

# "SKA: L'ORECCHIO PIÙ GRANDE DEL MONDO"

Anna Wolter

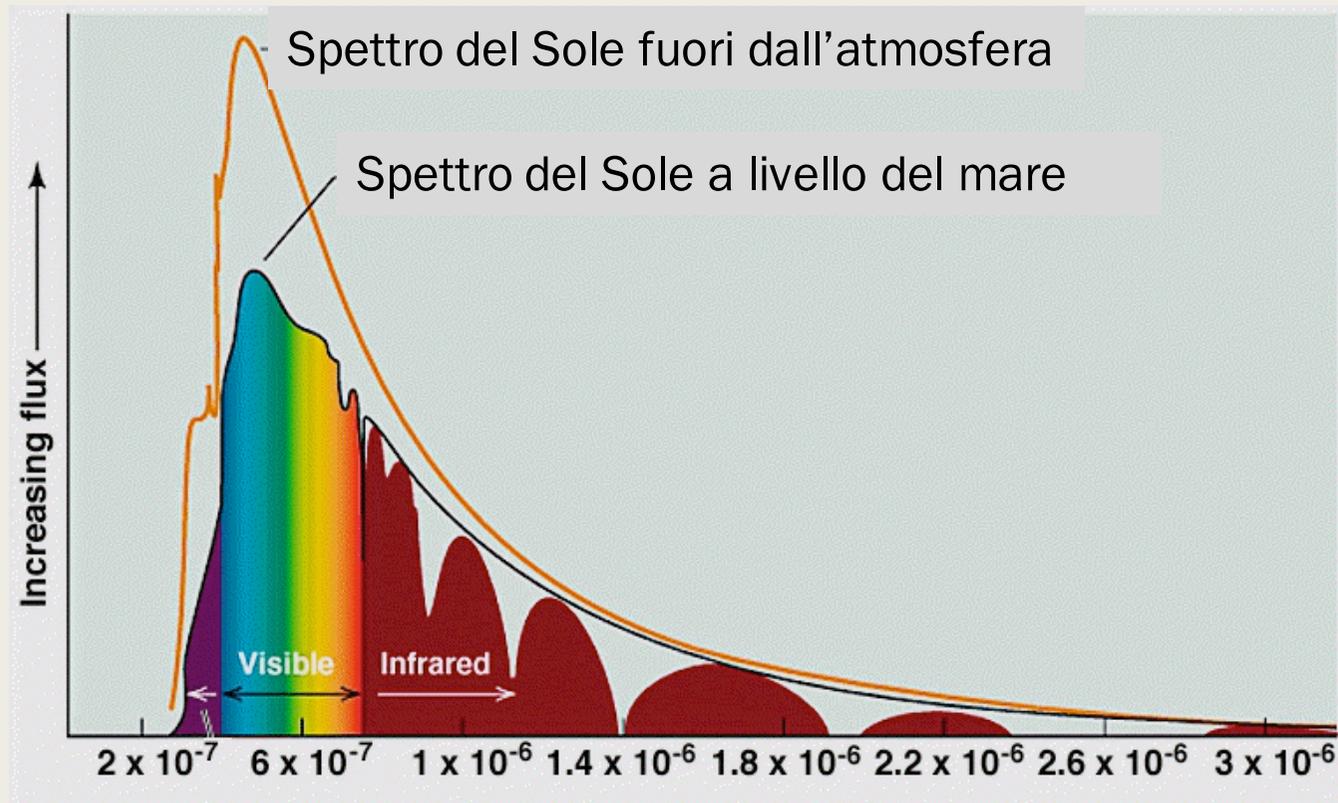
INAF-Osservatorio Astronomico di Brera

Tech talk

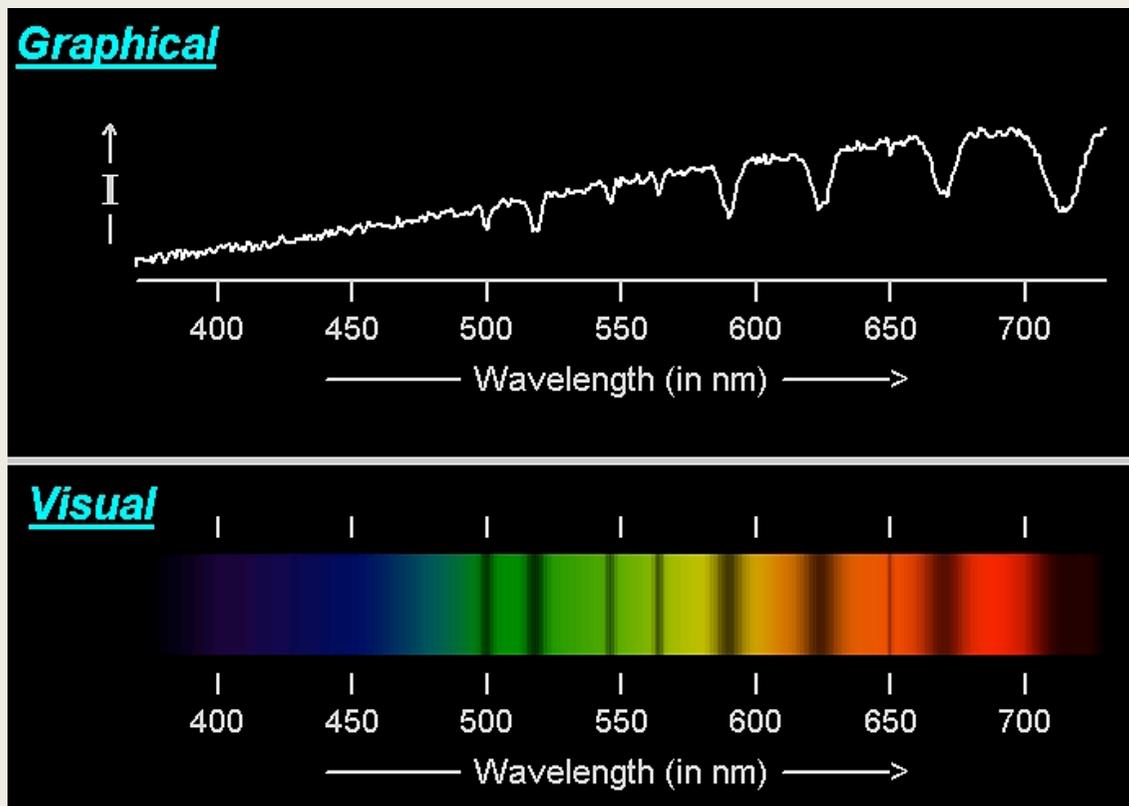


# Il Sole

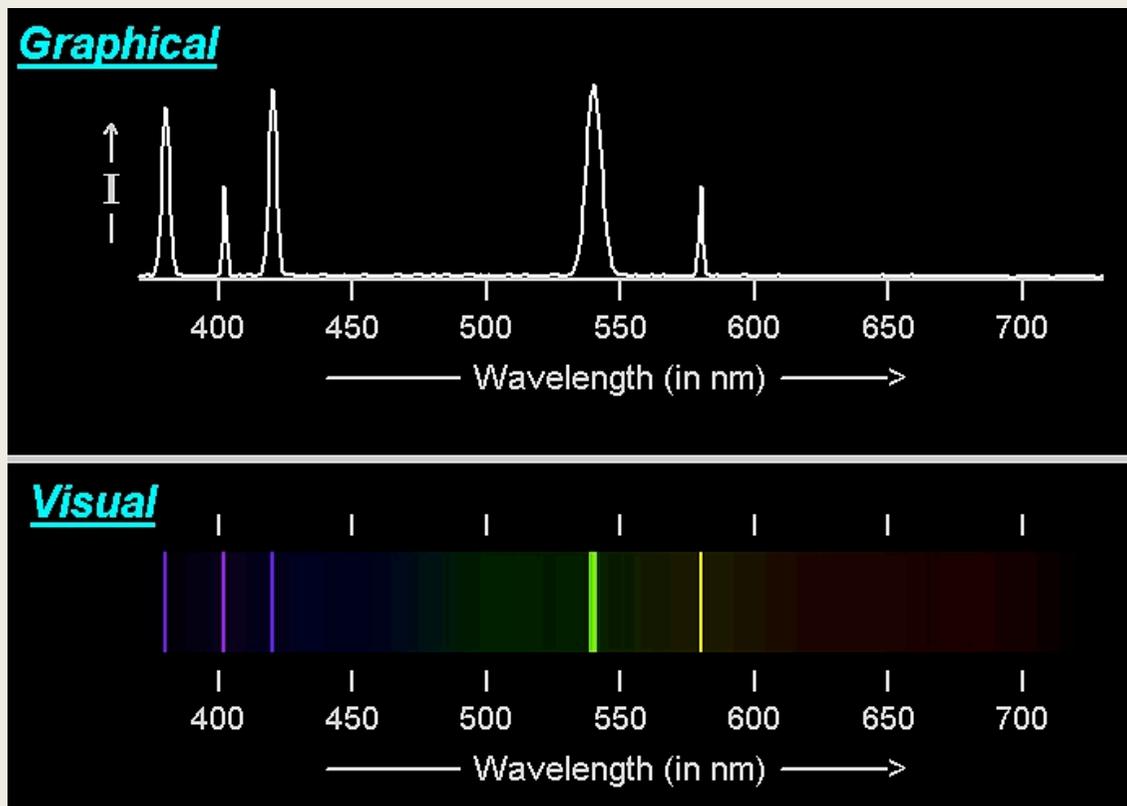
$$\langle E \rangle = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$



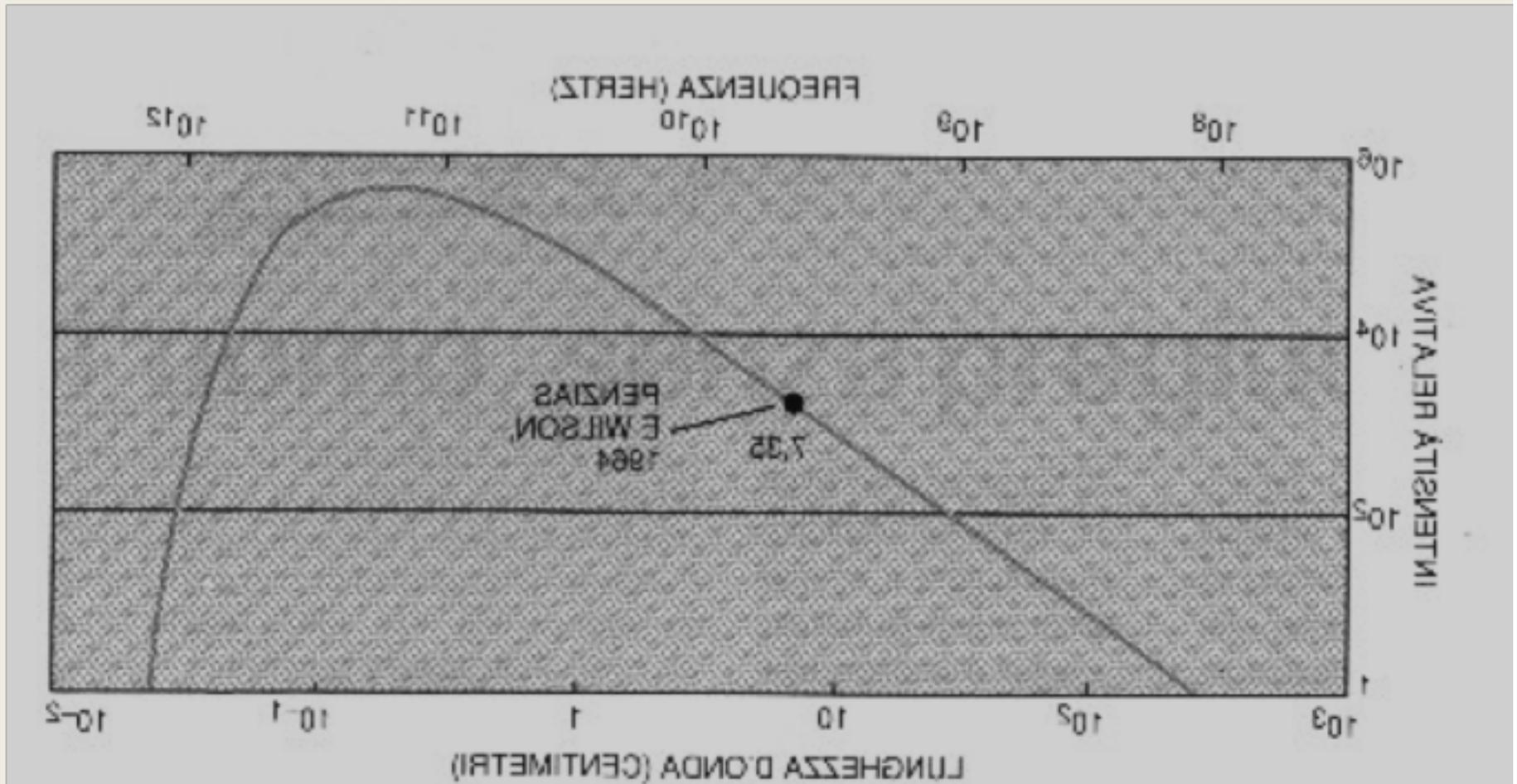
# $\alpha$ Scorpii = Antares



# Lampada al mercurio



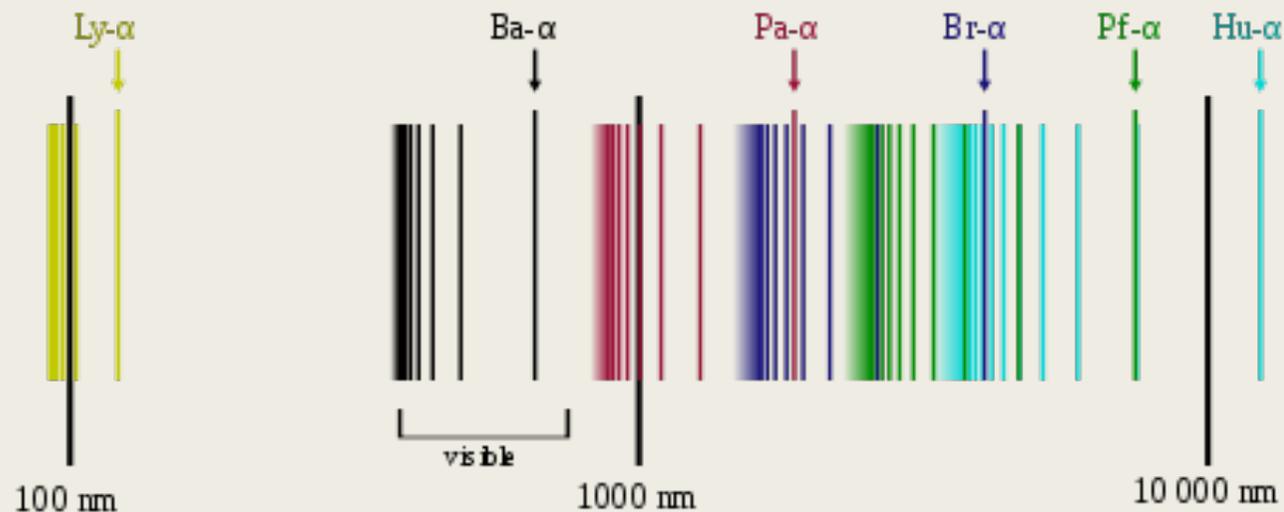
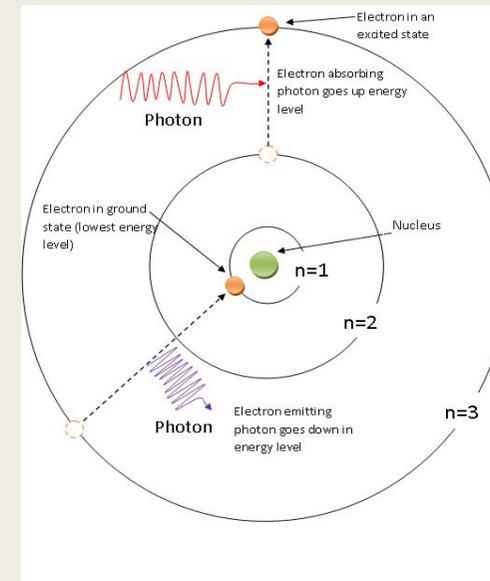
Alpher, Herman e Gamow nel 1948 prevedono l'eco del Big Bang.  
Penzias e Wilson osservano un "rumore" nel 1964  
Premio Nobel nel 1978



# Righe di emissione = salto di livello

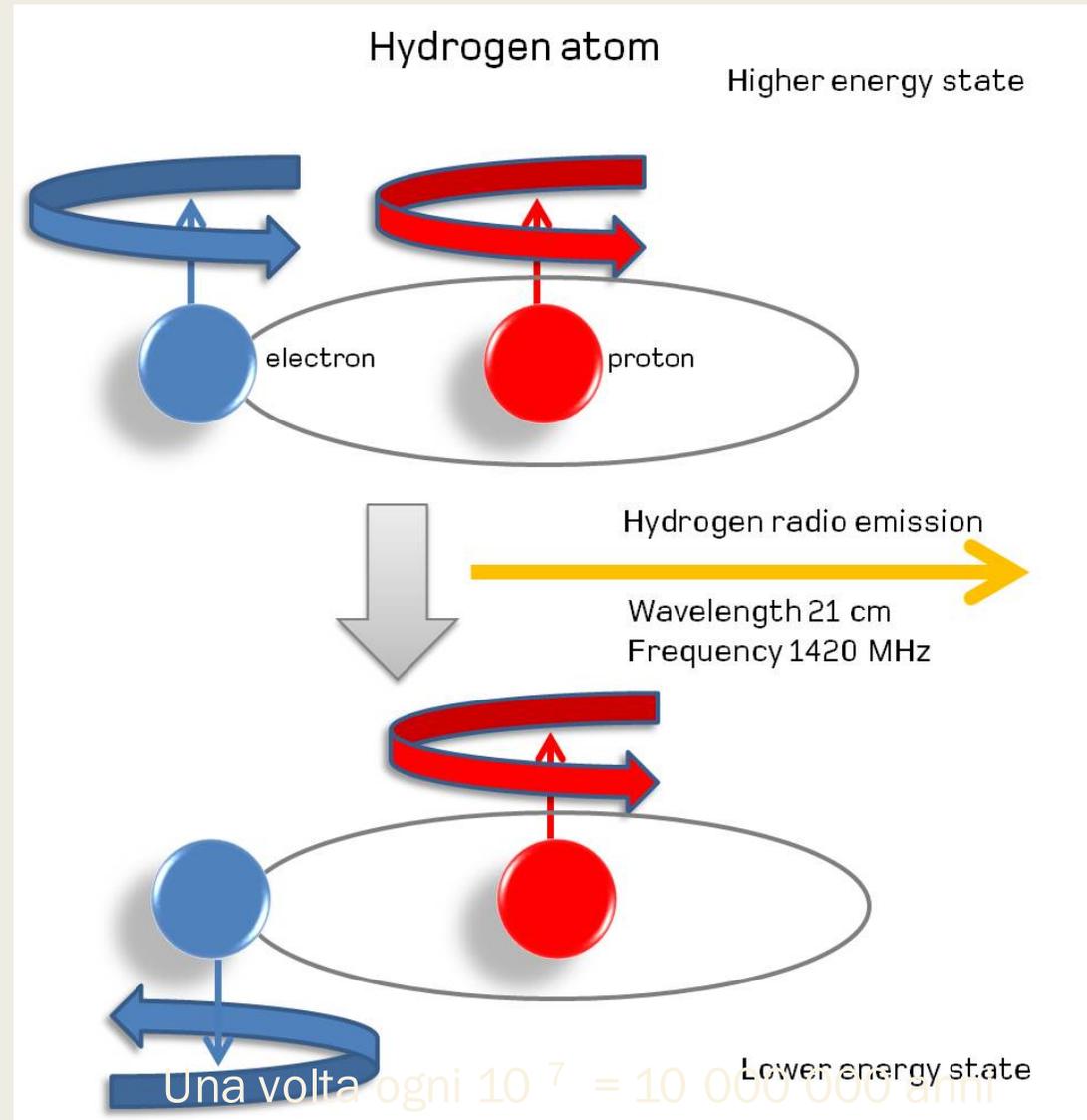
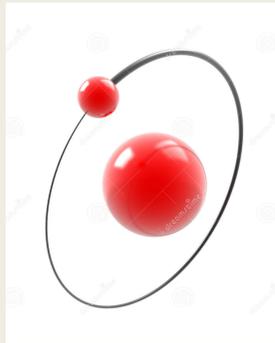
- Formula di Rydberg

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

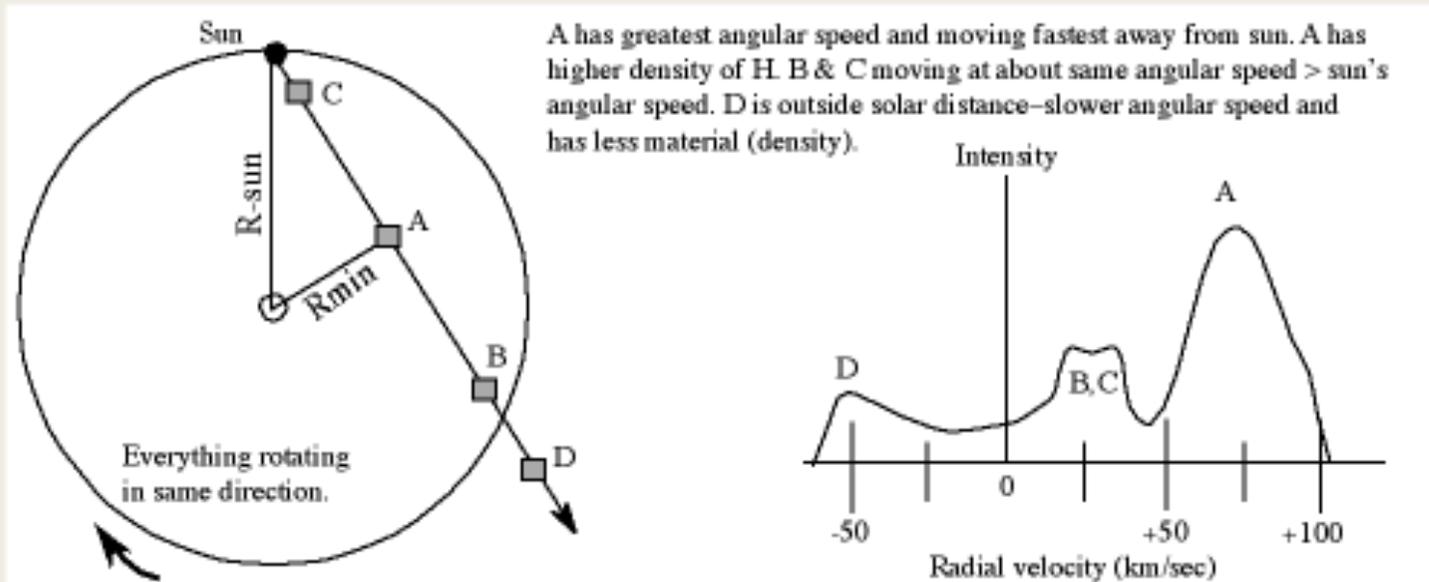


# Idrogeno

- Inversione spin



# Riga dell'Idrogeno a 21 cm



Emissione a 21.1 cm = 1420.4 MHz – alla sorgente.

