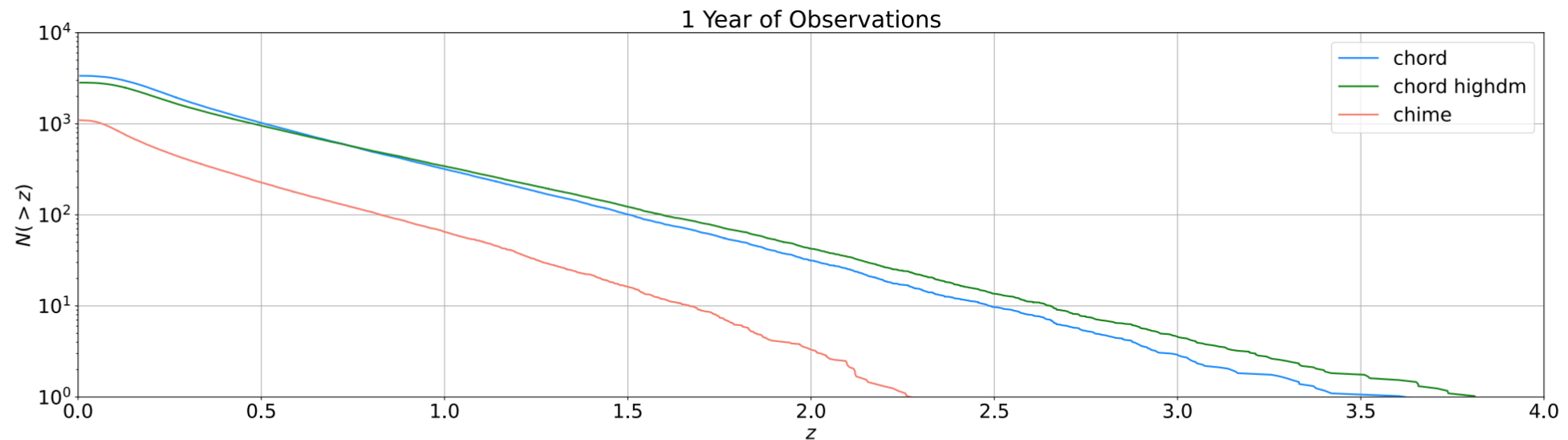


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

Redshift Distribution



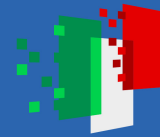
Assuming FRBs trace star formation rate, CHORD will detect FRBs out to redshift 3 to 4.



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



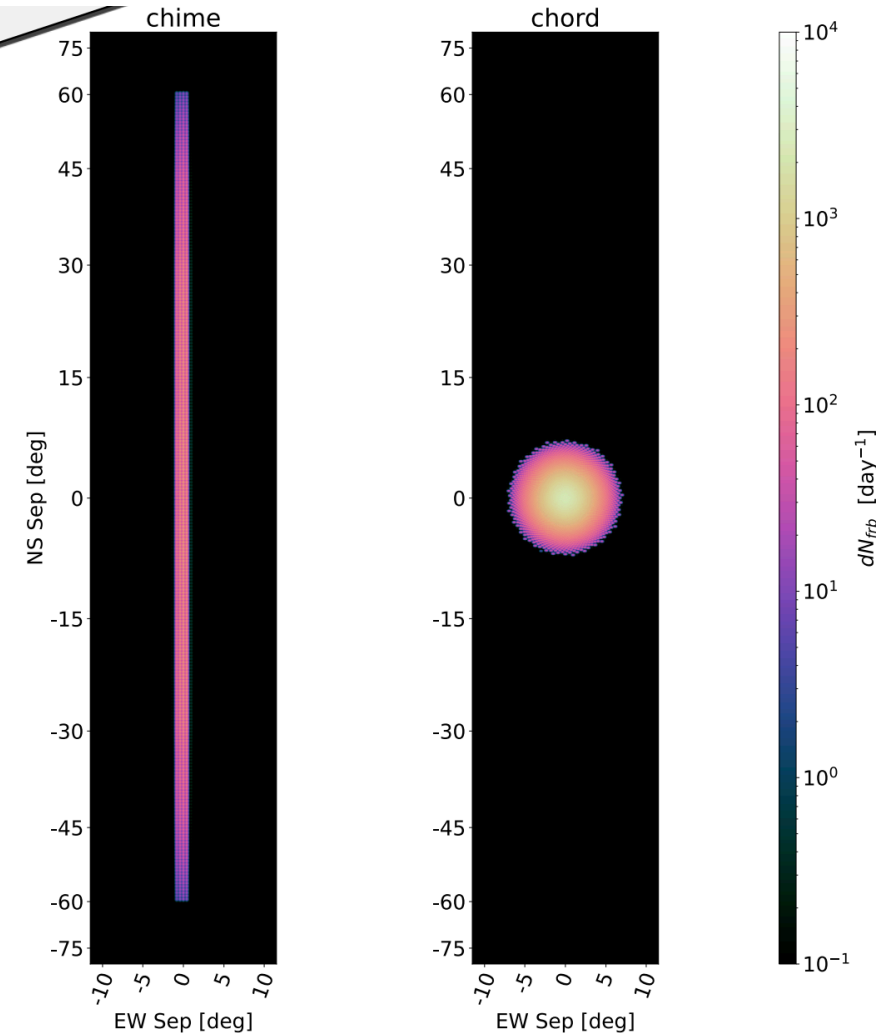
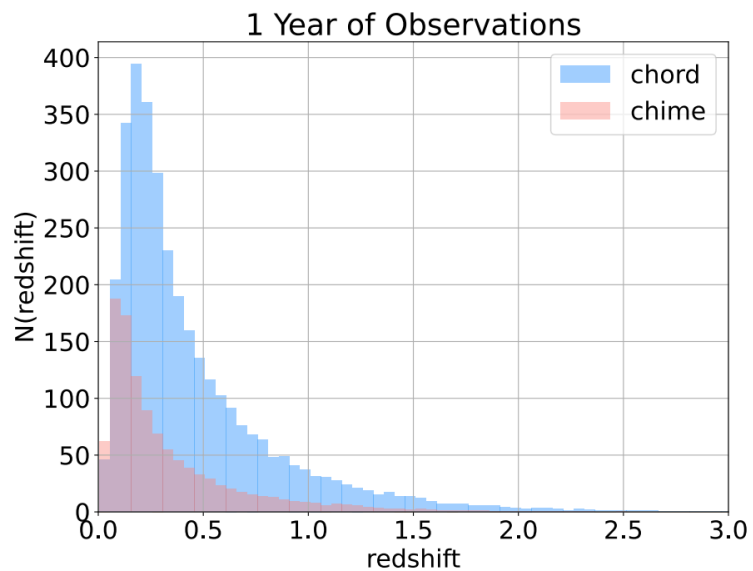
Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

Detection Rate

CHORD is forecasted to
detect **10-20 FRBs per day** with
better than **50 milli-arcsec** localization.