Spostamento Doppler –

la vediamo a frequenze diverse a seconda della distanza

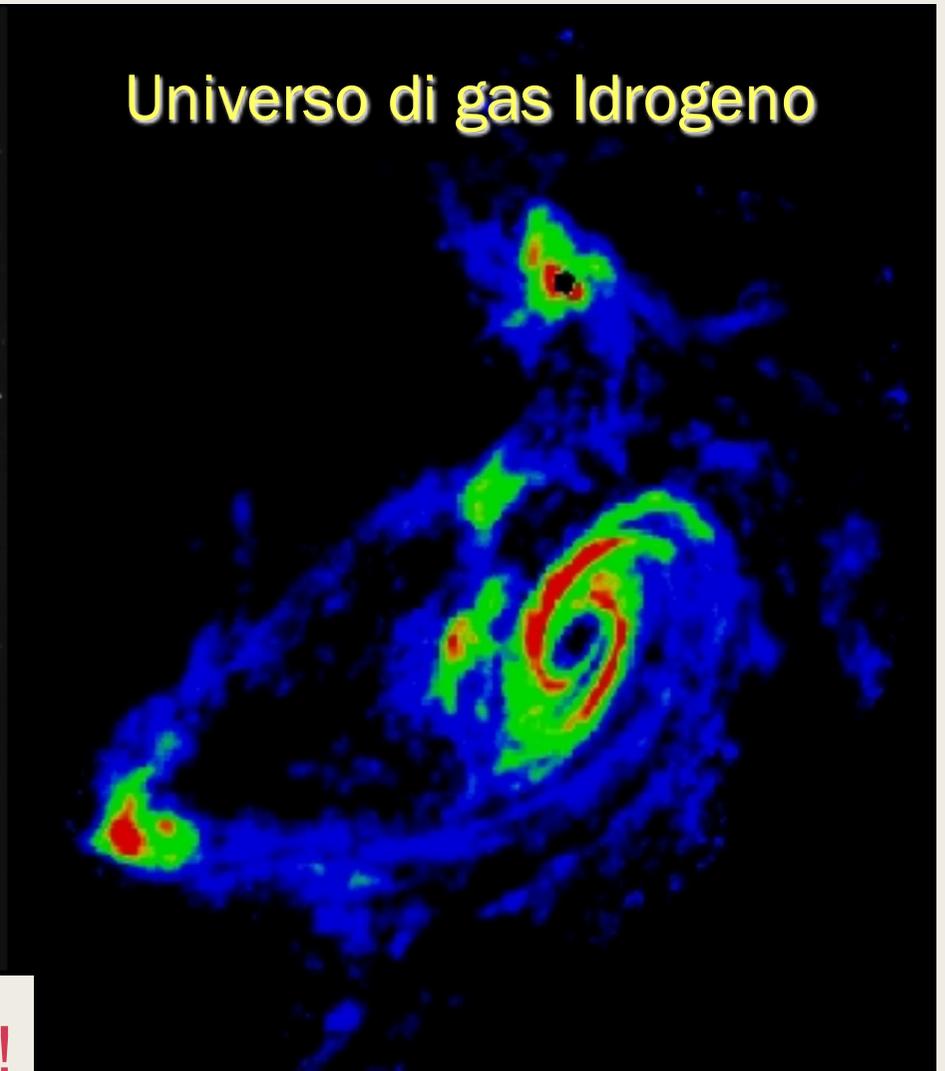
Evento raro : 1/100000000 anni ( $10^{-7}$  /yr)

Ma quanti atomi ci sono?

$$3 \times 10^9 M_{\odot} \times (2 \times 10^{30} \text{ kg} / 2 \times 10^{-27} \text{ kg}) = 2 \times 10^{66}$$

$$1/10^{14} \text{ sec} = \sim 10^{52} \text{ atomi/sec}$$

# Serve un telescopio per l'Idrogeno!!

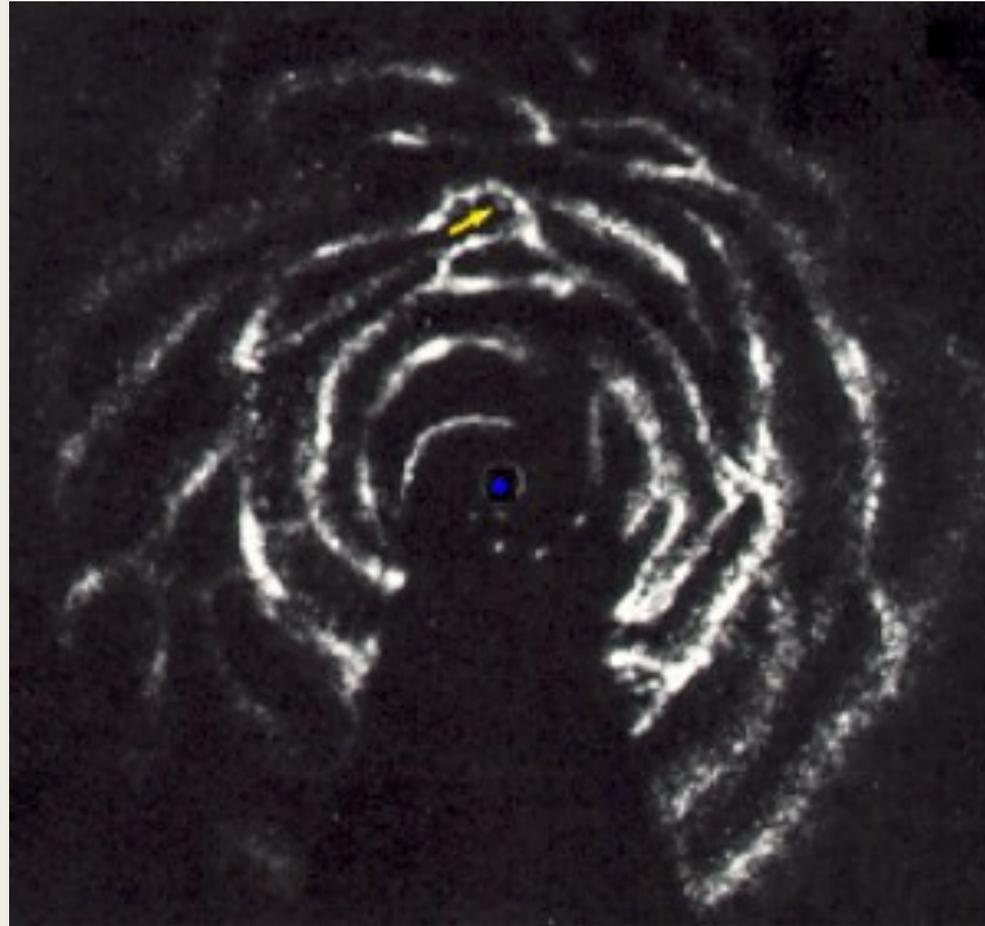


Ma il segnale è molto debole!

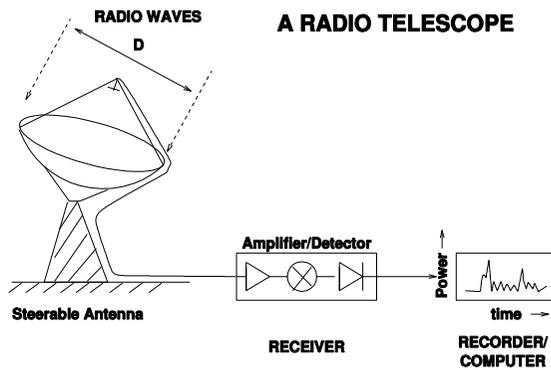
# La Via Lattea a 21 cm

Sole

Centro  
galattico



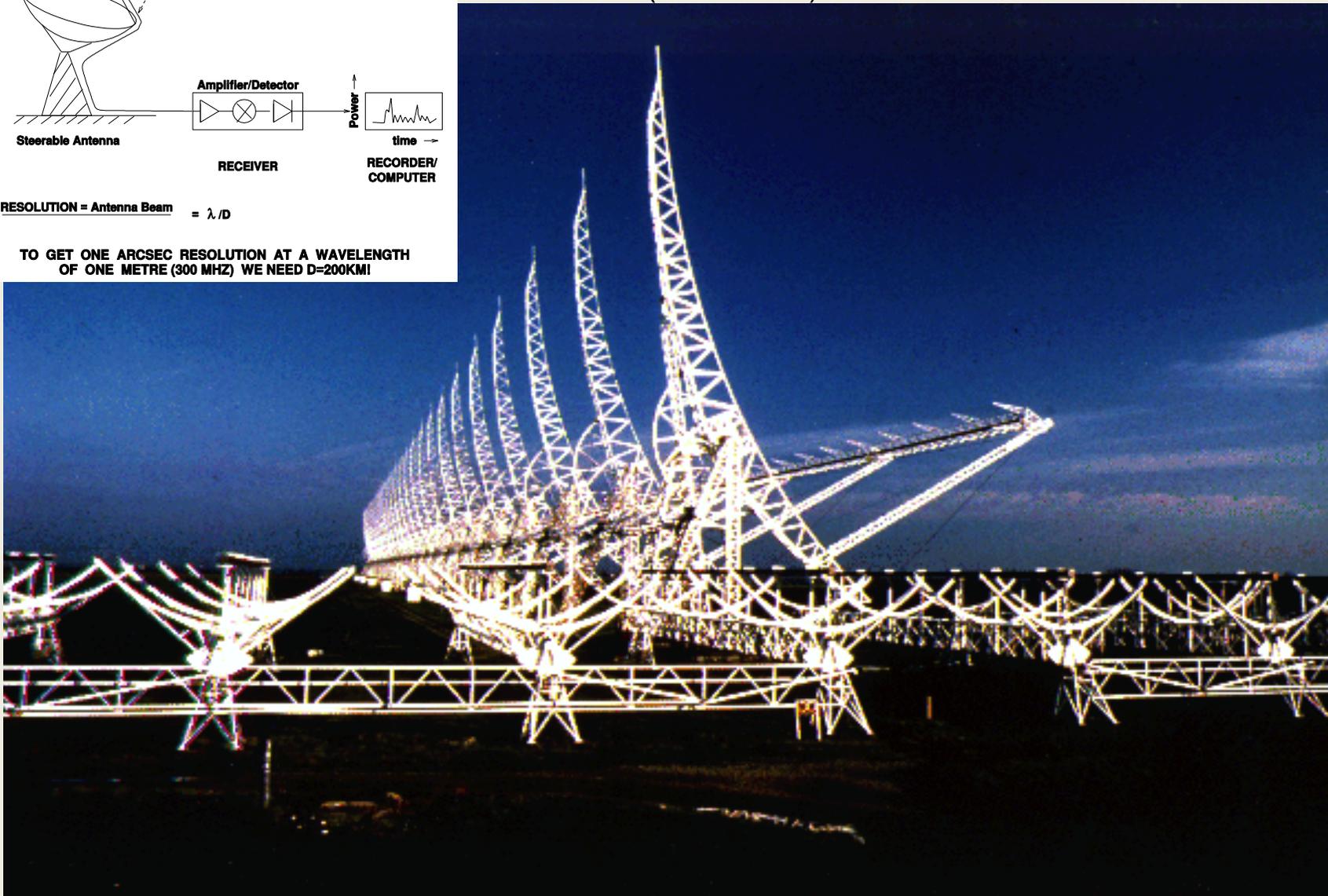
**A SIMPLE RADIO TELESCOPE CONSISTS OF AN ANTENNA, A RECEIVER AND A RECORDER**



**RESOLUTION = Antenna Beam =  $\lambda/D$**

**TO GET ONE ARCSEC RESOLUTION AT A WAVELENGTH OF ONE METRE (300 MHZ) WE NEED D=200KMI**

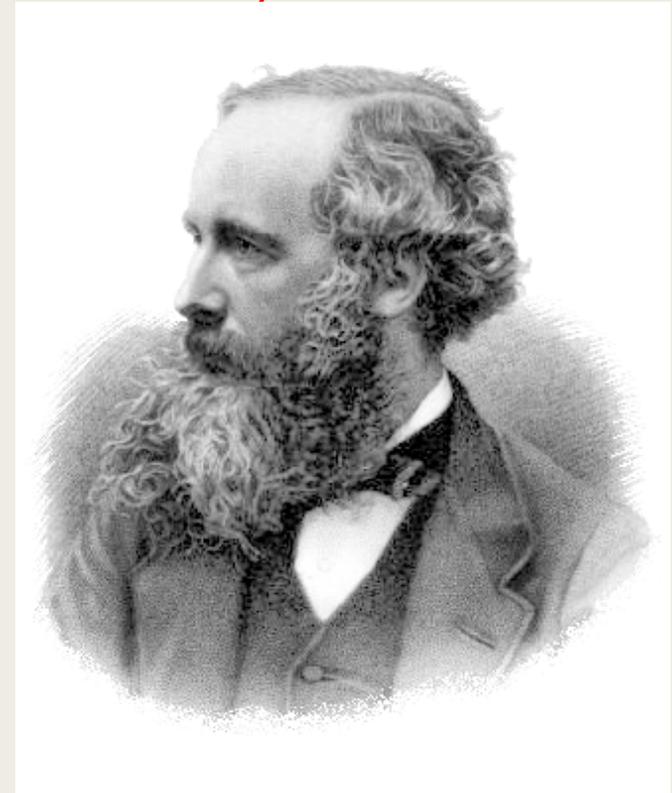
Risoluzione  $\sim \lambda/D$  radianti Un telescopio da 10 cm in ottico  $\lambda/D = 1''$  . Per ottenere la risoluzione di 1" alla lunghezza d'onda di 1 metro (300 MHz) serve  $D = 4$  km



# J. Clerk Maxwell (1831-1879)

Unifica la teoria dell'elettricità e del magnetismo (Faraday, Ampere, etc.) nelle famose "equazioni di Maxwell"

« Questa velocità è così vicina a quella della luce che ho ragione di supporre che la luce stessa sia un'onda elettromagnetica » (1865)



H. Hertz (1857-1894) produce nel 1888 le prime onde radio (l'unità di misura della frequenza prende il nome da lui:  $1 \text{ Hz} = 1$  ciclo al secondo)

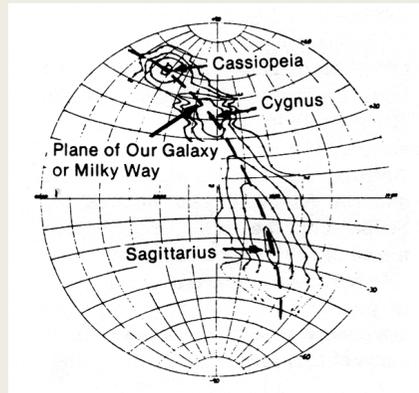
# Guglielmo Marconi (1874-1937)



Vince con Braun il premio Nobel nel 1909 per le sue ricerche sulle onde radio fondate anche su esperimenti di Nikola Tesla (1856-1943).

# Radio astrono

- “La radioastronomia non n  
genitori sono entrambi lavc  
(Chris Christiansen, CSIRO
- Marconi e Tesla ca. 1900
- K. Jansky ca. 1930 -> Jy
- G. Reber 1944

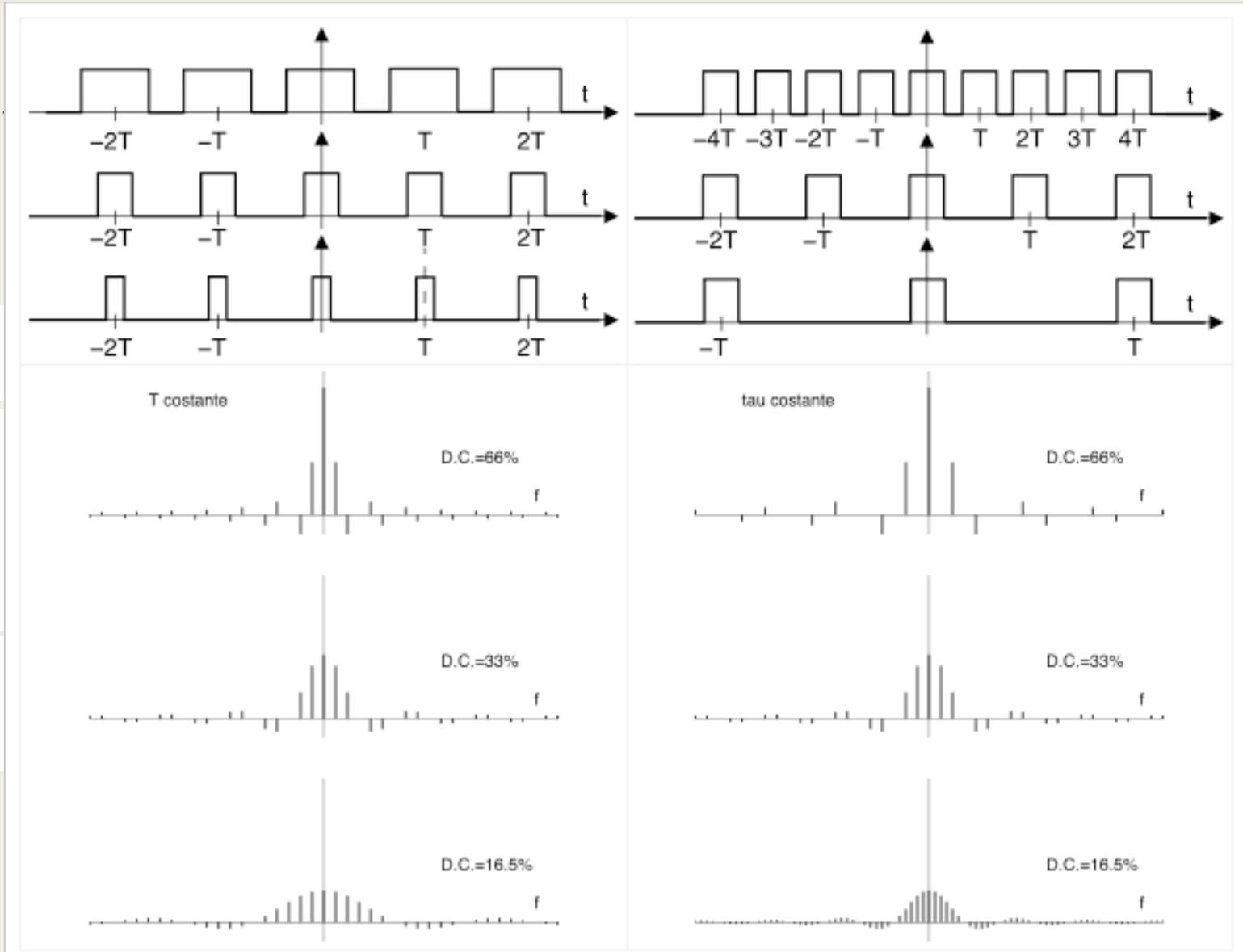


# Interferometria

- Ruby Payne-Scott – la prima donna nella RadioAstronomia – l'unica per tanti anni: collabora alla prima osservazione interferometrica
- Nell'articolo di McCready, Pawsey and Payne-Scott (1947) viene per la prima volta sottolineata la relazione tra la potenza intercettata da un interferometro e la trasformata di Fourier della distribuzione del flusso della sorgente nel cielo.



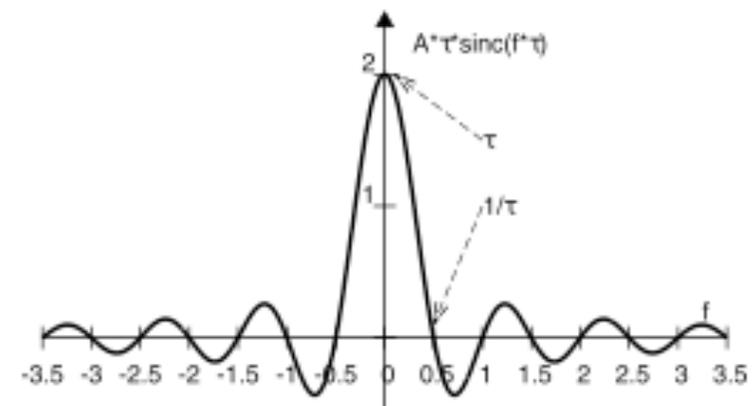
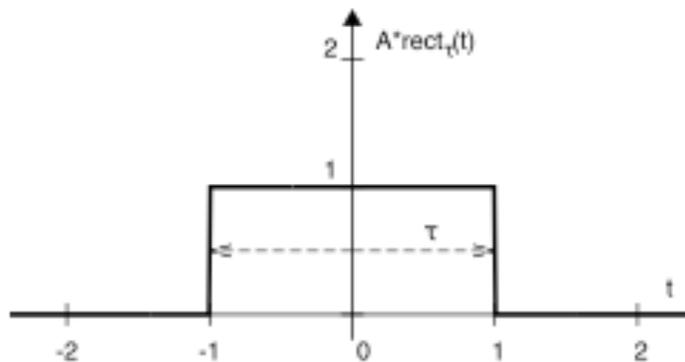
# Serie di Fourier



# Trasformata di Fourier

- $X(f) = \mathcal{F}\{x(t)\}$  un operatore funzionale che, applicato ad un segnale definito nel dominio del tempo, ne individua un altro nel dominio della variabile *continua* frequenza