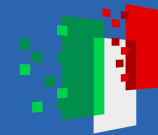




Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

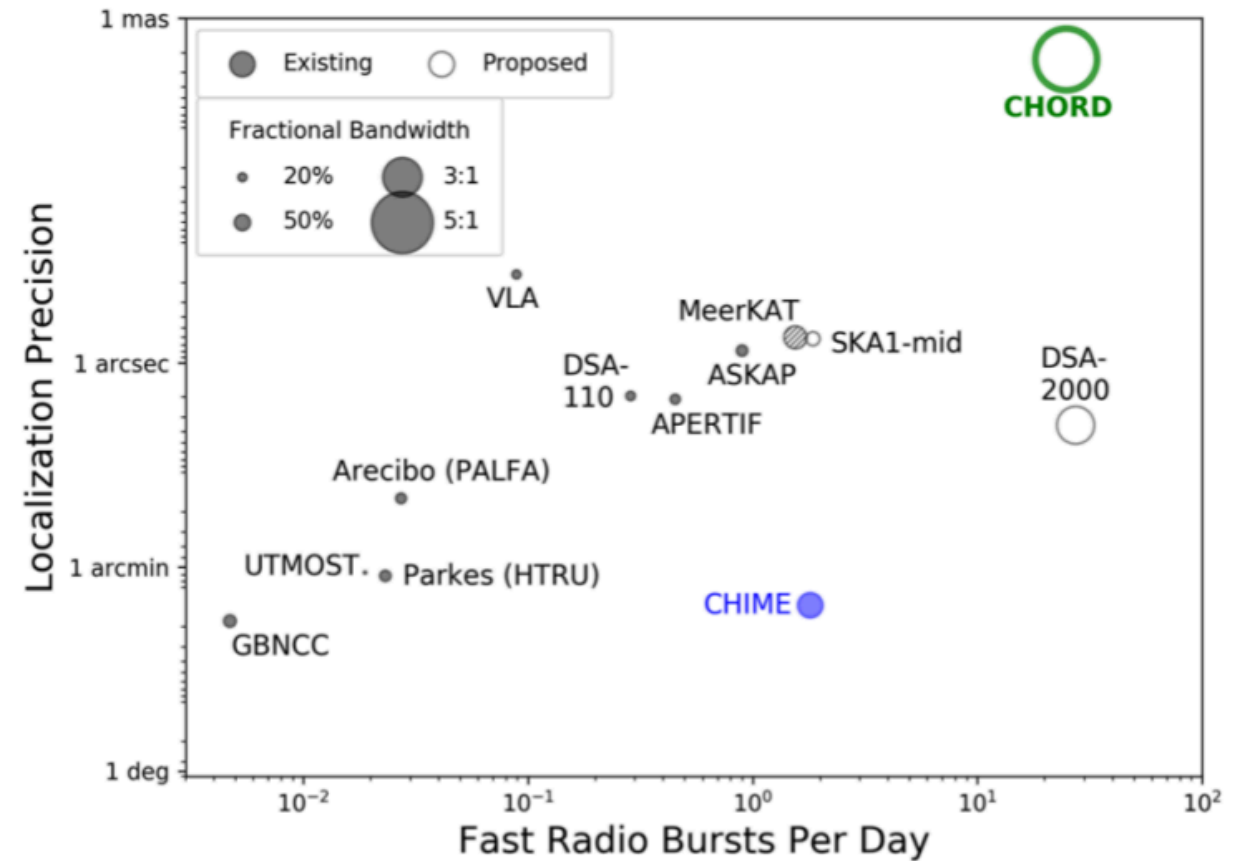


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

Final performances

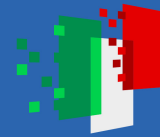




Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

Synergies with the Northern Cross

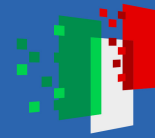




Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



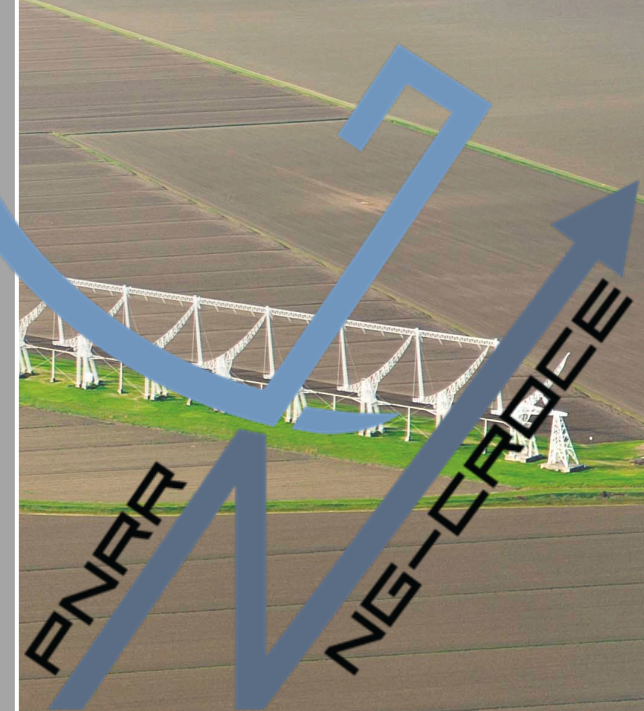
Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

The Next Generation Croce del Nord

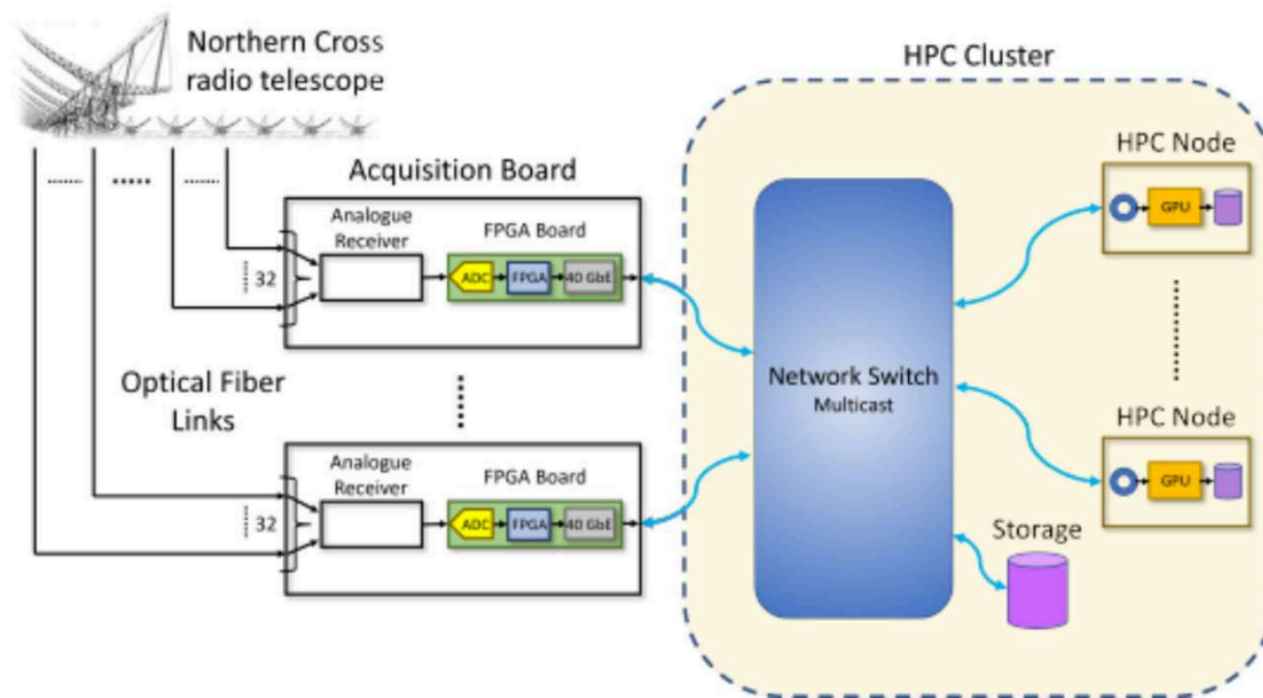
- Refurbishment of the E-W arm
- Multibeam capabilities for the EW and NS arm
- Real-time processing and analysis





New backend system

- 672 analogue inputs (256 NS + 416 EW) are digitized by newly designed FPGA boards;
- (Multi)beam forming and FRB search performed in real time by an 18 HPC node cluster. Each node is equipped with:
 - Dual multi-core CPU;
 - 2 NVIDIA L40S GPUs;
 - 2 TB RAM;
 - 2x SSD;
- A total of 8 PB disk storage is available although no long term raw data archive is planned



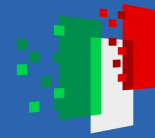
Naldi et al. (2025)



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

The Next Generation Croce del Nord

- Collecting area: $10000 \text{ m}^2 + 20000 \text{ m}^2$
- Detection threshold: 1 Jy ms (10 sigma)
- Field of view: $\sim 3 \text{ deg}$
- N. Beams: ~ 1000
- Spatial resolution: $5'$
- Baseband data