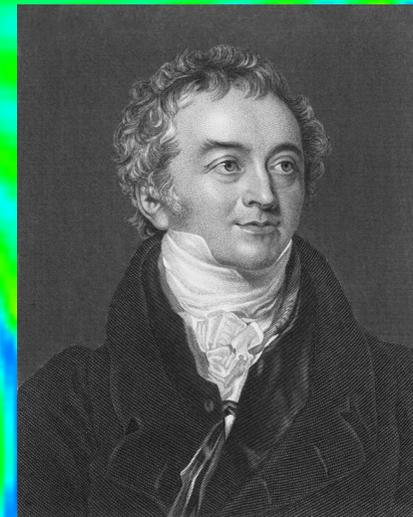
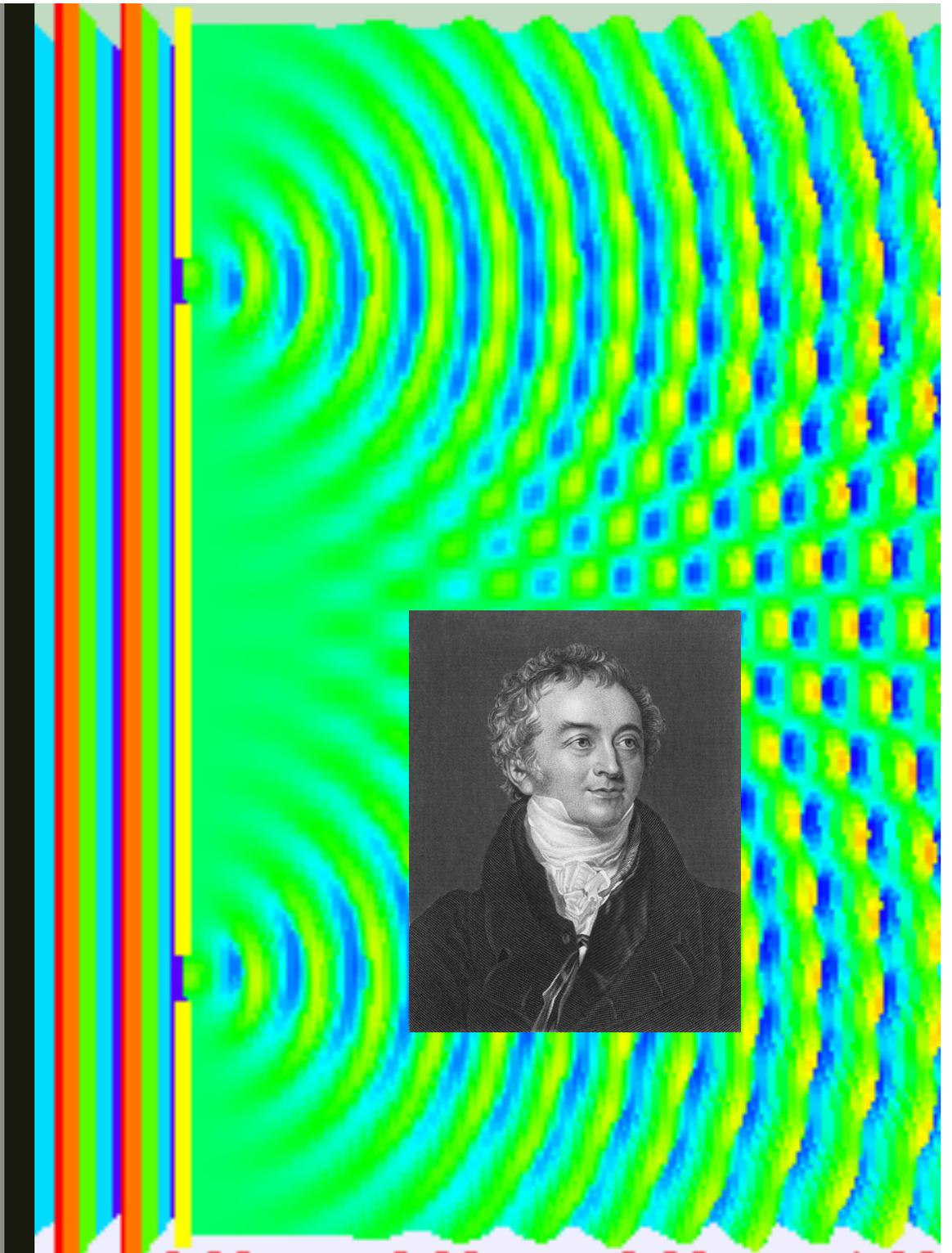
$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt$$



# Figure di interferenza

Esperimento di Young 1801

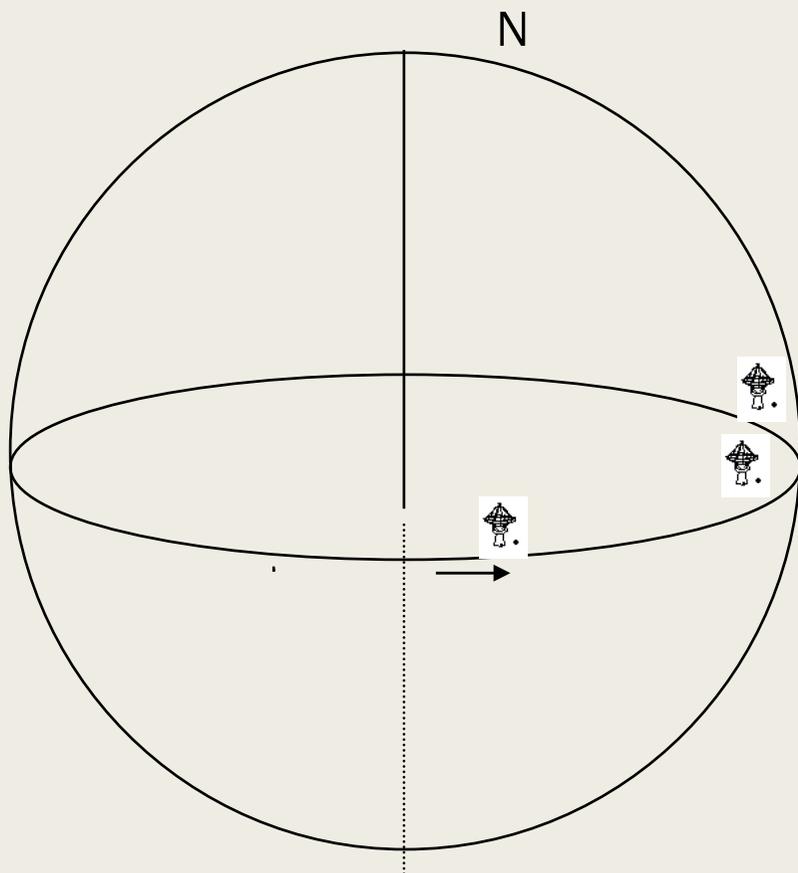
Una singola sorgente di luce –  
due fenditure: la luce si  
comporta come un'onda!



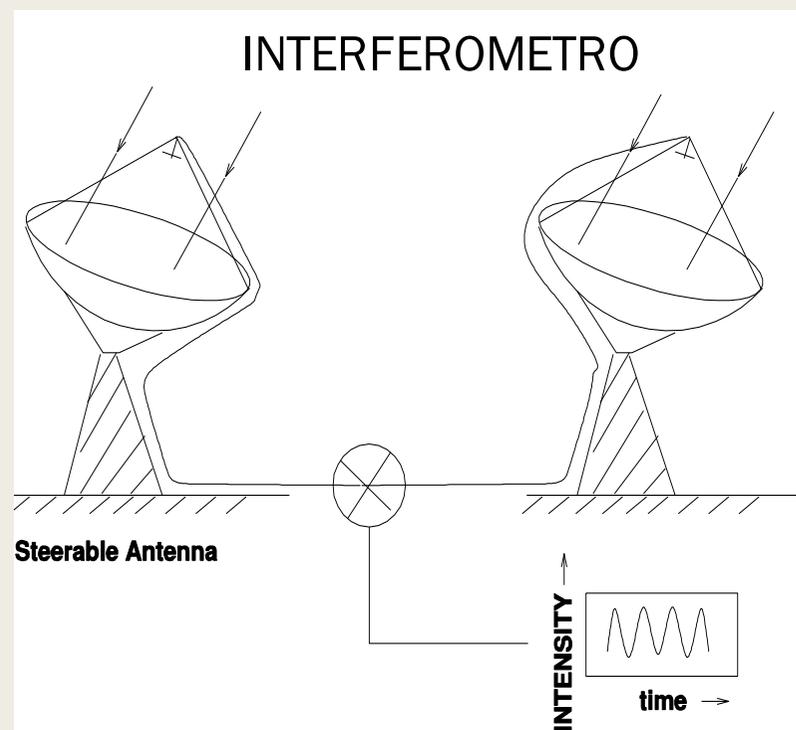
## Radio-telescopio di sintesi: la rotazione terrestre

Mentre la Terra ruota, 2 antenne al suolo vedono la stessa sorgente da un punto di vista un po' diverso.

Combinando molte di queste diverse **linee di base** si può sintetizzare una grande apertura.



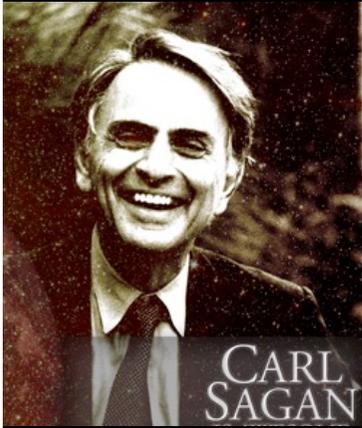
Ogni coppia di antenne funziona come due fenditure, di fatto moltiplicando la distribuzione di brillantezza del cielo per una risposta sinusoidale. Così ogni coppia di antenne dell'interferometro misura una componente di Fourier dell'immagine radio.



## II VLA, Socorro, New Mexico, USA.



1985



# CARL SAGAN

A NOVEL  
**CONTACT**

1997 (Robert Zemeckis)



# Vista panoramica del GMRT array, INDIA.



# VLBI : Very Long Baseline Interferometry



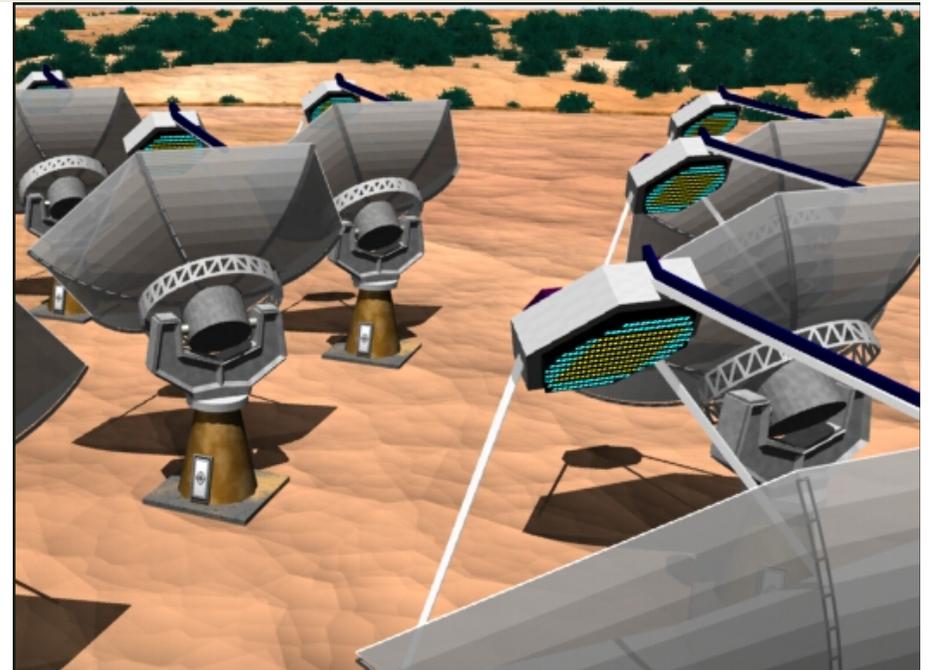
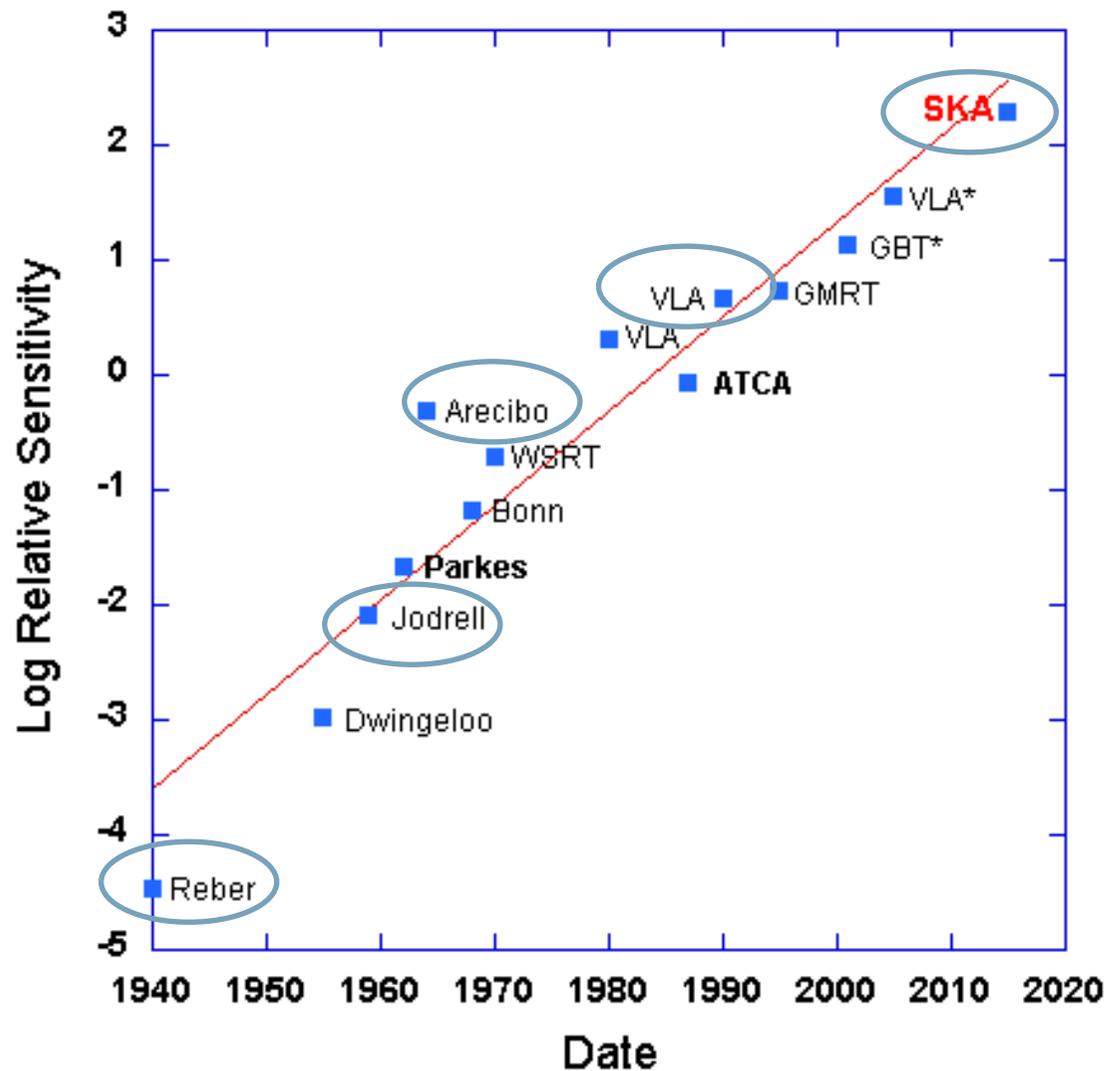
VLBA