PNRR

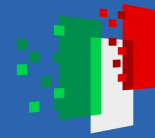
NG-CROCE



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

The Next Generation Croce del Nord

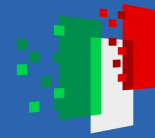
- Follow up of CHORD detections from ~ 0.3 to 1.5 h per source with the NC
- Triggers from dedicated NC campaigns
- Follow up at higher frequencies with the Italian antennae
- MWL follow up



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

The Next Generation Croce del Nord

- Follow up of CHORD detections from ~ 0.3 to 1.5 h per source with the NC
- **Triggers from dedicated NC campaigns**
- Follow up at higher frequencies with the Italian antennae
- MWL follow up



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA

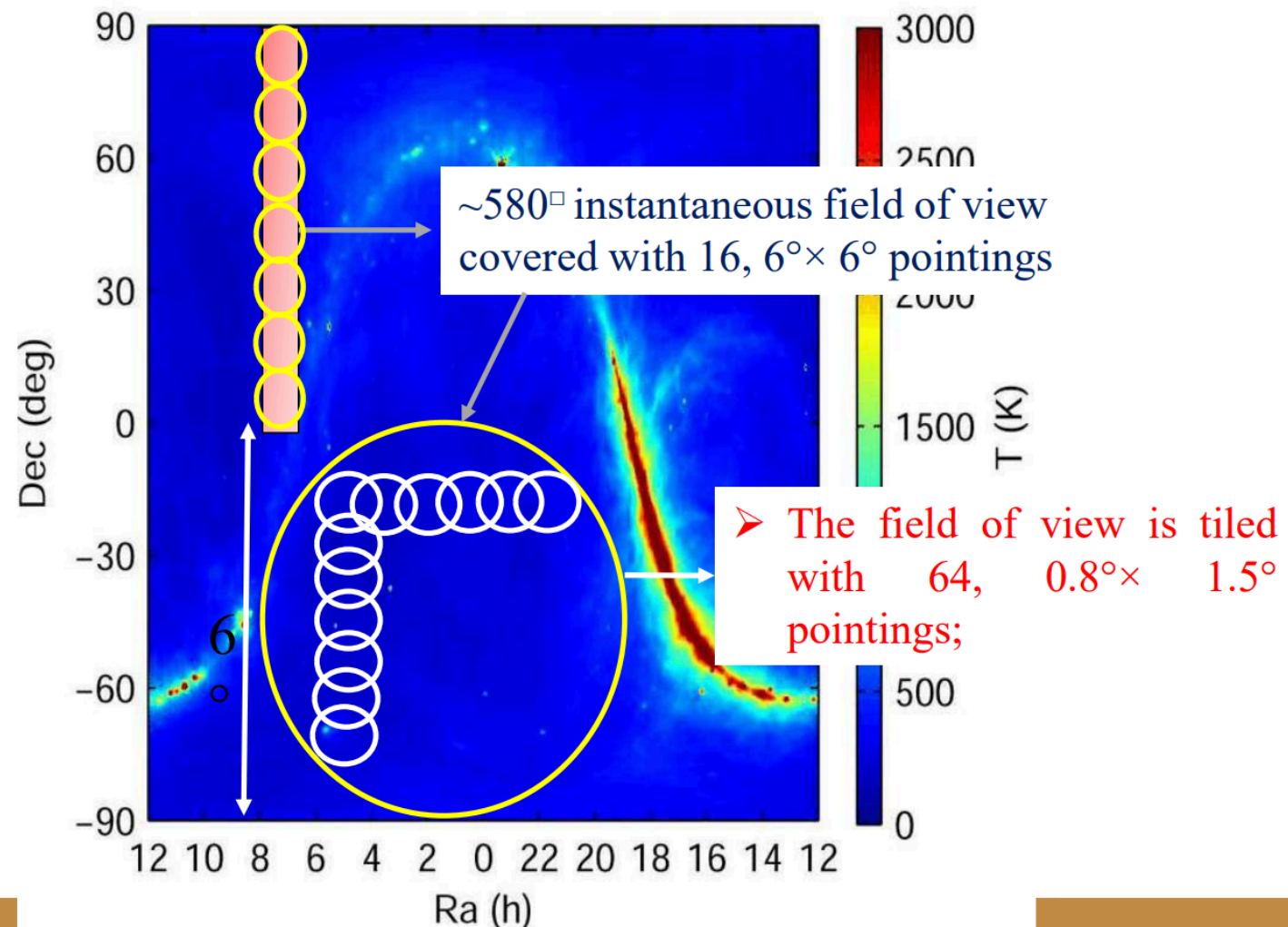


INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

Future observing modes and capabilities

Large area case:

- Beamform 4 cylinders;
- Mechanically shift block of 4-cylinders
- 1σ sensitivity: $\sim 4 \text{ Jy ms}$;
- $160 \mu\text{s}$ time resolution,
- 7.8 kHz frequency resolution;
- ~ 1 burst every two days $> 10 \text{ Jy ms}$
- Limited localization: $\sim \text{arcmin}$ for $\sim 100 \text{ Jy ms}$ bursts





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

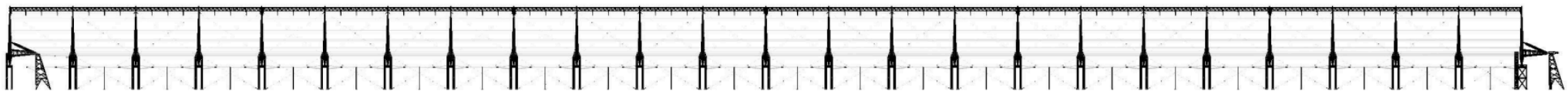
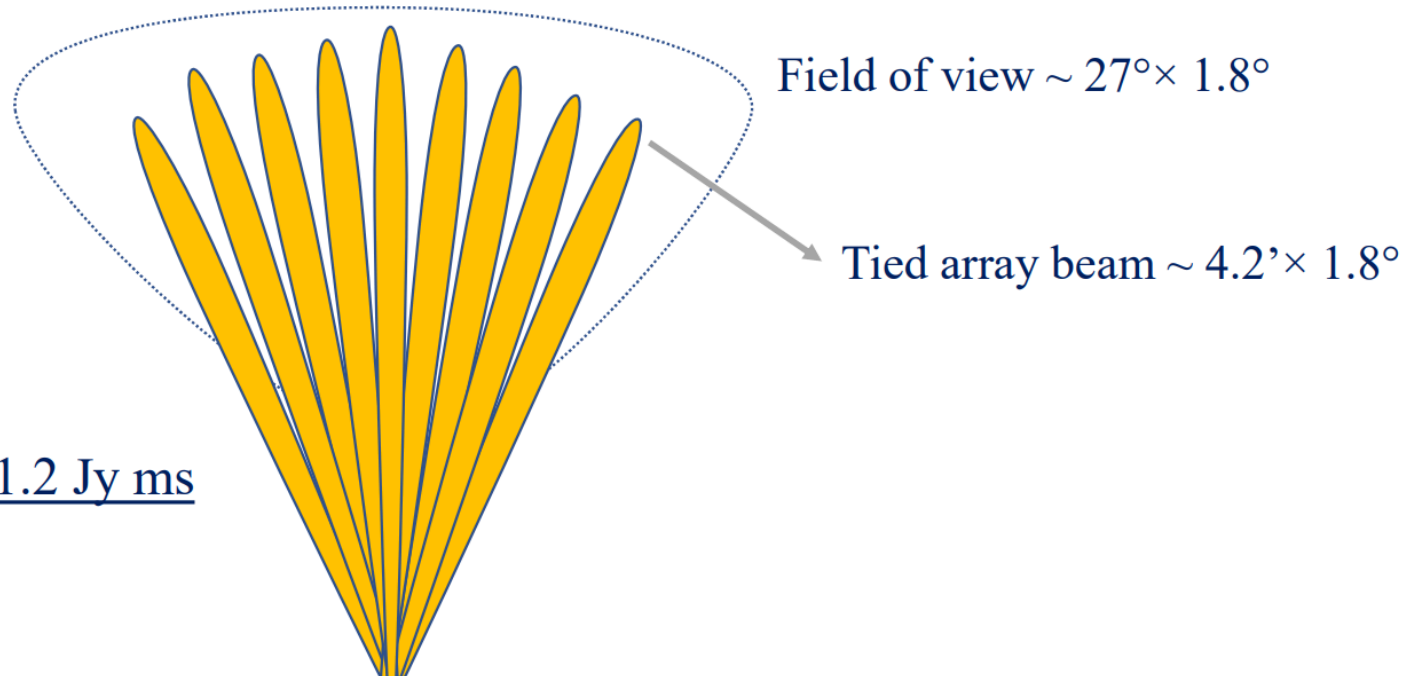
Future observing modes and capabilities: NS + EW

Large area case:

- EW doubles the NS collecting area
- 1σ sensitivity: $\sim 120 \text{ mJy ms}$
- $160 \mu\text{s}$ time resolution,
- 7.8 kHz frequency resolution;

EW $\rightarrow$ ~ 1 burst every three days $> 1.2 \text{ Jy ms}$

NS + EW $\rightarrow$ $\sim 300 \text{ burst yr}^{-1}$

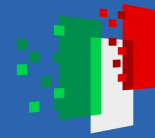




Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

The Next Generation Croce del Nord

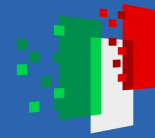
- Follow up of CHORD detections from ~ 0.3 to 1.5 h per source with the NC
- Triggers from dedicated NC campaigns
- **Follow up at higher frequencies with the Italian antennae**
- MWL follow up



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

The Next Generation Croce del Nord

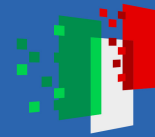
- Follow up of CHORD detections from ~ 0.3 to 1.5 h per source with the NC
- Triggers from dedicated NC campaigns
- Follow up at higher frequencies with the Italian antennae
- **MWL follow up**



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

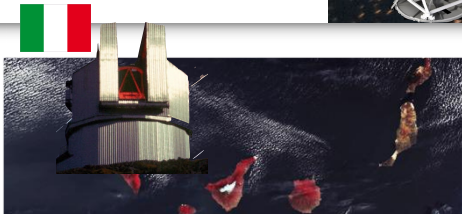


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

The Northern Cross as a trigger

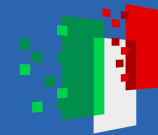




Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

Conclusions



- CHORD is coming online, with unprecedented capabilities in the FRB field;
- The Northern Cross is a sibling instrument in Europe which can do follow-up of CHORD discoveries and complementary observations both at different and for longer times;
- We have built a valid infrastructure, in terms of people and of resources: now it is time to collect our results!



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

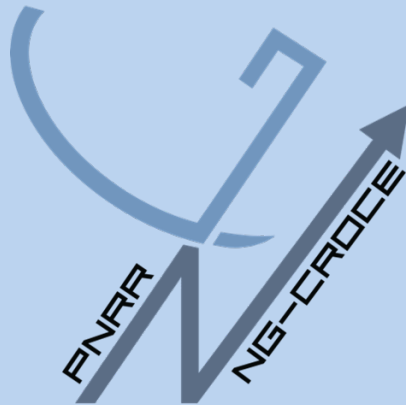


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



INAF
ISTITUTO NAZIONALE
DI ASTROFISICA

THANK YOU



Next Generation – Croce del Nord

IR0000026

Intervento finanziato nell'ambito del **PNRR** - Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza

M4C2

Missione 4 - Istruzione e Ricerca

Componente 2 - Dalla Ricerca alla Impresa

Linea di Investimento 3.1 - Rafforzamento e creazione di Infrastrutture di Ricerca

CUP C53C22000880006