Spatial VLBI

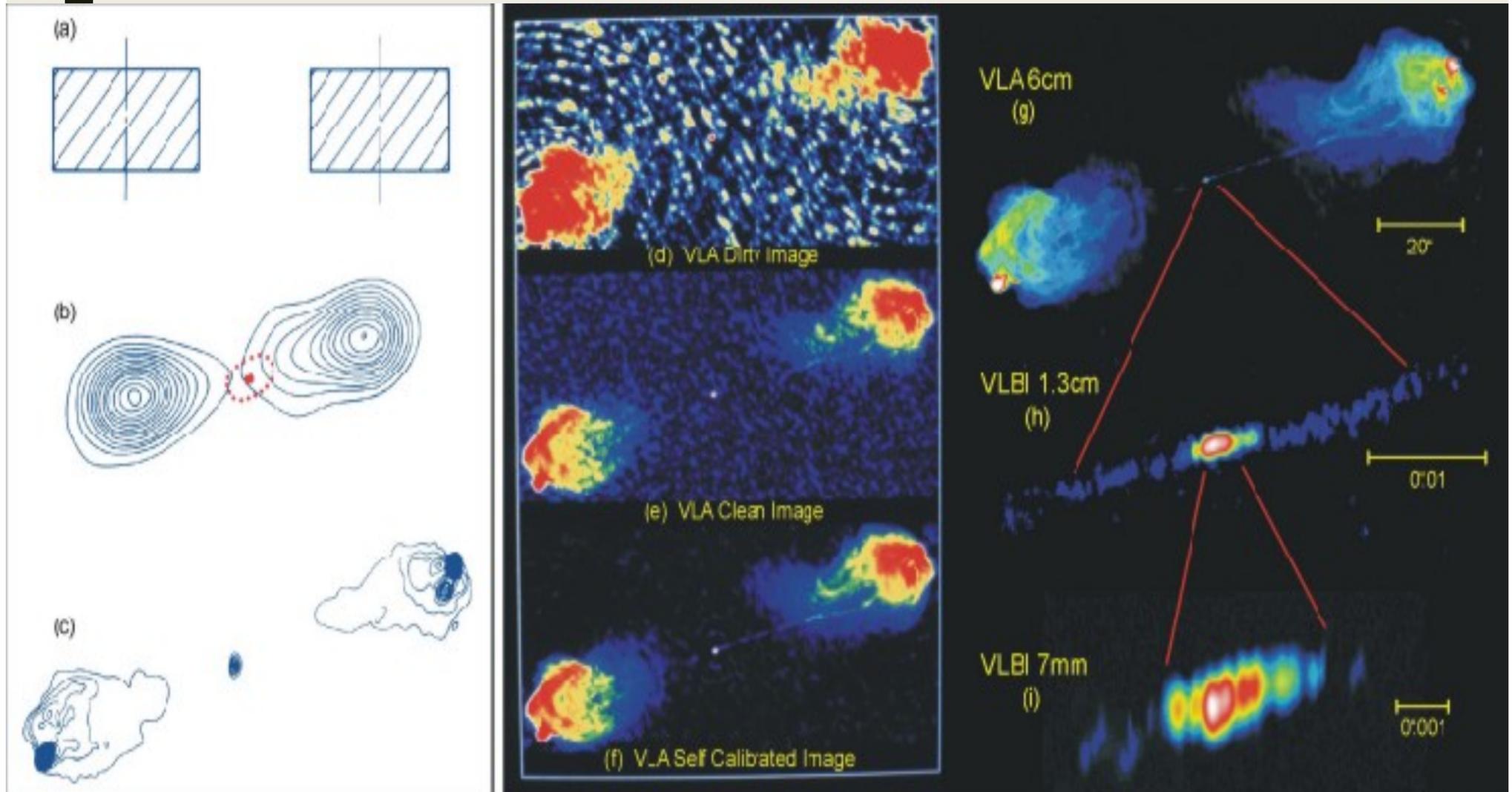
# Sensibilità dei RadioTelescopi

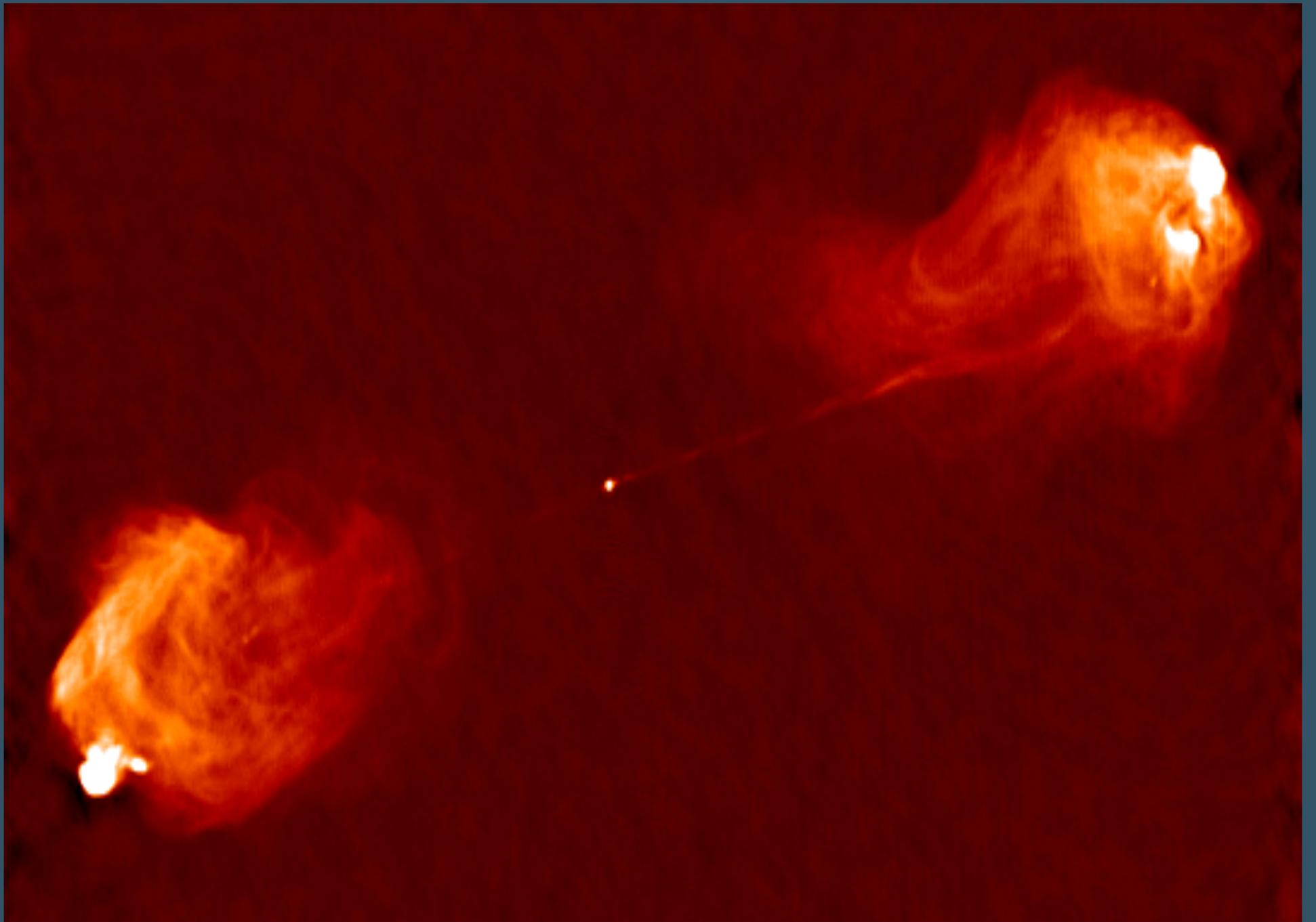
Radio Telescope Sensitivity

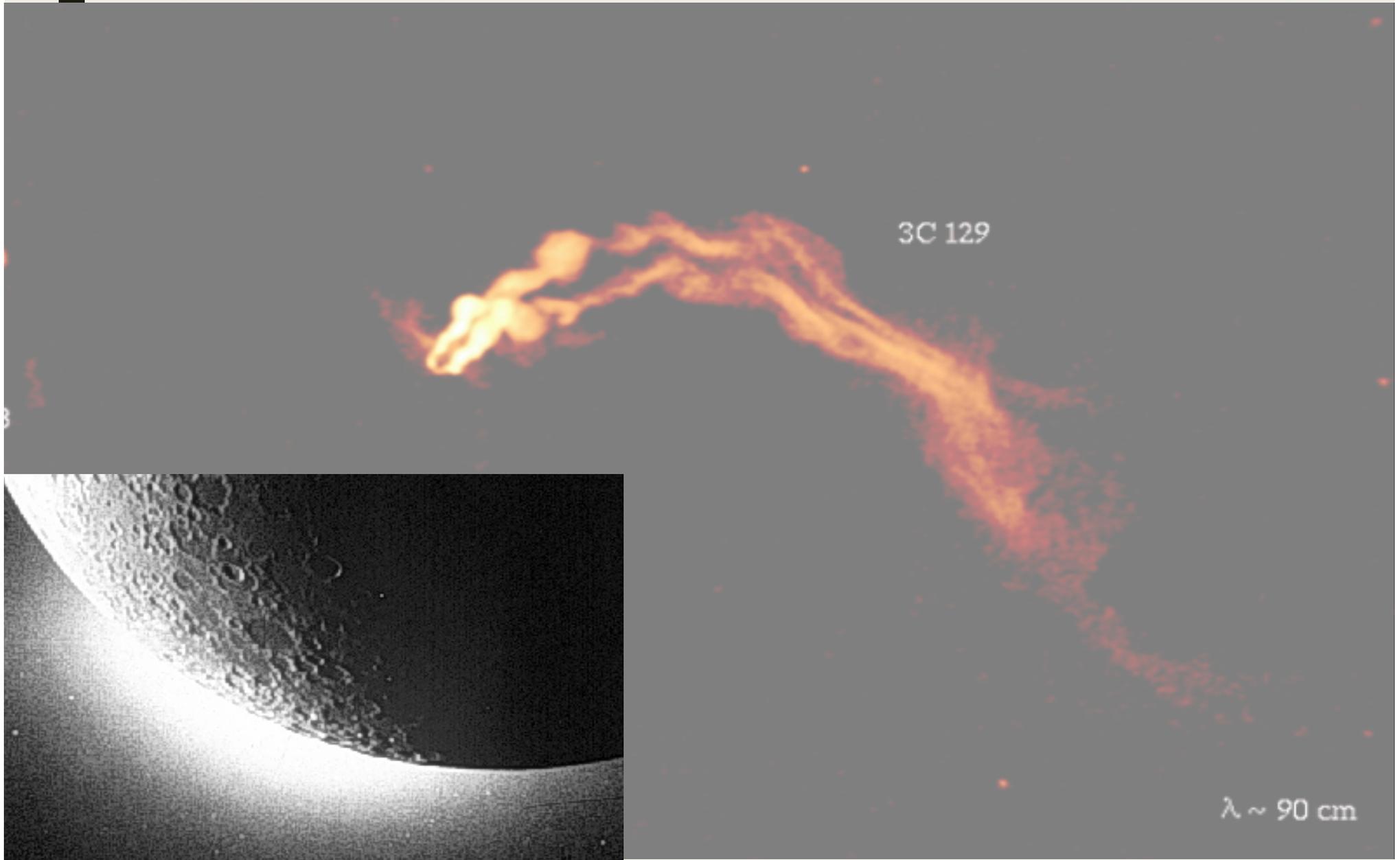


# Capacità di formare immagini

## *CYGNUS A - 25 anni*

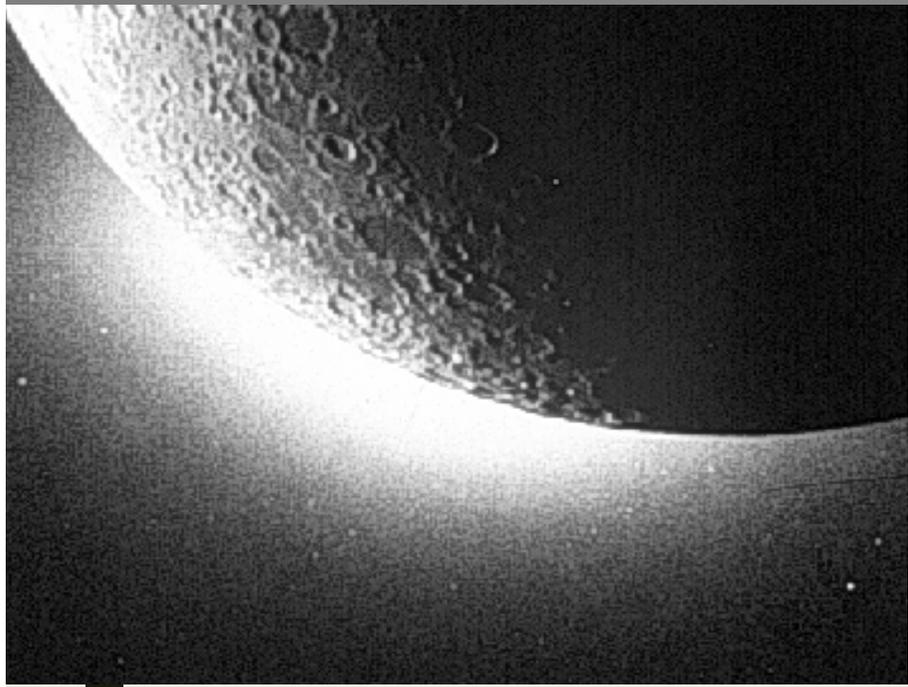






3C 129

$\lambda \sim 90 \text{ cm}$



1980



VLA New Mexico

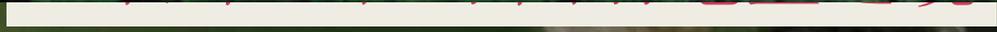


# Arecibo (Porto Rico) 300 mt



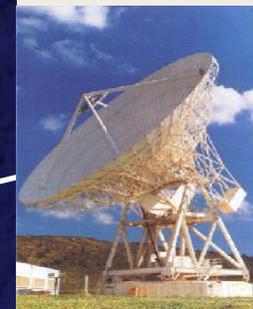


© Jeff Dai



# Radiotelescopi INAF in Italia

Realizzati  
interamente  
in Italia





# Sussurri dall'Universo

*“The encyclopaedia of the Universe is written in very small (21-cm) typescript, to read it one requires a very sensitive telescope.”*

*“L'enciclopedia dell'Universo è scritta in caratteri minuscoli (21-cm), per leggerla è necessario un telescopio molto sensibile.”*

*Peter Wilkinson*

*1990*

# Scelta del logo: 2001





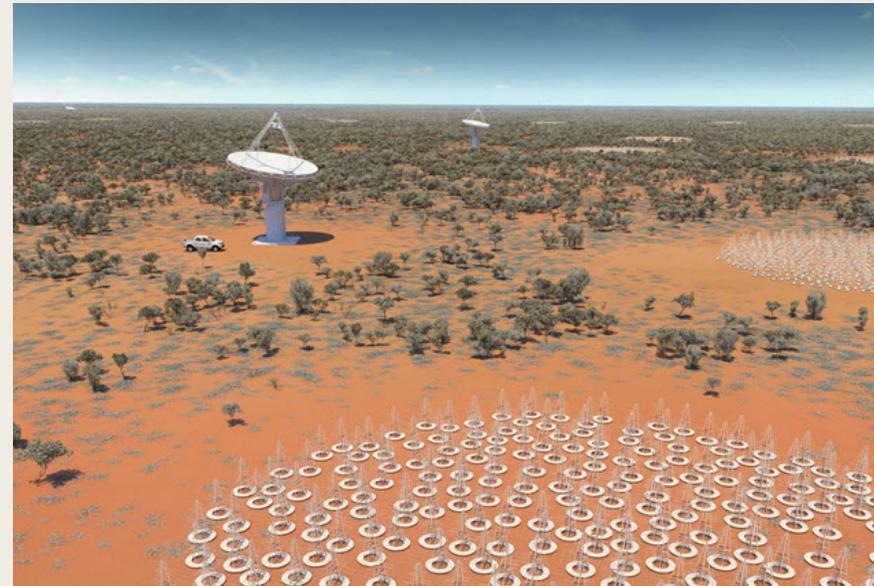
# SQUARE KILOMETER ARRAY

Un radiotelescopio rivoluzionario costituito di migliaia di ricettori e antenne per funzionare a frequenze tra 50 MHz e 14 GHz, collegati tra loro su un'area grande come un continente.



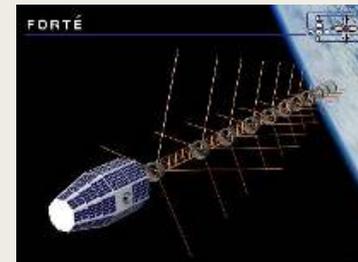
Come dice il nome, l'area di raccolta totale sarà nominalmente un km<sup>2</sup> (1000000 m<sup>2</sup>!) ma in realtà sarà superiore.

SKA sarà il più grande e più sensibile radiotelescopio mai costruito.

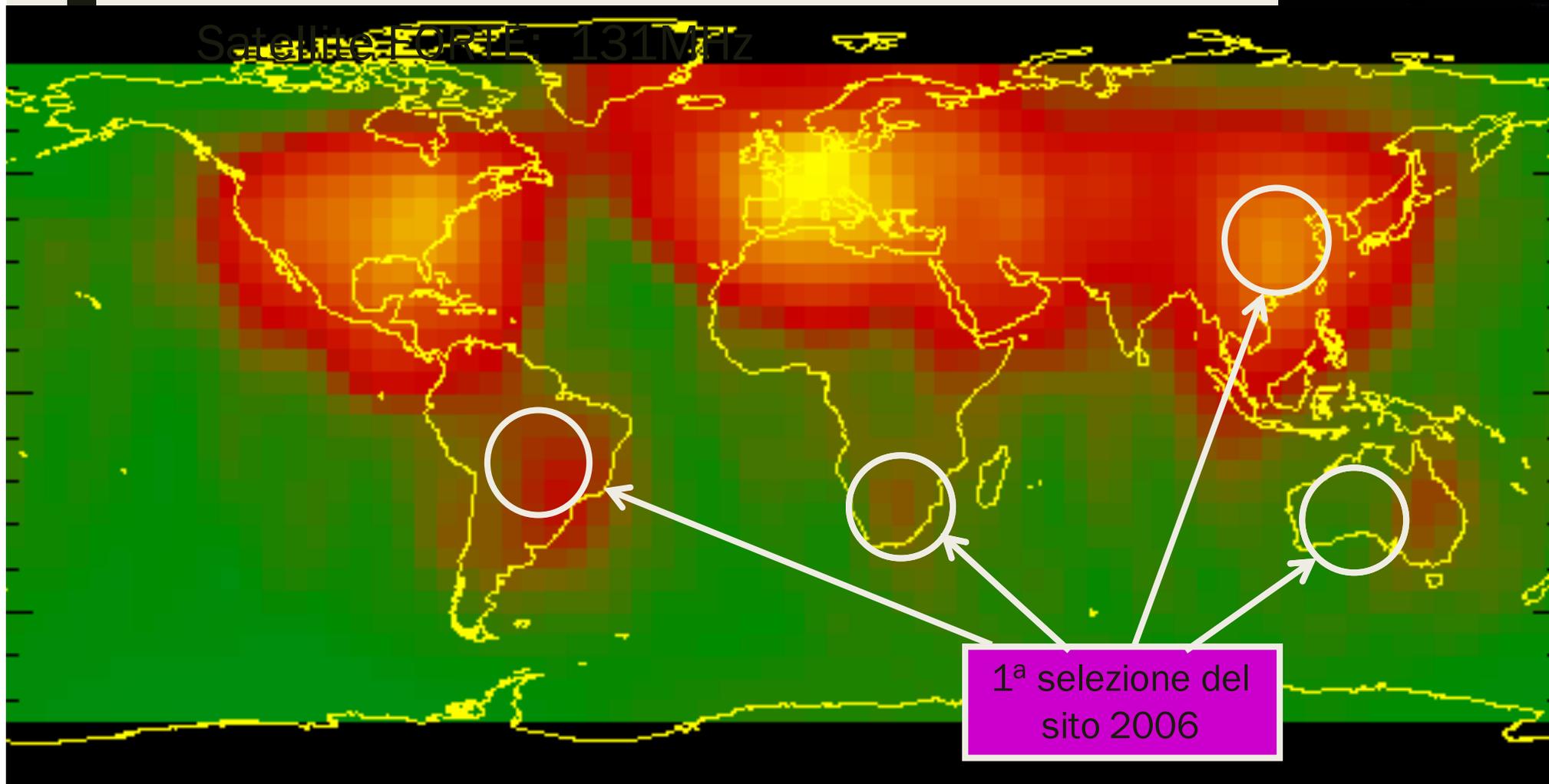


# Le zone più silenziose al mondo:

Livelli di Radio-rumore



Satellite FORTÉ 131MHz



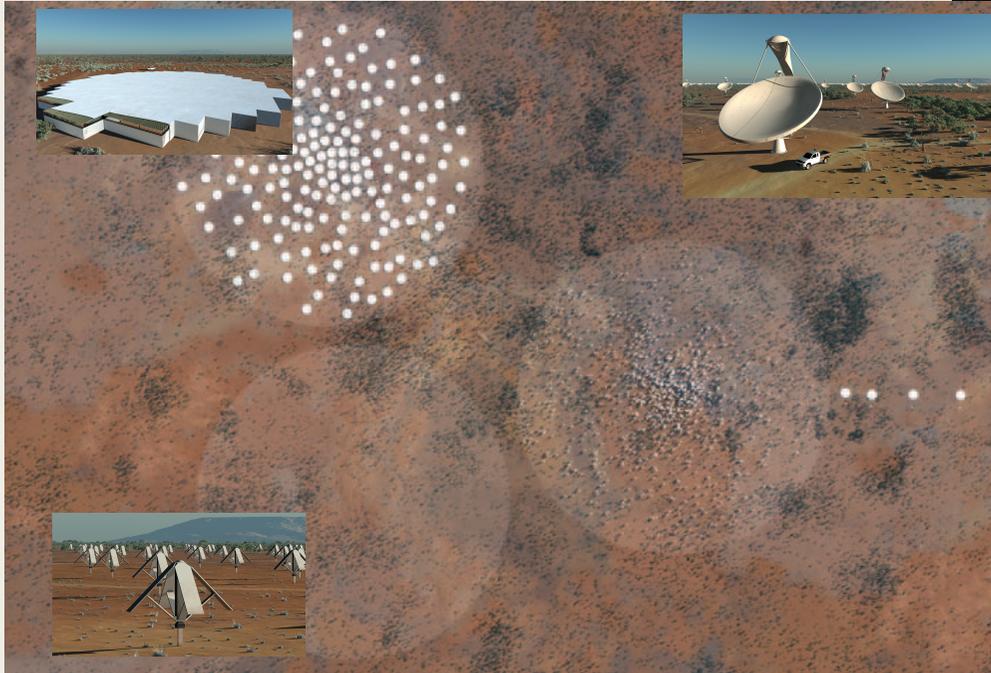
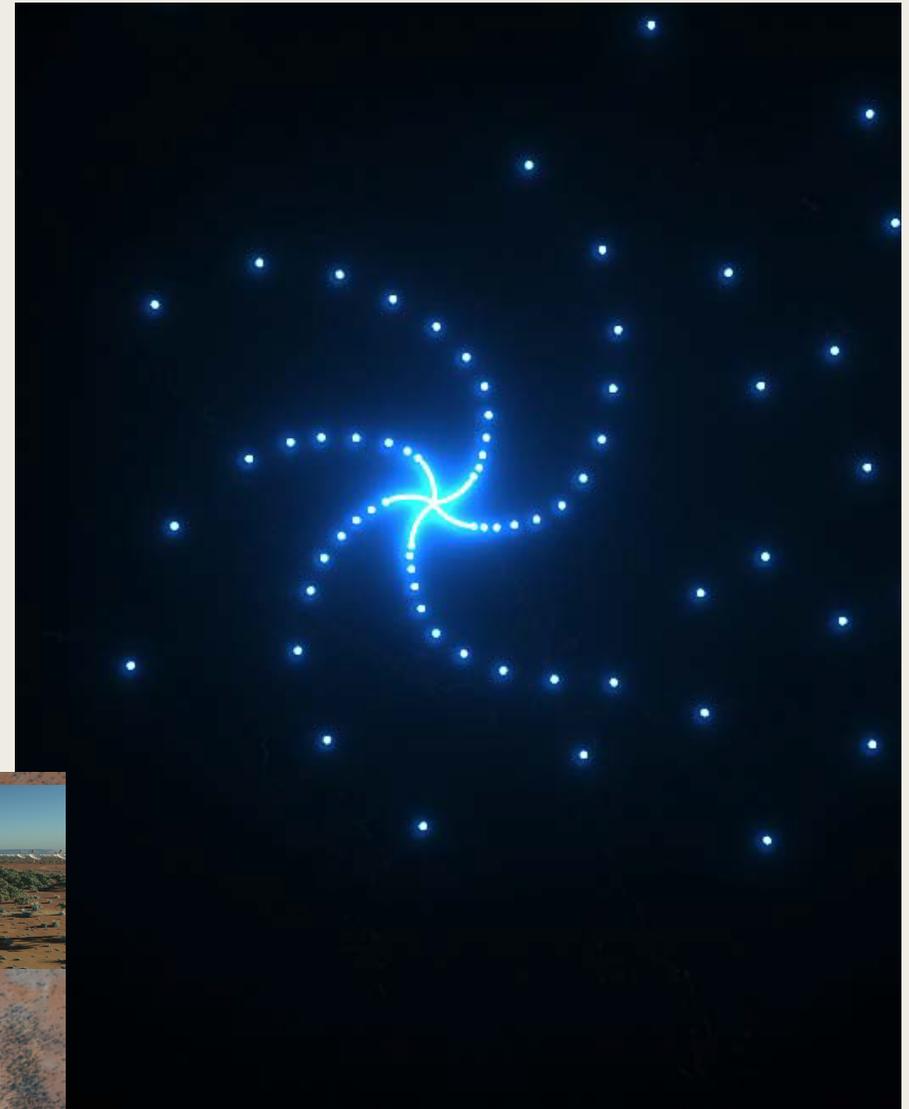
# Lo SKA

1 km<sup>2</sup> di area di raccolta

3000 km di estensione

67 organizzazioni da 20 paesi

2 sedi : Sud Africa e Australia  
(decisione del 2012)

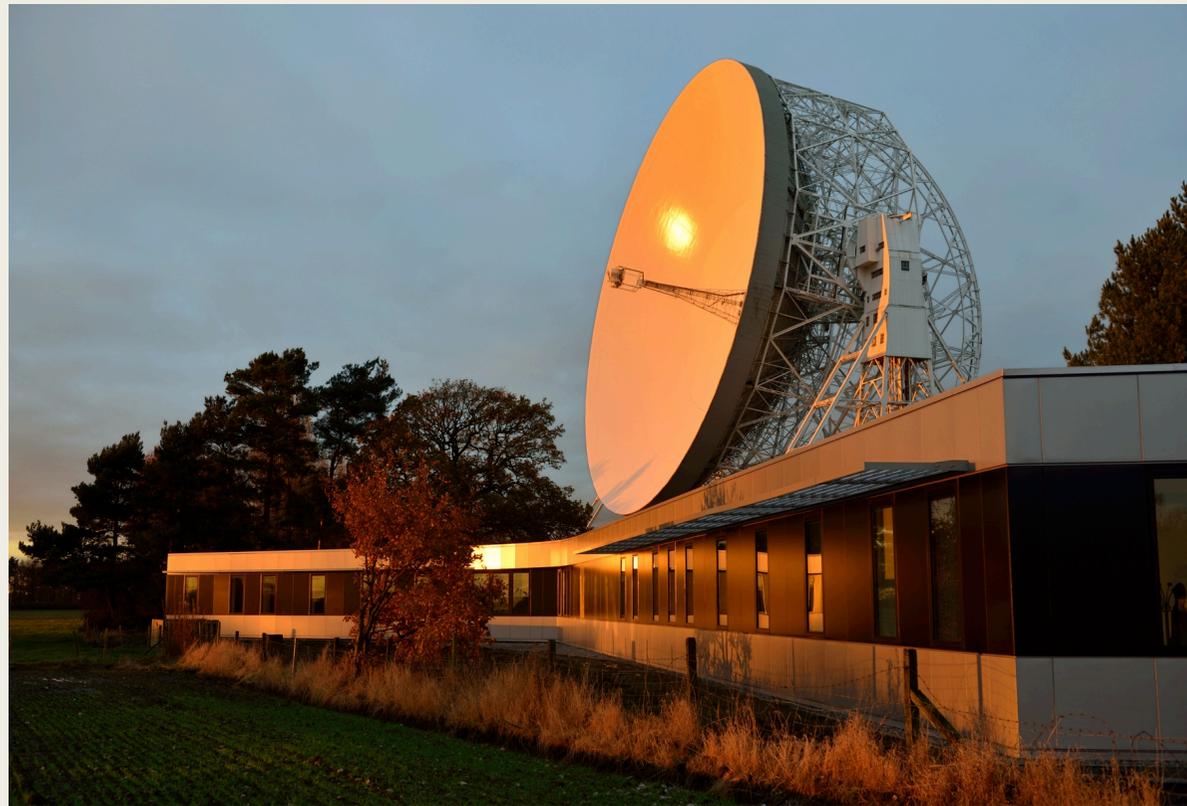


Forma a terra delle stazioni

# SKA Organization

- 12 stati membri (**Australia**: Department of Innovation, Industry, Science and Research; **Canada**: National Research Council; **Cina**: National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences; **Francia**: National Center for Scientific Research; **India**: National Centre for Radio Astrophysics; **Italia**: Istituto Nazionale di Astrofisica; **Nuova Zelanda**: Ministry of Economic Development; **Paesi Bassi**: Netherlands Organisation for Scientific Research; **Repubblica del Sud Africa**: National Research Foundation; **Regno Unito**: Science and Technology Facilities Council; **Spagna**: Ministry of Science, Innovation & Universities; **Svezia**: Onsala Space Observatory)
- Organizzazione no-profit; quartier generale in Manchester, UK: per le relazioni formali tra i partner internazionali e per una leadership centrale del progetto.
- Supervisione da un comitato direttivo (10 membri votanti)
- Ri-organizzazione delle responsabilità e del caso scientifico

# Quartier generale SKA Organization



# Mappa delle nazioni in SKA



# Precursori

- Australia
- *ASKAP (Australian SKA Pathfinder )*



# Precursori

- Europa

- LOFAR (Low Frequencies Array)

(migliaia di antenne omnidirezionali) 10 – 300 MHz

*Intr'n'l collaboration*

<http://www.lofar.org/>

- Italia – in costruzione una stazione a Medicina



# Comitati Direttivi di SKA



- Rappresentanti dei membri
  - *18 membri – 10 votanti in rappresentanza delle nazioni*
- Collegio dei Direttori
  - *Per l'Italia il presidente INAF*
  
- **Science and Engineering Advisory Committee (SEAC) – Chair IT**
- **Strategy and Business Development Committee (StratCom)**
- **Finance Committee**
- **SKA Communications and Outreach Steering Committee (Comms SC)**
  
- **MOU firmato all'assemblea IAU a Manchester agosto 2000**

# Africa: SKA-mid (media frequenza)

Sud Africa + 8 nazioni

KAT-7 - MeerKat



# Australia: SKA-low + SKA-sur

ASKAP – 36 antenne da 12m Phased array feed (PAF)



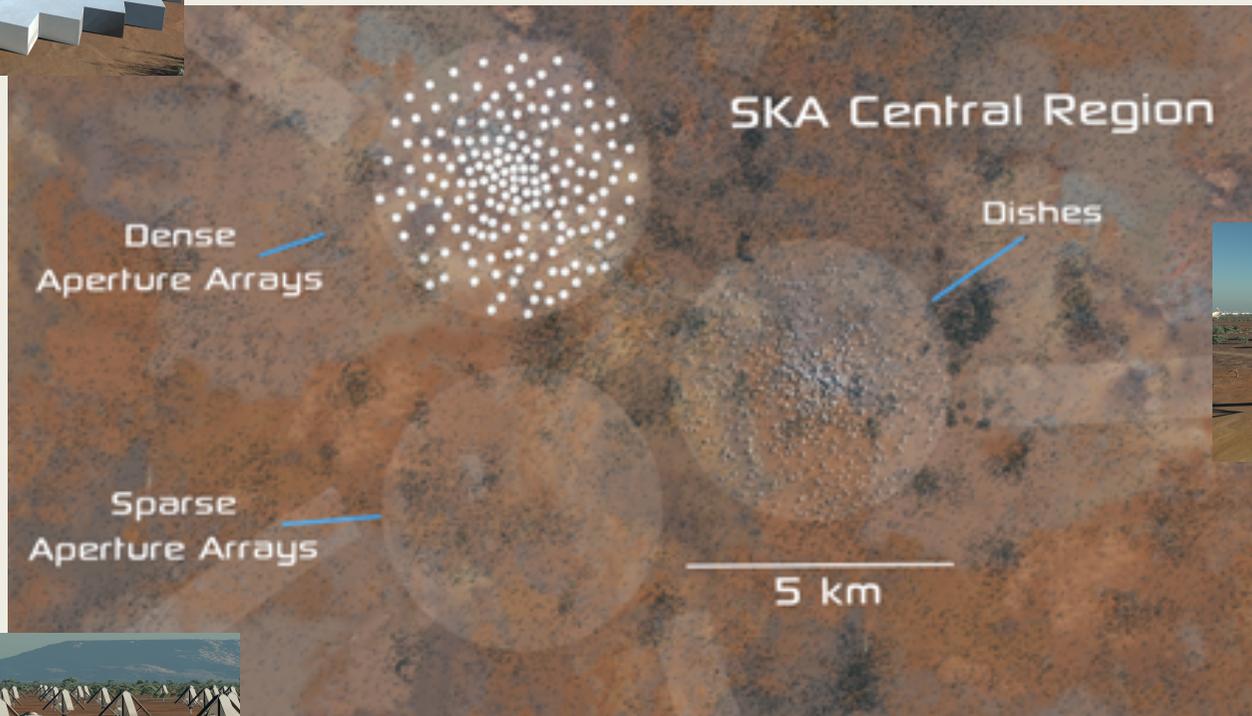
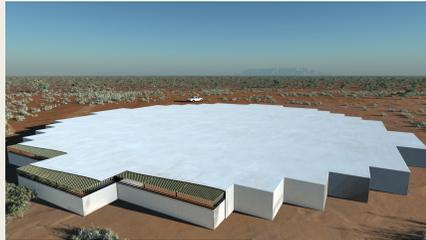
# Australia: SKA-low + SKA-sur

ASKAP – 36 antenne



MWA (80-300 MHz)

# Stazione di antenne



# Un po' di numeri

- L'area totale equivale a 150 campi da calcio o 4000 campi da tennis
- 20 stati\* hanno investito soldi: 120 M Eur per finanziare ca. 500 scienziati e tecnologi per progettare SKA.
- Marzo 2014: il Regno Unito impegna £100M per la costruzione di SKA. Questo si somma alle centinaia di milioni di Euro del contributo dei paesi ospiti, Australia e Sud Africa, per la costruzione dei precursori di SKA: ASKAP, MWA e MeerKAT.

\*tra cui Germania, Giappone, Portogallo

# Tappe del progetto

- 1991 Prima idea
- 2008-2012 Progetto e bilancio. (1500MEur?)
- 2012 Decisione sul sito: Sud Africa + Australia/NZ
- 2013-2015 Progetto dettagliato e tecnologia di produzione

## SKA1 (650 MEu) Timeline:

- *Design & IGO: Q1-2 2019*
- *Construction begins: Q4 2020*
- *Commmissioning/SV starts: 2022/2024*
- *Full Operations: 2027*

Courtesy Isabella Prandoni





The International Radio Telescope for the 21st Century



## Dish - Milestones



**Swedish receiver to catch cosmic waves  
in the world's largest radio telescope**

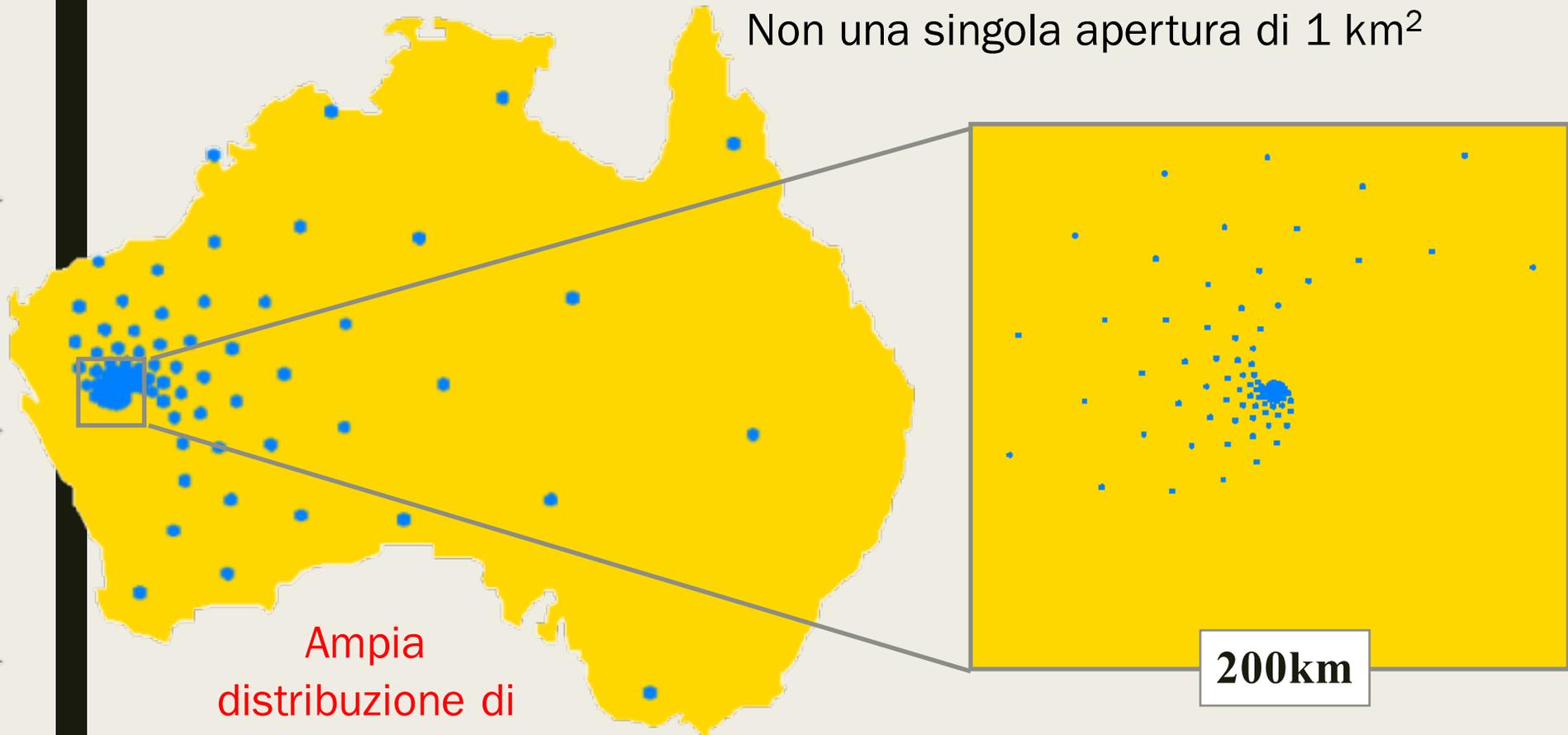
SKA Prototype Dish Assembled For The  
First Time

Across 18 Time Zones: A Global Effort To  
Deliver A Dish Prototype



# Un esempio della configurazione di SKA

Non una singola apertura di 1 km<sup>2</sup>

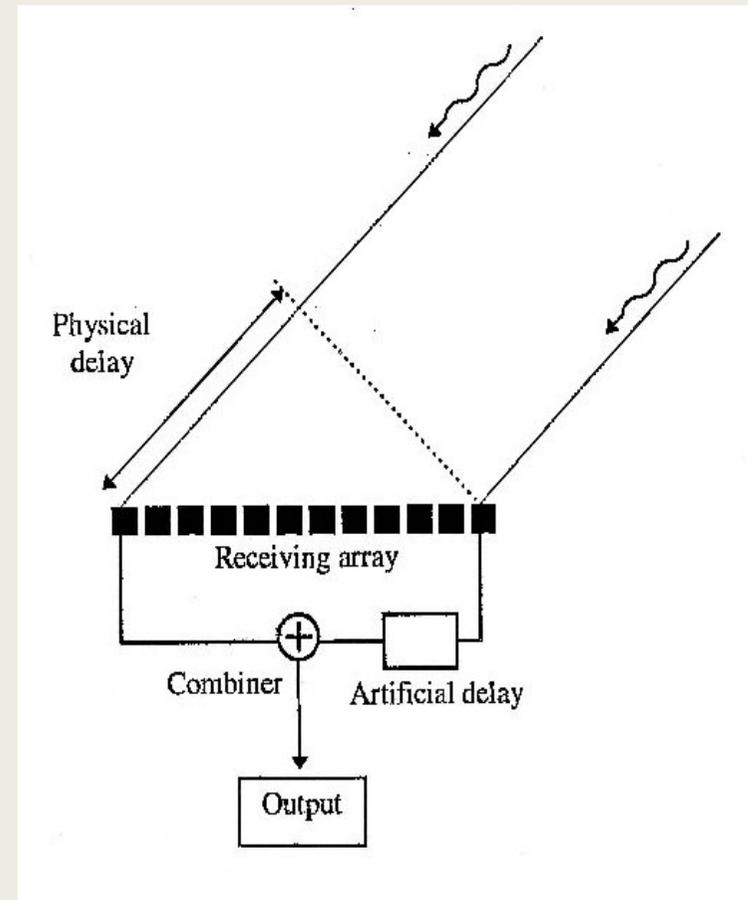
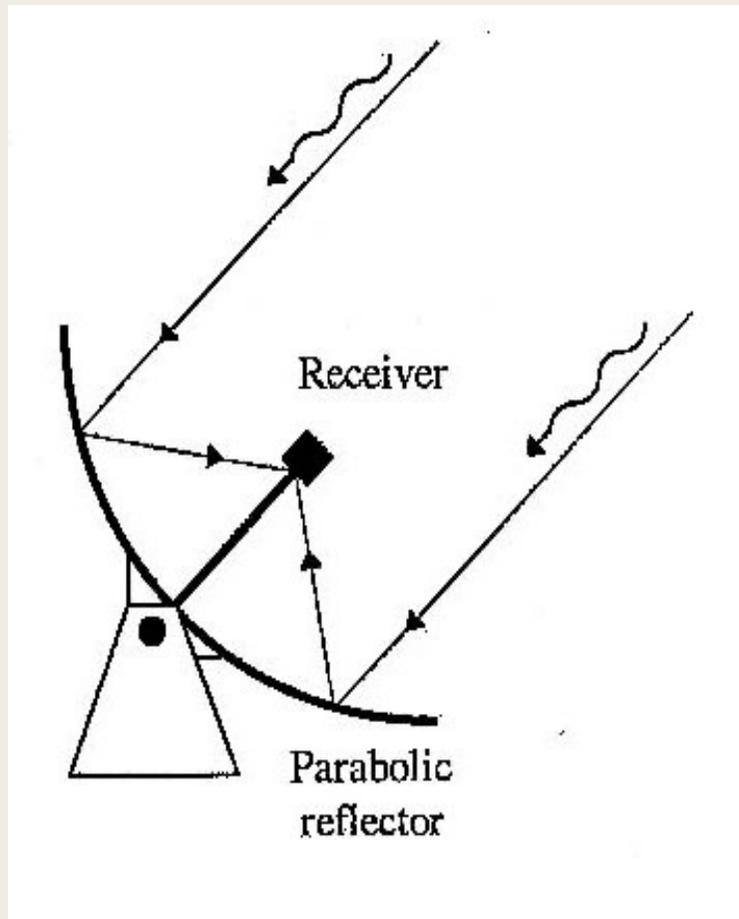


Ampia  
distribuzione di  
distanze tra le  
antenne

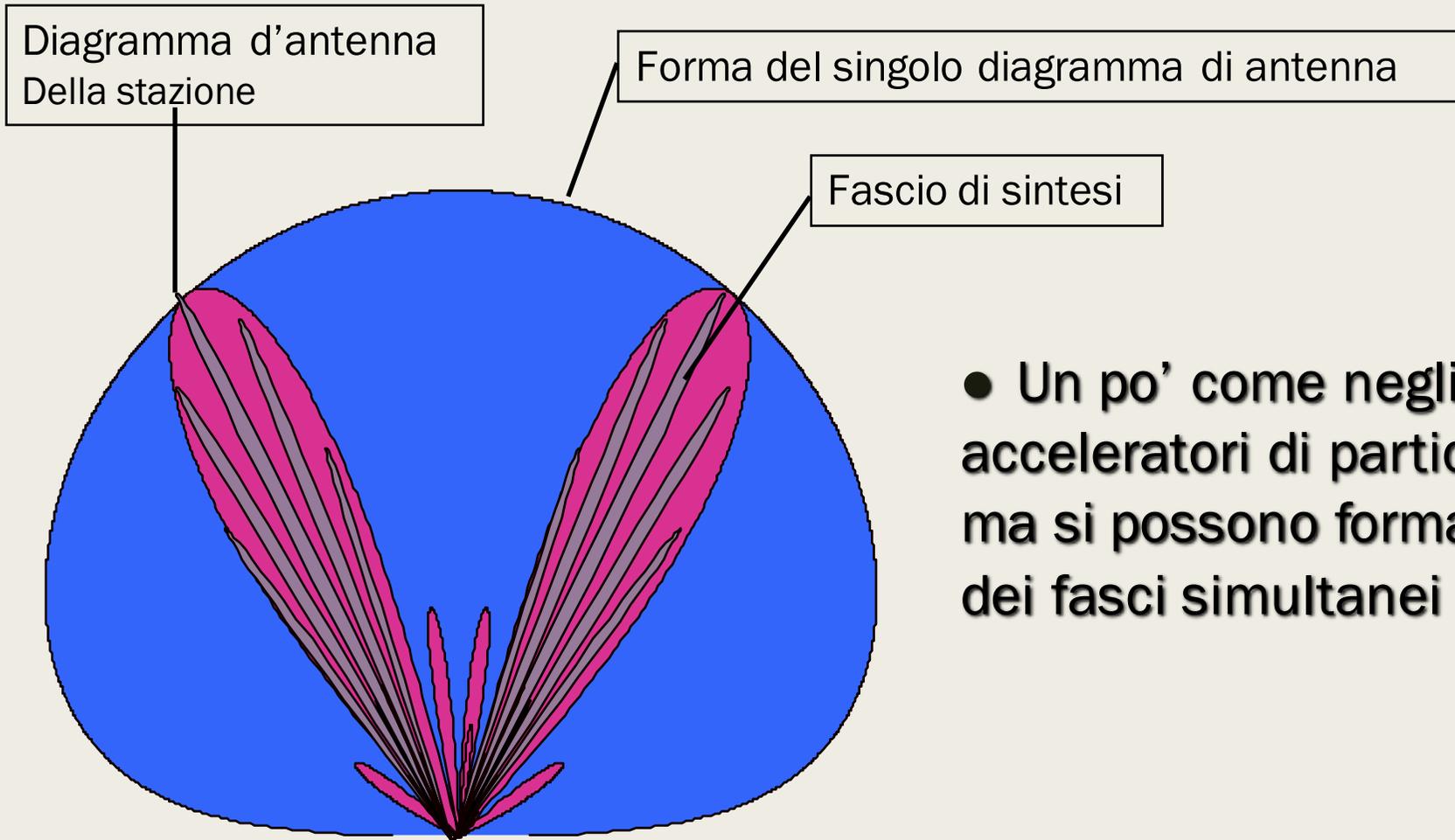
200km

# Concetto del Phased array

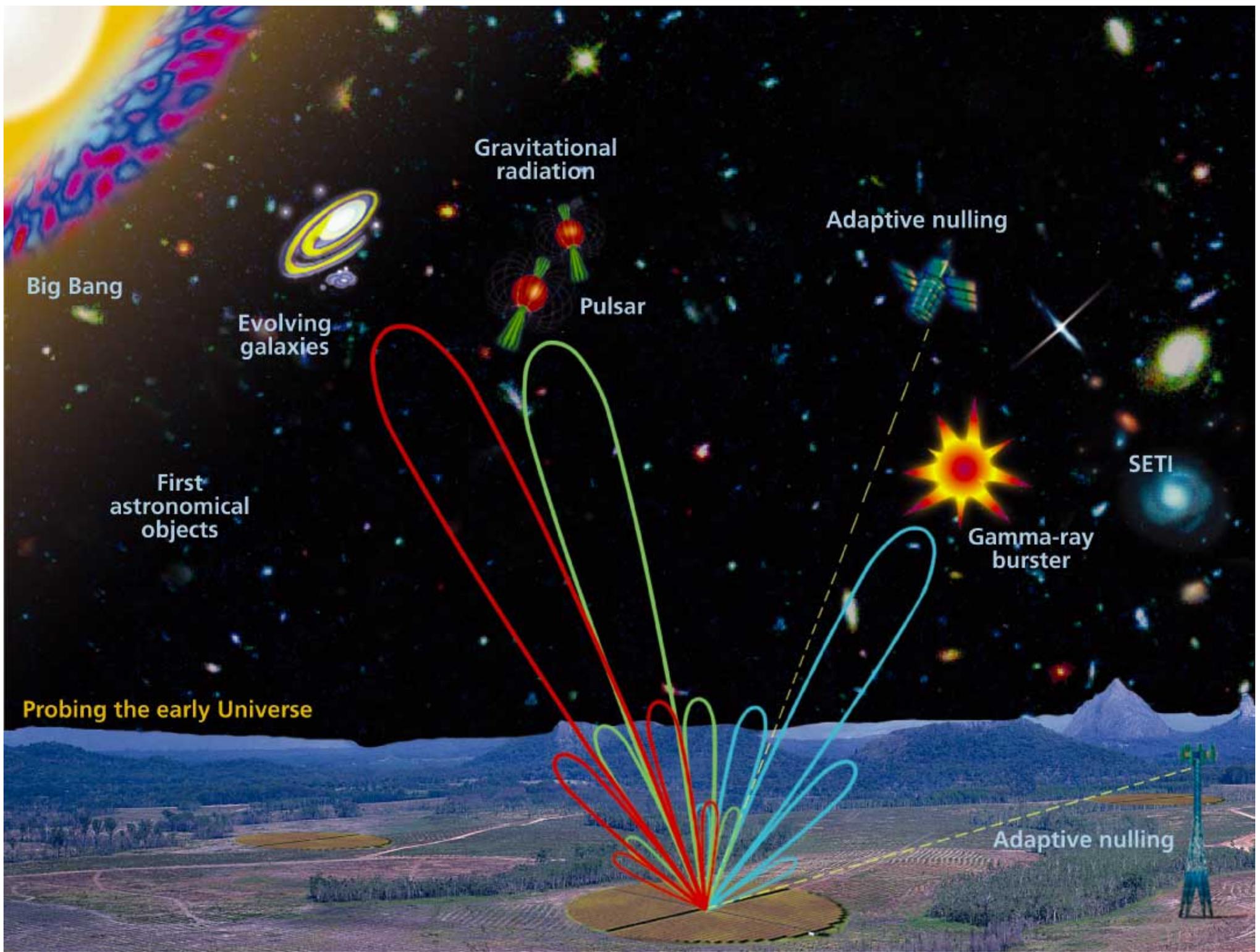
Idea di base: sostituire puntamento meccanico pointing con la formazione del fascio in modo elettronico



# Costruire diversi fasci d'antenna



- Un po' come negli acceleratori di particelle, ma si possono formare dei fasci simultanei



Big Bang

Evolving galaxies

Gravitational radiation

Pulsar

Adaptive nulling

SETI

Gamma-ray burster

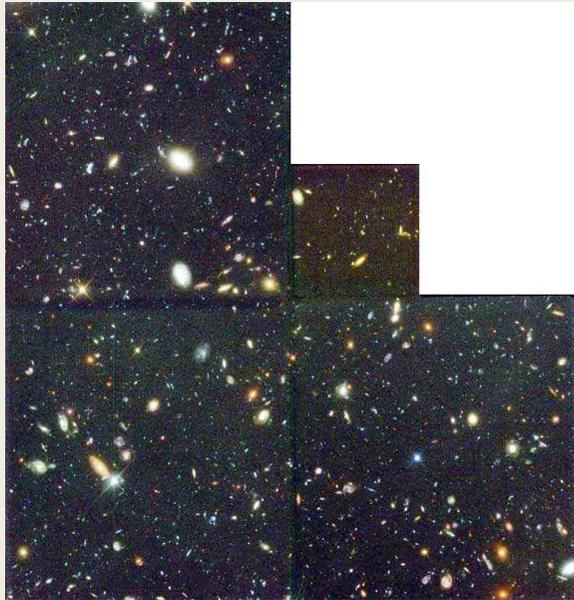
First astronomical objects

Probing the early Universe

Adaptive nulling

# Sensibilità prevista

Hubble Deep Field

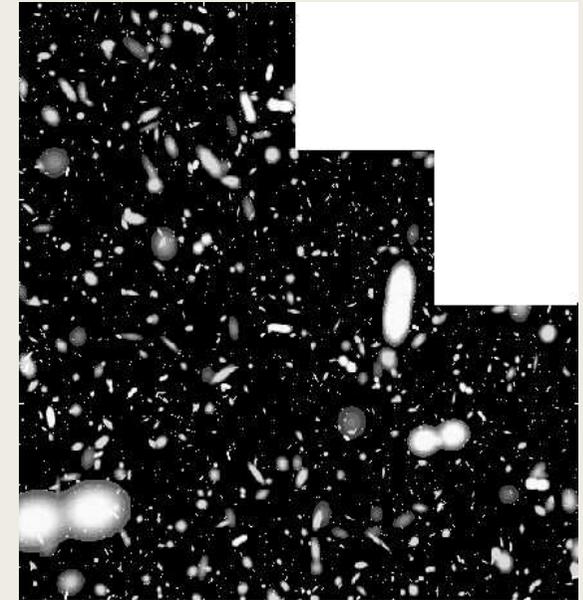


VLA



50 ore a 8.7 GHz  
6 sorgenti a  $>12 \mu\text{Jy}$

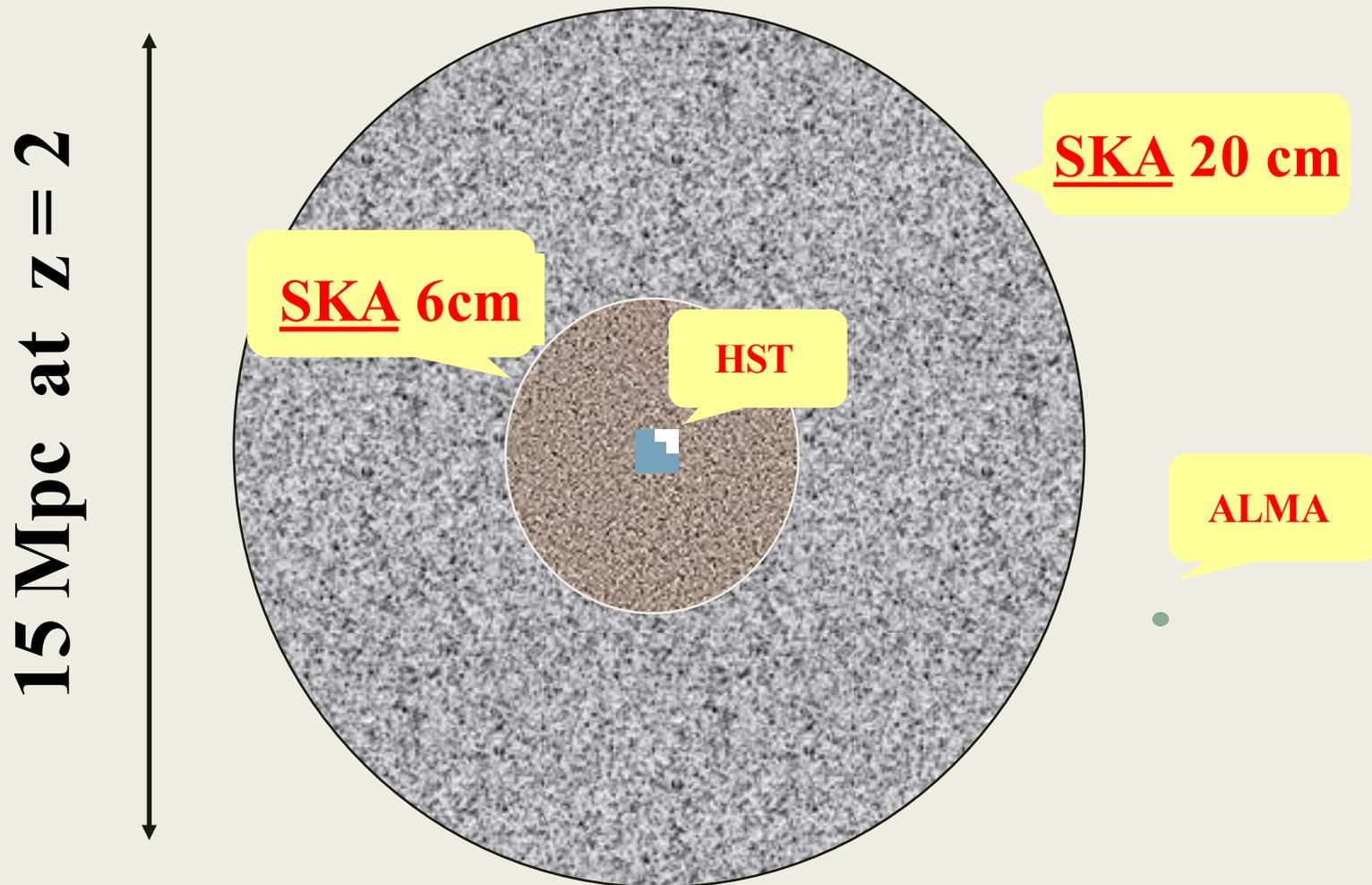
Simulated SKA



Sensibilità  $1 \mu\text{Jy}$   
a 1.4 GHz  
(e questo è solo un piccolo pezzo  
dell'intero campo di vista)

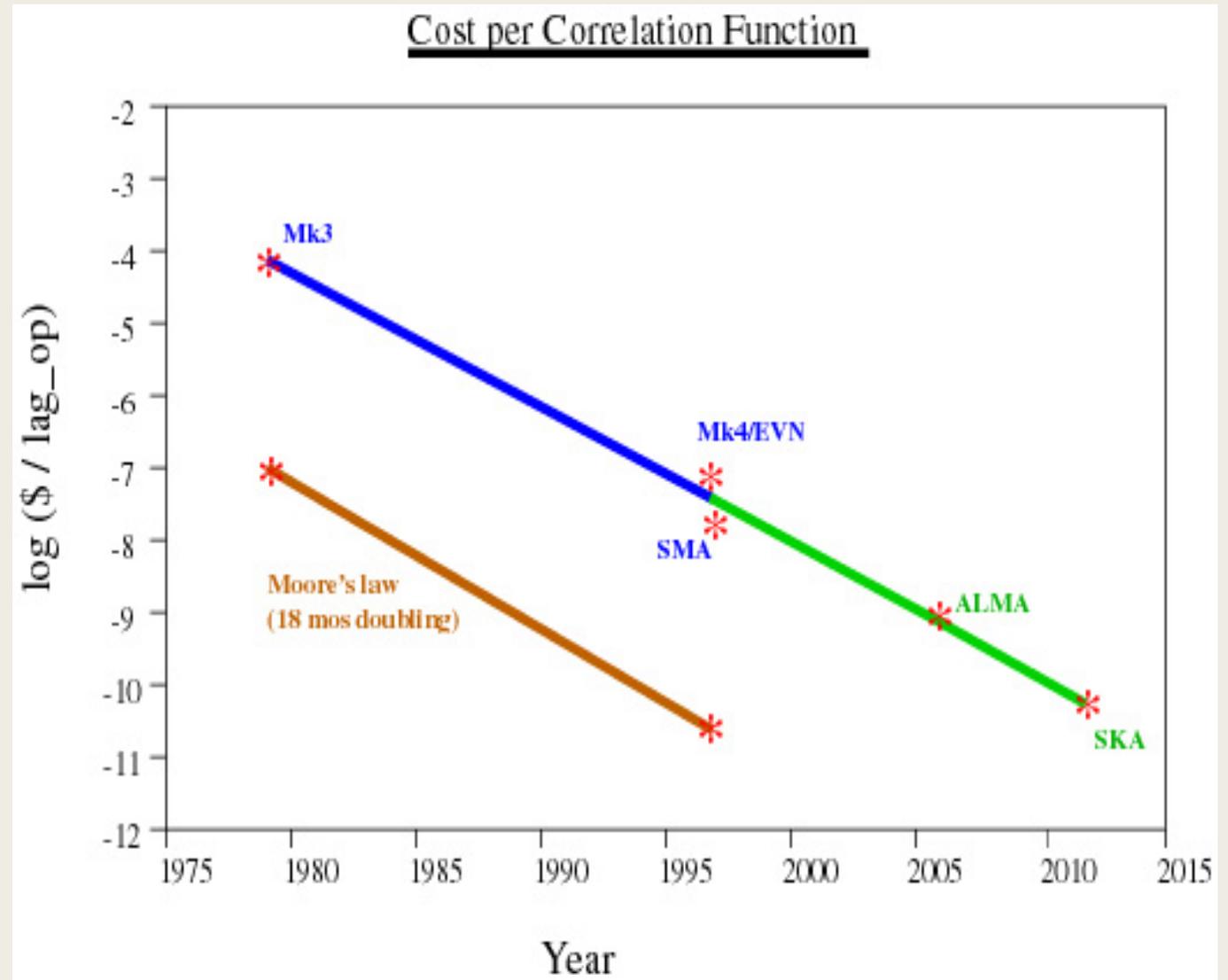
# SKA: 1° campo di vista a $\lambda = 20\text{cm}$

Ottimo per le survey e gli eventi rari in  $10^6$  galassie !



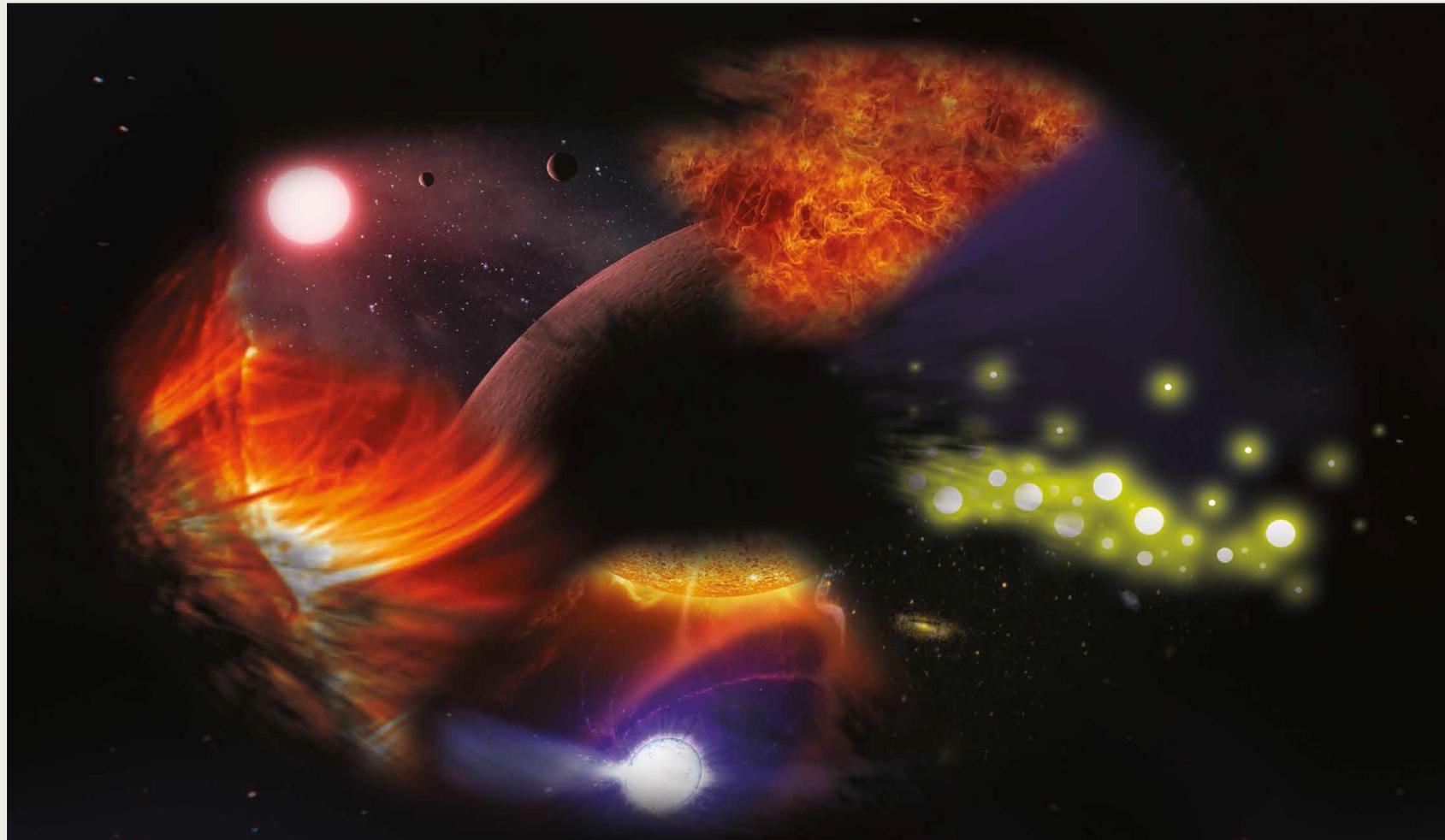
# No Correlator if Moore is Wrong

- Capacity
  - >1000 stns
  - Spectral-lines
  - Multiple beams
  - Sub-arrays
- Cost
  - \$75 M in 2011
  - 1 GHz clock
- XF design
- Not feasible today



Formation and Evolution of Galaxies • The Dawn of Galaxies: Searching for the Epoch of First Light • 21-cm Emission and Absorption Mechanisms • Preheating the IGM • **SKA Imaging of Cosmological HI** • Large Scale Structure and Galaxy Evolution • A Deep SKA HI Pencil Beam Survey • Large scale structure studies from a shallow, wide area survey • The Ly- $\alpha$  forest seen in the 21-cm HI line • **High Redshift CO** • Deep Continuum Fields • Extragalactic Radio Sources • The SubmicroJansky Sky • Probing Dark Matter with **Gravitational Lensing** • Activity in Galactic Nuclei • The SKA and Active Galactic Nuclei • Sensitivity of the SKA in VLBI Arrays • Circum-nuclear MegaMasers • H<sub>2</sub>O megamasers • OH Megamasers • Formaldehyde Megamasers • The **Starburst** Phenomenon • **Interstellar Processes** • HII Regions: High Resolution Imaging of Thermal Emission • Centimetre Wavelength Molecular Probes of the ISM • **Supernova Remnants** • The Origin of Cosmic Rays • Interstellar Plasma Turbulence • Recombination Lines • Magnetic Fields • Rotation Measure Synthesis • Polarization Studies of the Interstellar Medium in the Galaxy and in Nearby External Galaxies • Formation and Evolution of Stars • Continuum Radio Emission from Stars • Imaging the **Surfaces of Stars** • Red Giants and Supergiant Stars • Star Formation • Protostellar Cores • Protostellar Jets • Uncovering the Evolutionary Sequence • Magnetic Fields in Protostellar Objects • Cool Star Astronomy • The Radio **Sun** • Observing Solar Analogs at Radio Wavelengths • Where are the many other Radio Suns? • Flares and Microflares • X-ray Binaries • Relativistic Electrons from X-ray Transients • The Faint Persistent Population • Imaging of Circumstellar Phenomena • Stellar Astrometry • Supernovae • Radio **Supernovae** • The Radio After-Glows of **Gamma-ray Bursts** • Pulsars • Pulsar Searches • **Pulsar Timing** • Radio Pulsar Timing and General Relativity • Solar System Science • Thermal Emission from Small Solar System Bodies • Asteroids • Planetary Satellites • **Kuiper Belt Objects** • Radar Imaging of Near Earth Asteroids • The Atmosphere and Magnetosphere of Jupiter • Comet Studies • Solar Radar • Coronal Scattering • Formation and Evolution of Life • Detection of **Extrasolar Planets** • Pre-Biotic Interstellar Chemistry • The Search for **Extraterrestrial Intelligence**

# Scienza con SKA



# Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array

9-13 June 2014, Giardini Naxos, Italy

# SKA– Key Science Drivers: The history of the Universe

Testing General Relativity  
(Strong Regime, Gravitational Waves)

Cosmic Dawn  
(First Stars and Galaxies)

Cradle of Life  
(Planets, Molecules, SETI)

Galaxy Evolution  
(Normal Galaxies  $z \sim 2-3$ )

Cosmic Magnetism  
(Origin, Evolution)

Cosmology  
(Dark Matter, Large Scale Structure)

Exploration of the Unknown

**Broadest science range of any facility on or off the Earth (Braun et al. 2015)**

# Principali domande dell'astrofisica moderna

Storia Universo, ~13.7 miliardi anni

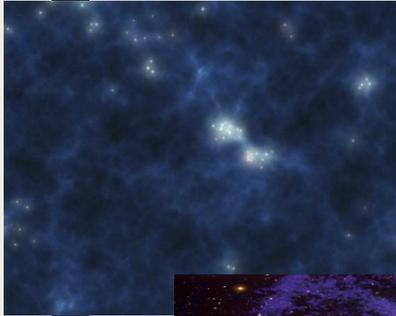
Come si sono formati i corpi celesti e i campi magnetici

Materia oscura ed energia oscura

Leggi della Fisica in condizioni estreme :  
buchi neri, pulsars

Pianeti extrasolari e origine della vita

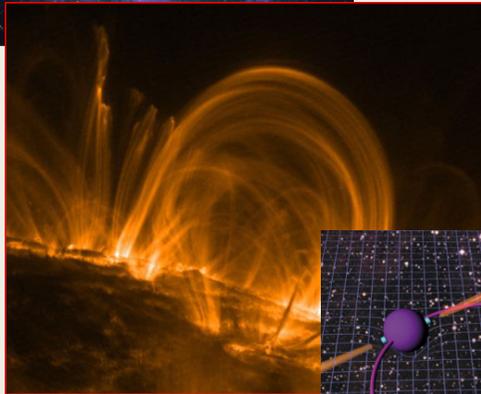
# I casi scientifici



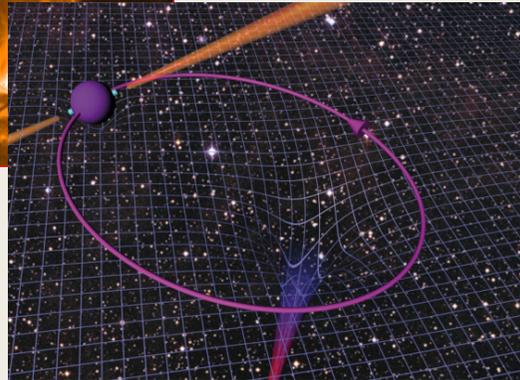
Le prime stelle



Evoluzione Cosmica



Magnetismo Cosmico



Gravità



Origini della vita

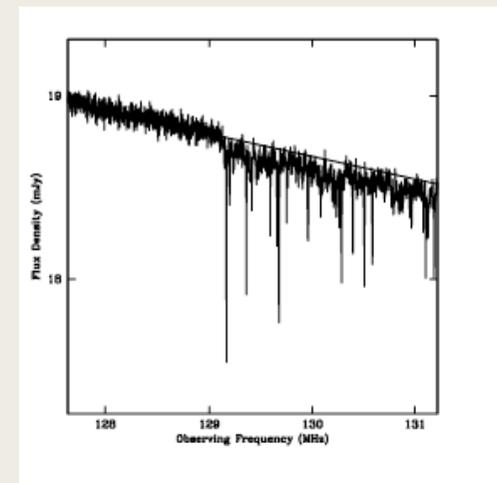
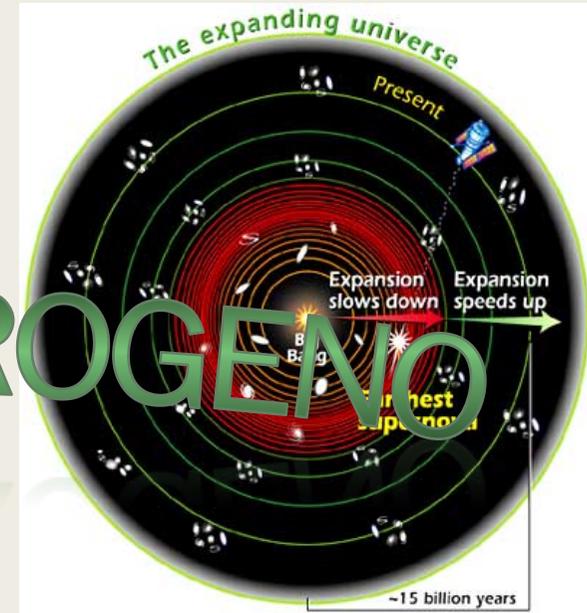
# L'alba cosmica

13.7 Miliardi di anni fa

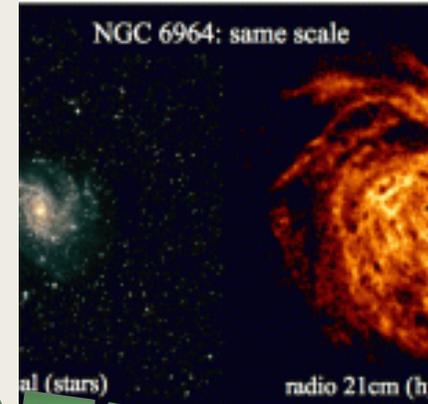


## TELESCOPIO IDROGENO

- Osservazioni “tomografiche” dell'emissione di HI durante l'epoca di re-ionizzazione (da materiale neutro a grumi ionizzati di materia -> stelle) mappe 3D
- Foresta a 21-cm (piccole sovradensità di HI nella direzione di sorgenti primordiali brillanti)



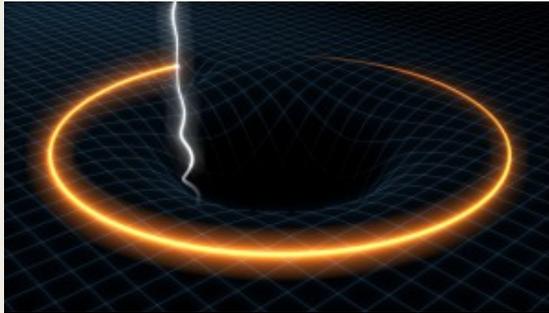
# Evoluzione cosmologica- Energia Oscura



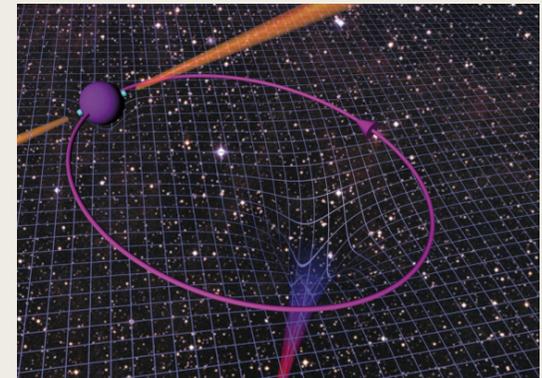
## TELESCOPIO IDROGENO

- Emissione a 21 cm: traccia la massa – sonda cosmologica
- Componente barionica primaria dell'Universo
- Formazione & evoluzione delle galassie
- “Survey di un Miliardo di Galassie”
- Energia oscura: distorsione della distribuzione dei redshift e lenti gravitazionali
- Distribuzione di HI ad alto  $z$  per seguire l'accumularsi di gas alle diverse epoche

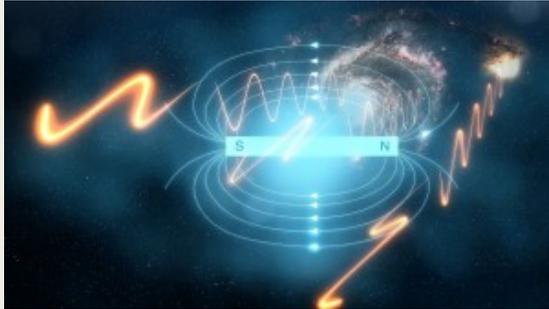
# Test della gravità con campi forti (pulsars & BHs)



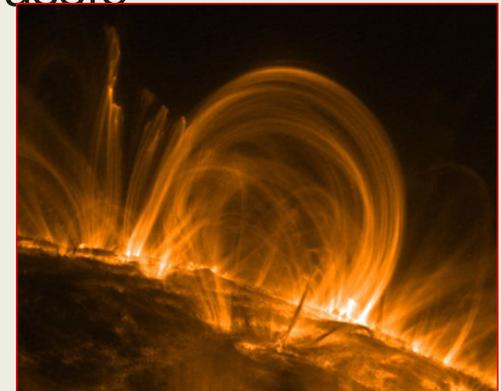
- Einstein aveva ragione? (GR e QM predicono lo stesso Universo nel caso di campi gravitazionali forti?)
- Test: una pulsar in orbita intorno a un buco nero
- PTA per rivelare onde gravitazionali



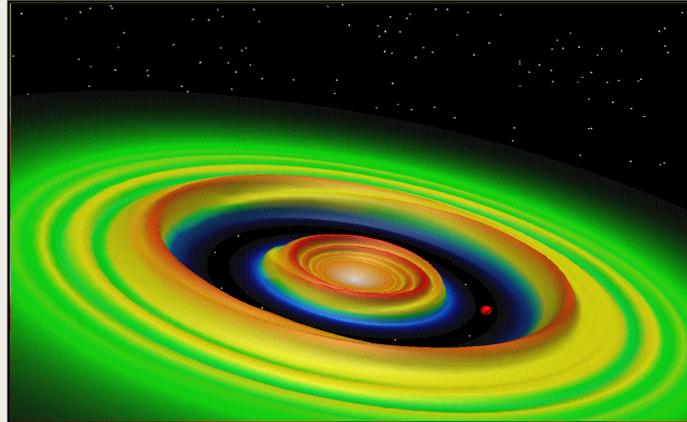
# Origine & evoluzione del magnetismo cosmico



- I campi magnetici sono ovunque (intensità varia di  $10^{18}$  )
- Rotazione Faraday delle radiogalassie di fondo
- Mappa 3D del campo magnetico nella Via Lattea
- Effetto globale della polarizzazione in altre galassie
- RM  $10^3$  meglio del JVLA
- Origine di B - evoluzione
- B in IGM?



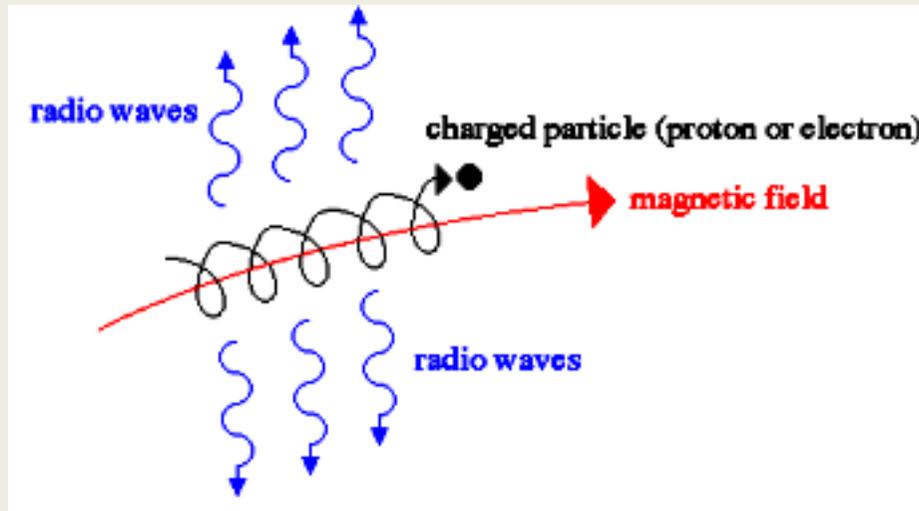
# Culla della vita – ricerca di vita & pianeti



- Vita su altri mondi?
- I pianeti non mancano
- Ricerca nella “zona abitabile” di protostelle simili al Sole (emissione termica dalla polvere)
- Meccanismo di formazione dei pianeti giganti (cavità nei dischi protoplanetari)
- “super”-SETI: vedere la TV da pianeti vicini; il radar di un aeroporto sarà visibile fino a 50 anni luce da noi!

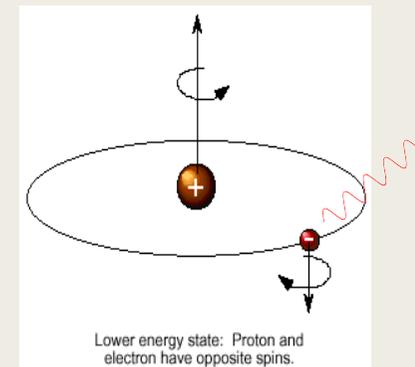
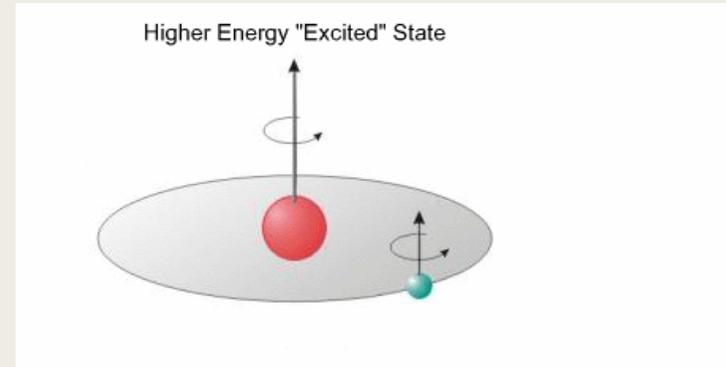
# Onde radio in natura

Fenomeni NON TERMICI



SINCROTRONE

Campi magnetici  $\sim \mu\text{G}$



Idrogeno H

# PROBLEMI E SCELTE



# Decisioni da prendere

Pochi ←  $N_{\text{elementi}}$  → Molti

\$ ← Costo/Elemento → \$\$\$\$\$

Piccolo ← Campo di Vista → Grande  
(Fascio Primario)

Larghezza di Banda vs.  $N_{\text{fasci}}$

# Quanti elementi?

## Punti chiave

- La stessa area di raccolta con tante antenne piccole costa meno che una grande (costo  $\propto D^{2.7}$ )
- Numero di elementi  $N$  più grande implica più rivelatori, più fibre e un correlatore più capace
- $N$  più grande permette più linee di base, miglior copertura del piano  $u-v$  (immagini più dettagliate)
- Antenne piccole hanno un campo di vista primario **più grande** (ma osservazioni/calibrazioni sono più complesse a  $\lambda$  piccolo)

# Software

- Servono processori da 100 petaflops/sec, ~ 50 volte più potenti del più potente supercomputer del 2010; equivalente a circa **un miliardo di** PC (in tempo reale)
- Servono nuovi modi di analizzare i dati
- È necessario archiviare i dati in modo “furbo”
- Vengono prodotti  $10^{15}$  bit/sec (petabits) di dati

# Problemi di calcolo

- $N(N-1)/2 =$  milioni
- $N(N-1)/2 \times$  numero di canali = miliardi
- $>1$  GHz larghezza di banda
- Connessione
  - *Fibre dedicate?*
  - *Internet di nuova generazione?*
  - *Cablaggio tra correlatore e processore*
- Analisi Dati (Fondamentale)
  - *Calibrazione e produzione di immagini*
  - *Conservazione, sfruttamento*

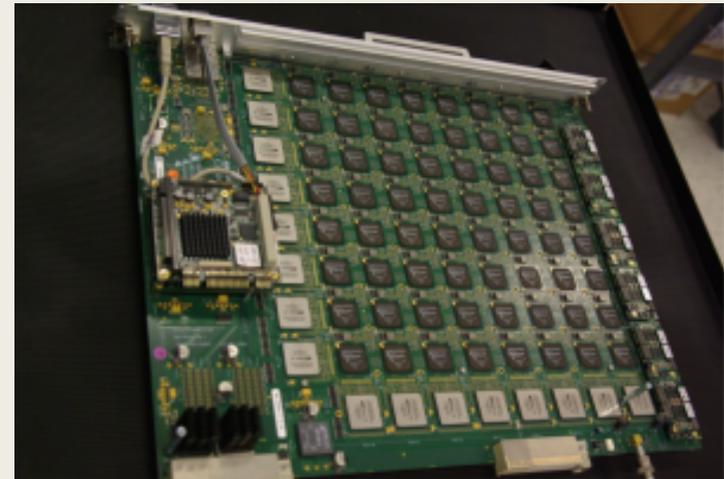
# Trasporto del segnale

- Tutti gli elementi di SKA sono connessi in fibra ottica tra loro e a un computer centrale di altissime prestazioni per: temporizzazione e sincronizzazione, monitoraggio e controllo, trasmissione dati dai rivelatori al correlatore, connessione con il mondo esterno/utenti.
- La quantità di dati raccolta e da immagazzinare sarà enorme: ~ 160 Gigabit/sec di dati trasmessi da ogni antenna al processore centrale: **10 volte** il traffico attuale di Internet!
- Flusso di dati: 10-500 Tb/s  
n. di operazioni 200 Pflops – 2 Eflops  
dati processati 0.2 – 10 Pby/ giorno  
Totale ~100 Pb – 3 Eby/anno
- **>100 volte** il traffico di Internet per gli aperture array!

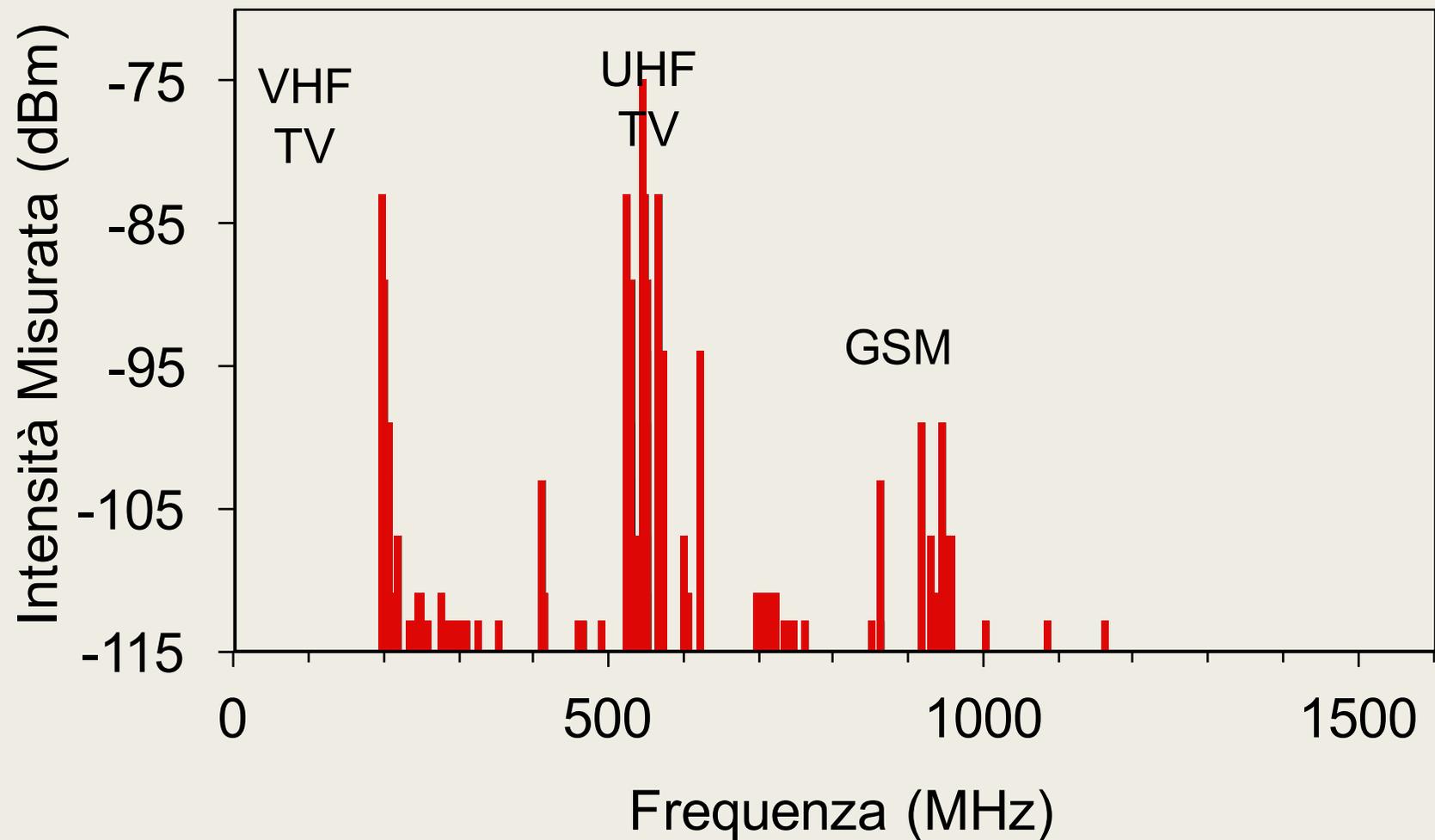
# Analisi del segnale

- Pre-Processamento
- Formazione del fascio di antenna
- Auto-rivelazione
- Sviluppo di Algoritmi
- Processamento

EVLA correlator board (ASICs)



# Interferenza a Molonglo 200-1500 MHz (Misurato 25 giugno 2001)

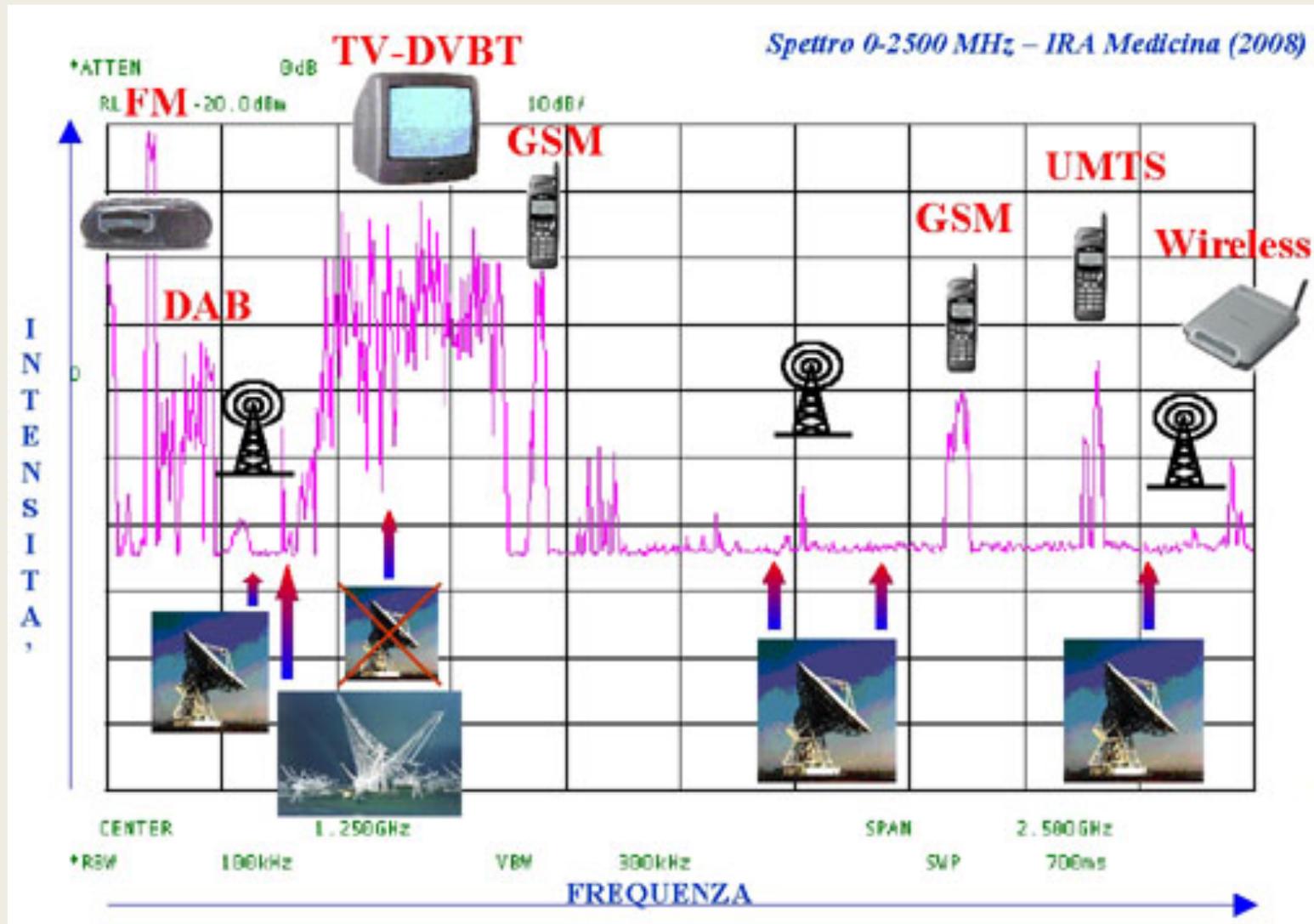


# Interferenza a Radio Frequenza

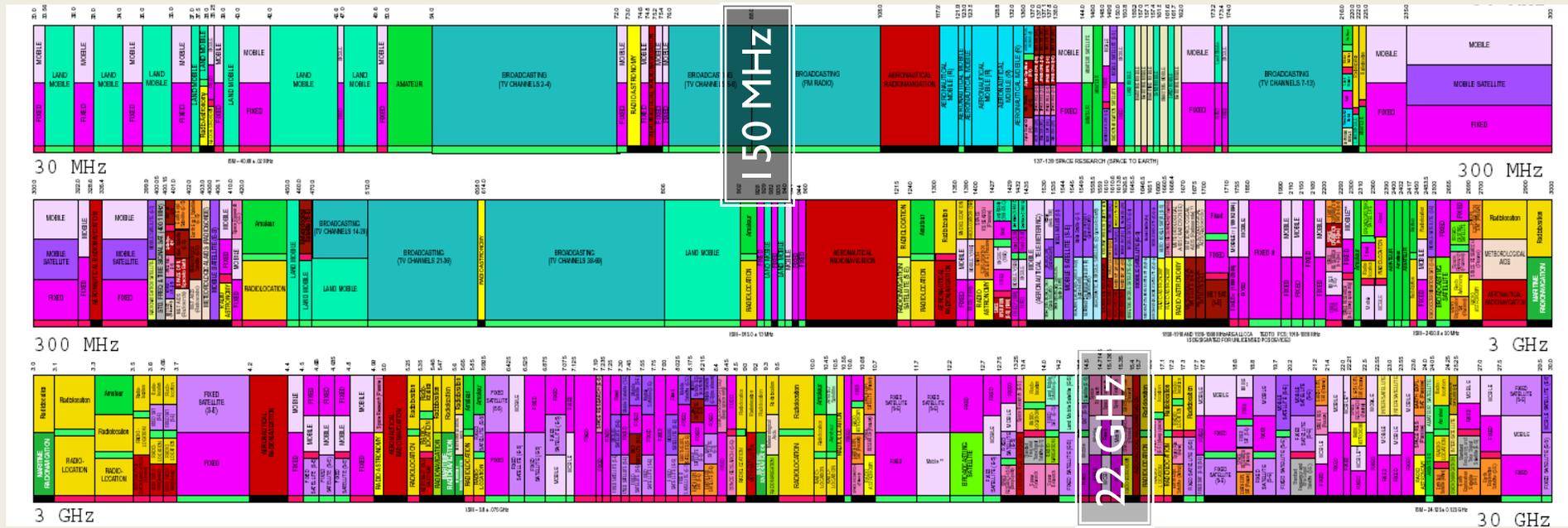
## ■ La sfida

- *La sensibilità aumenta (100x)*
- le regole correnti saranno non adeguate
- *Serve l'intero spettro radio*
- Solo il 2% dello spettro radio è riservato per la radioastronomia
- Per studiare l'Universo primordiale servirebbe osservare l'intero spettro, ma solo da alcuni punti d'osservazione
- *I satelliti per telecomunicazione LEO sono un nuovo pericolo*
- Nessun luogo della terra è libero da interferenze
- Gruppo di lavoro OECD per la radioastronomia

# Bande radio protette (2% del totale!)



# Eliminare le interferenze è fondamentale!



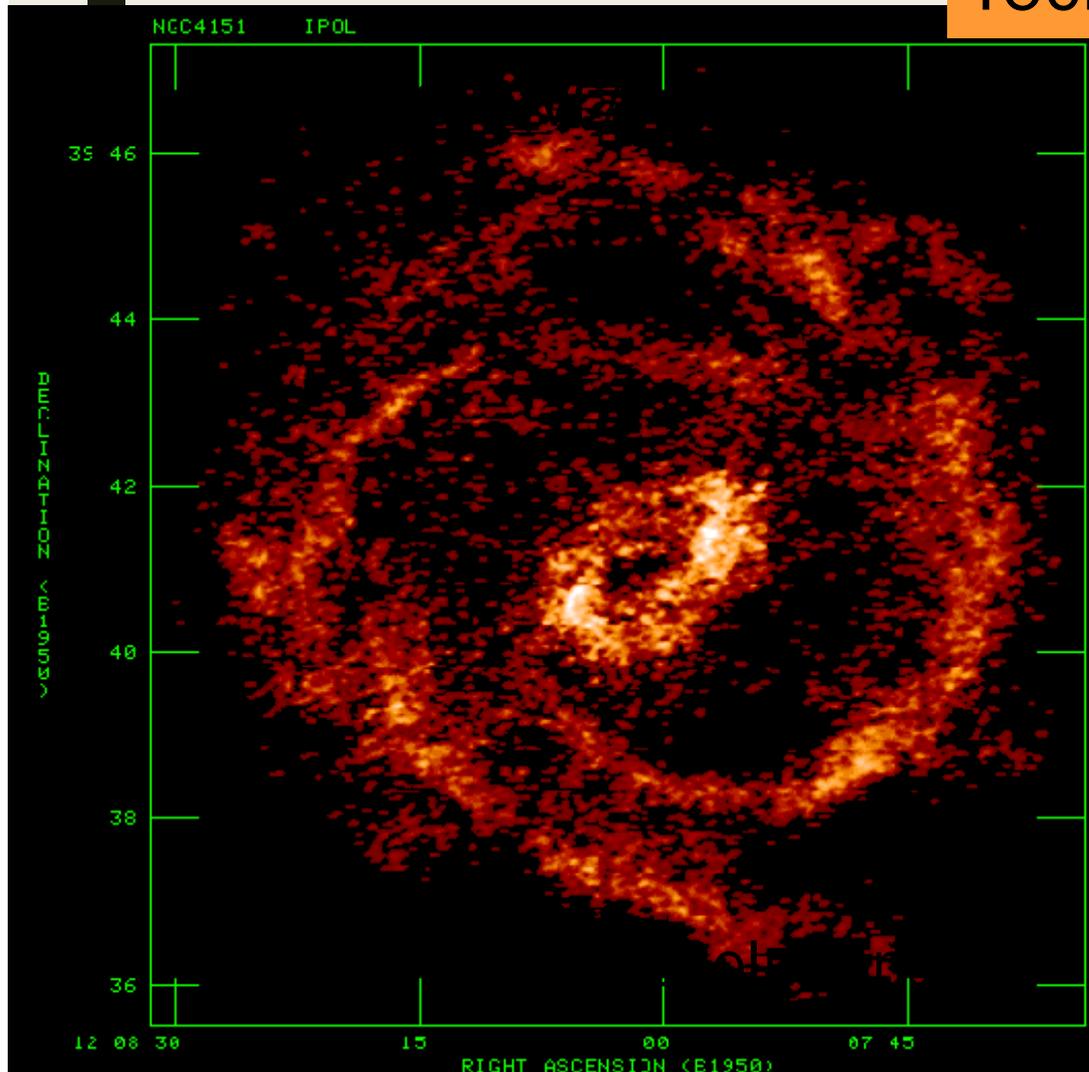
**Radioastronomia** = Bande "Radioastronomia"

# Aspettative

- Gli astronomi vogliono la miglior scienza possibile
  - *Attenzione a non focalizzarsi sulla scienza corrente – progetto flessibile*
- Governi vogliono aumentare investimenti, legami e prestigio internazionale
- Le industrie vogliono i contratti e la “cross fertilizzazione”

# Visione di SKA: immagini di galassie in HI con risoluzione $< 1''$

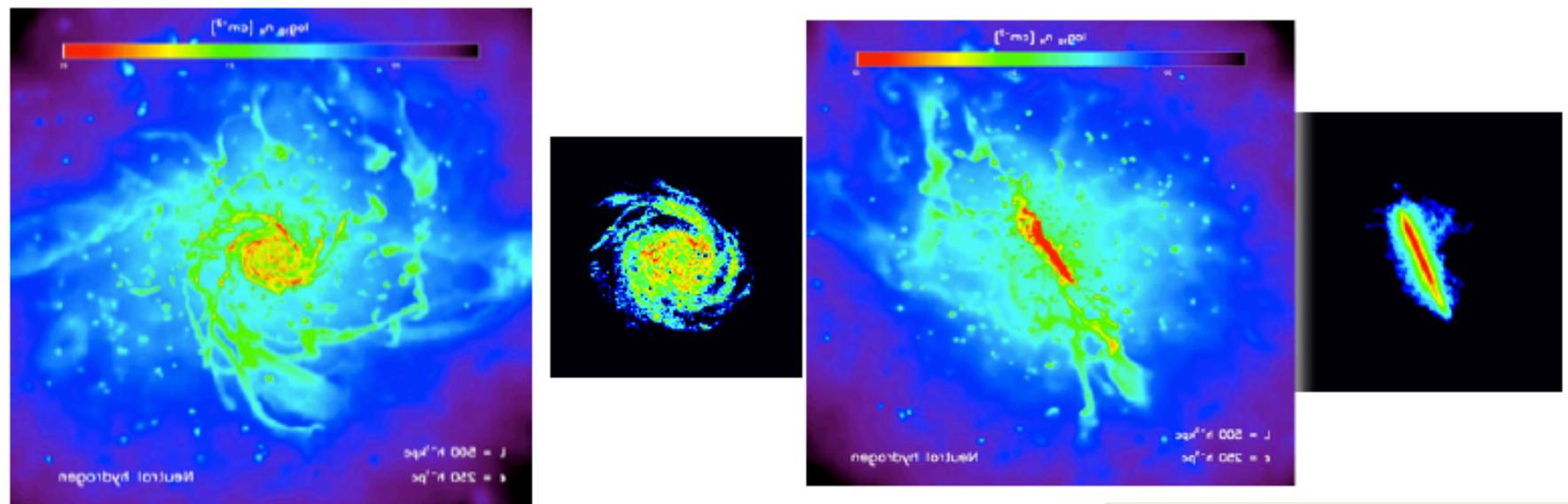
## Tecnologia avanzata di oggi



- $\sim 100x$  sensibilità del VLA
- $\sim 1$  sq km area di raccolta
- dinamica delle galassie locali in gran dettaglio
- Rivelare galassie ad alto  $z$  in HI e con l'emissione di sincrotrone

(Immagine da Mundell et al.)

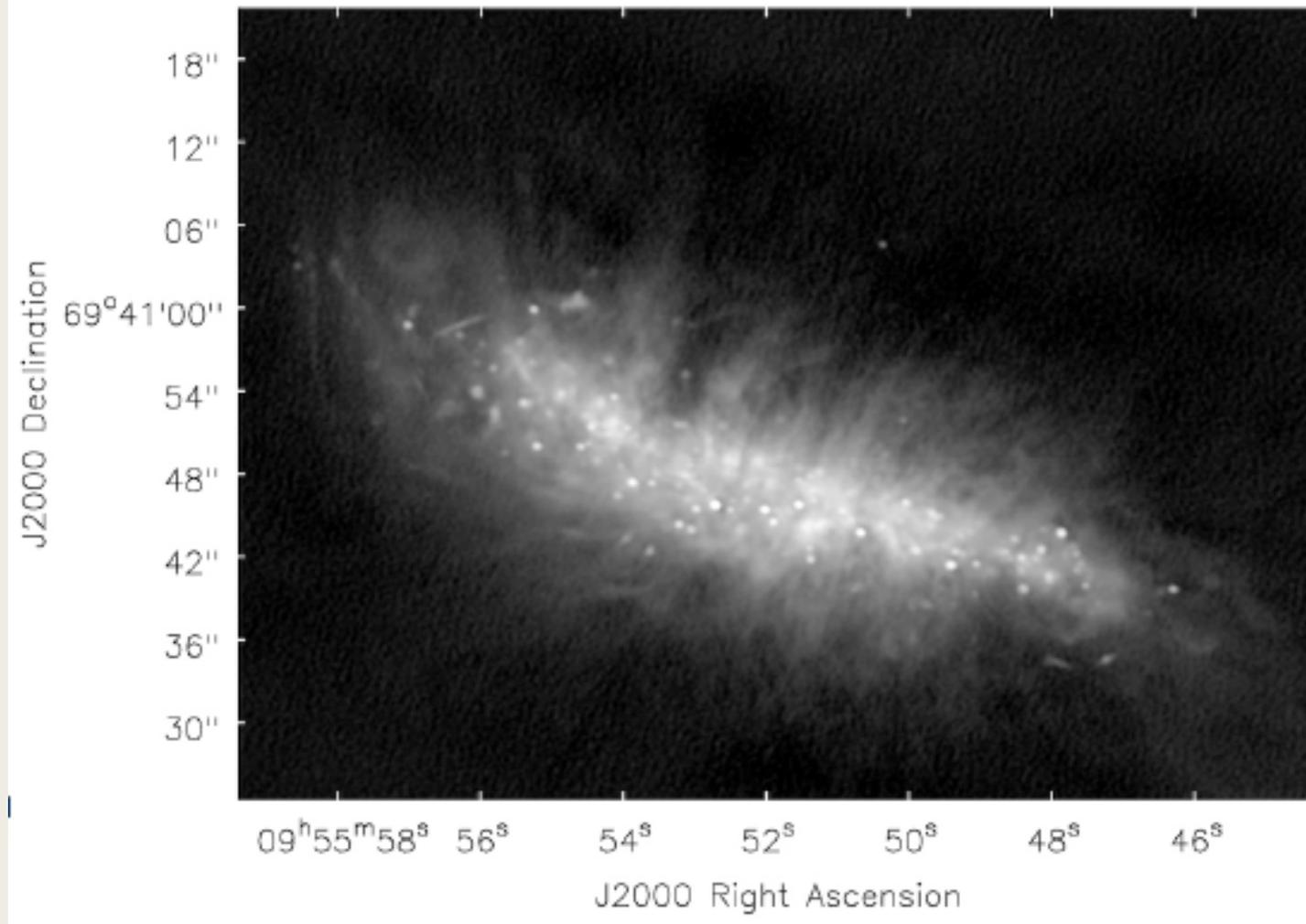
# Simulazioni



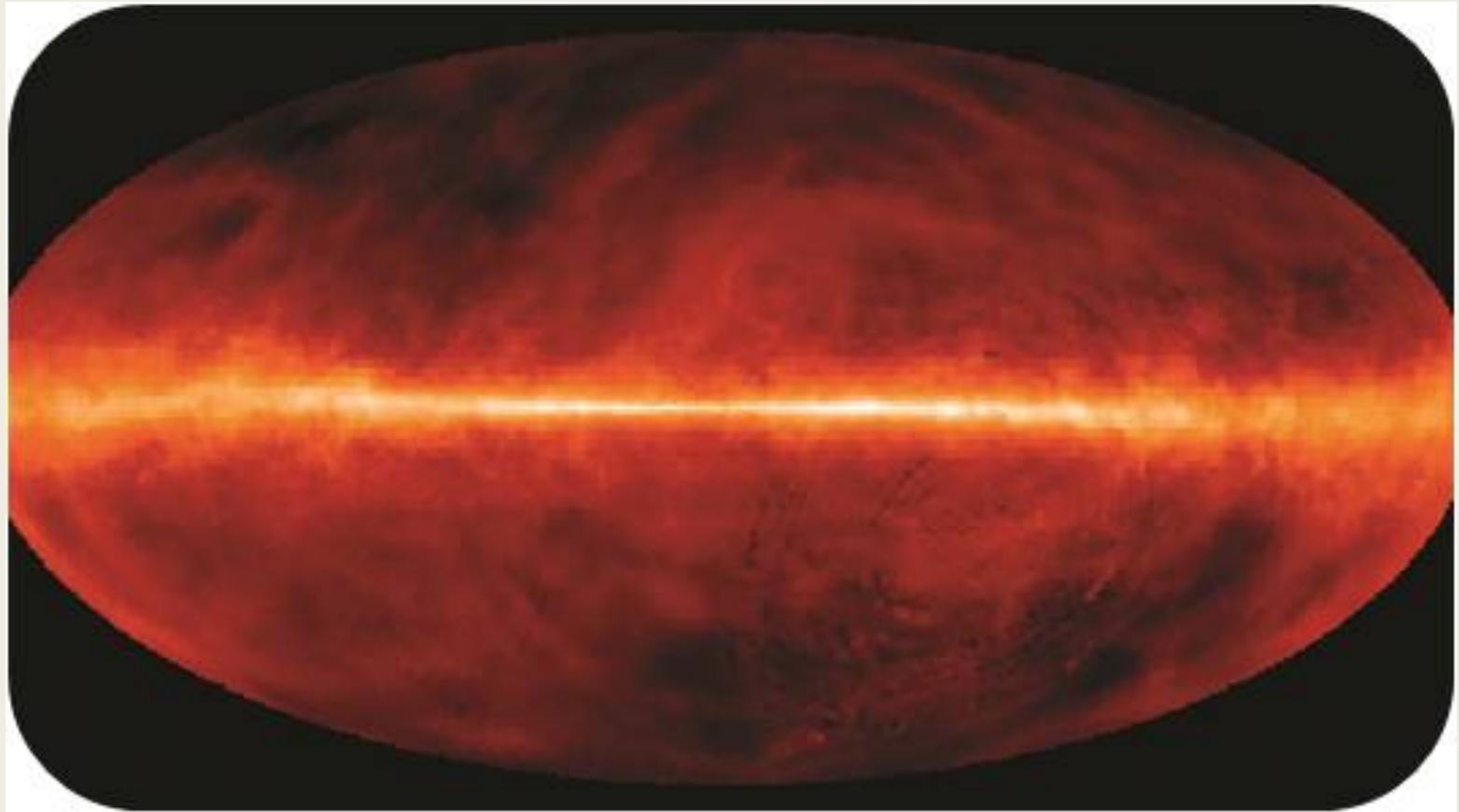
(Simulations: Schaye et al. 2010, Images: Oosterloo 2014)

# M82 – riusciremo a vedere così le prime galassie?

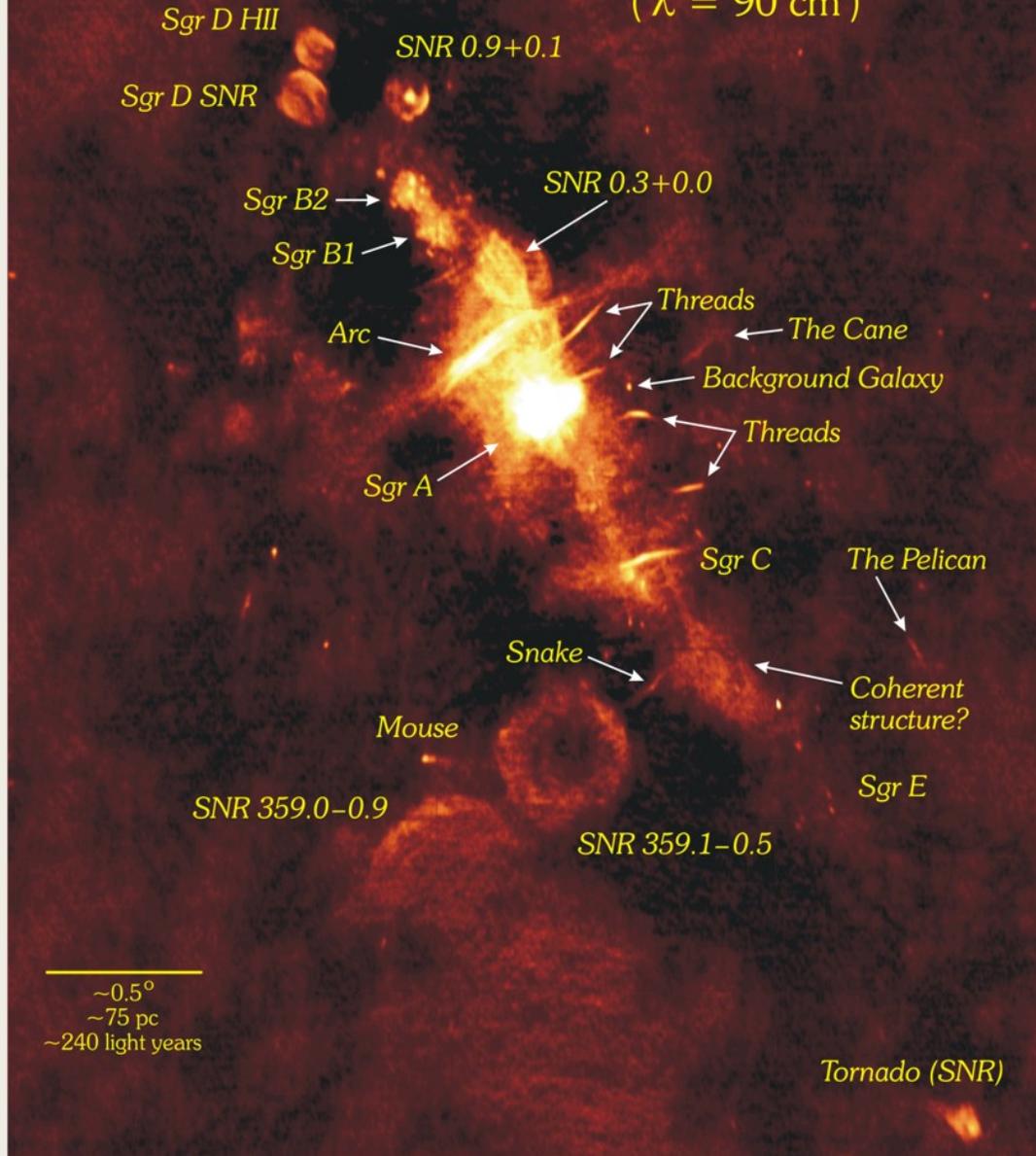
J. Marvel, Owen, Eilek



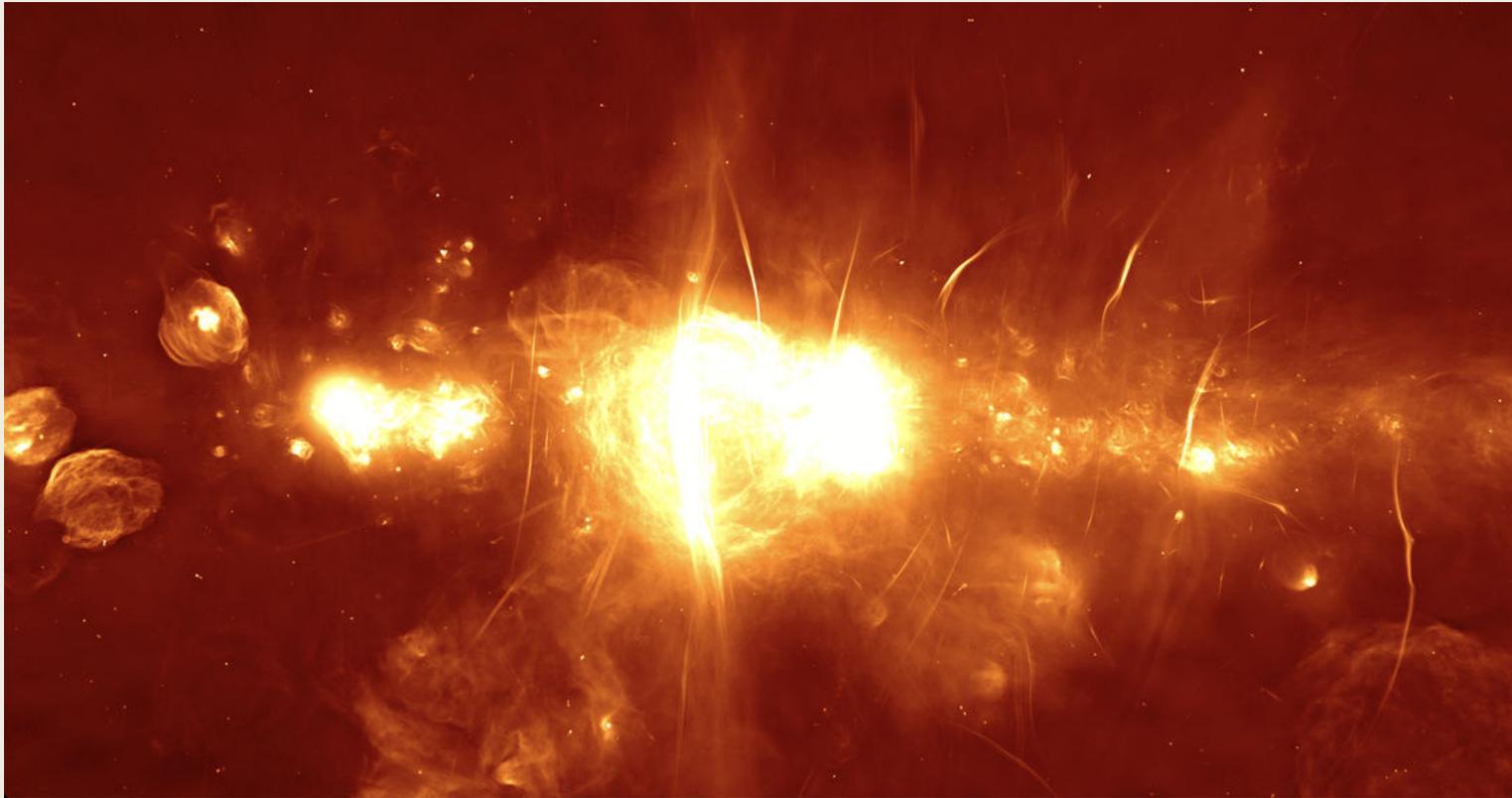
# La Via Lattea



Wide-Field VLA Radio Image  
of the Galactic Center  
( $\lambda = 90$  cm)

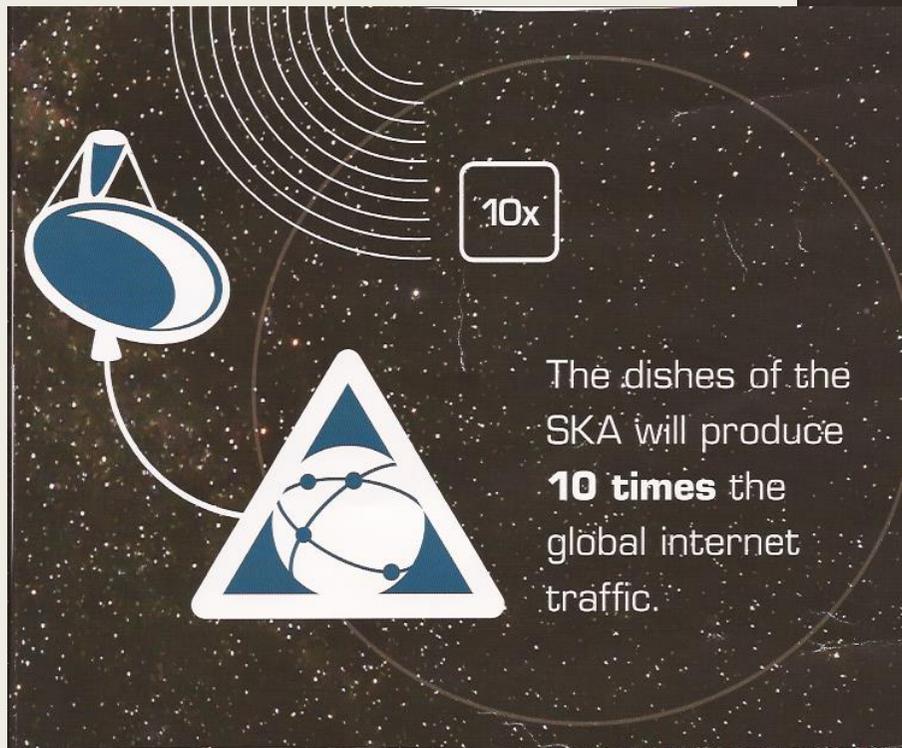


# Meerkat



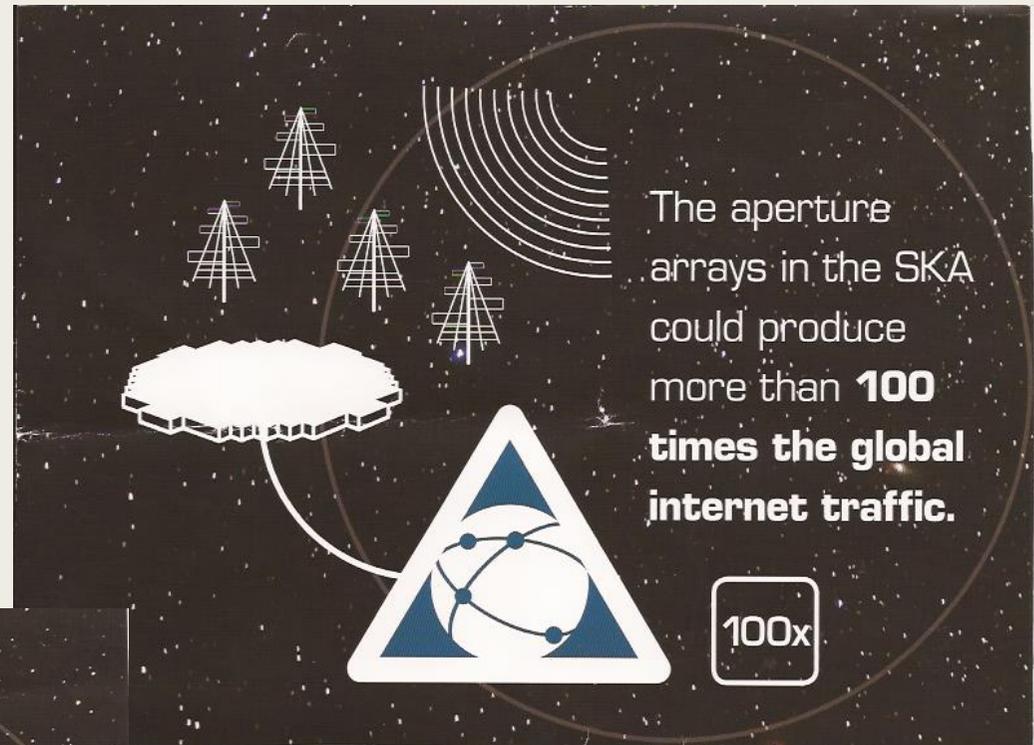
<http://skatelescope.org/>





The dishes of the SKA will produce **10 times** the global internet traffic.

10x



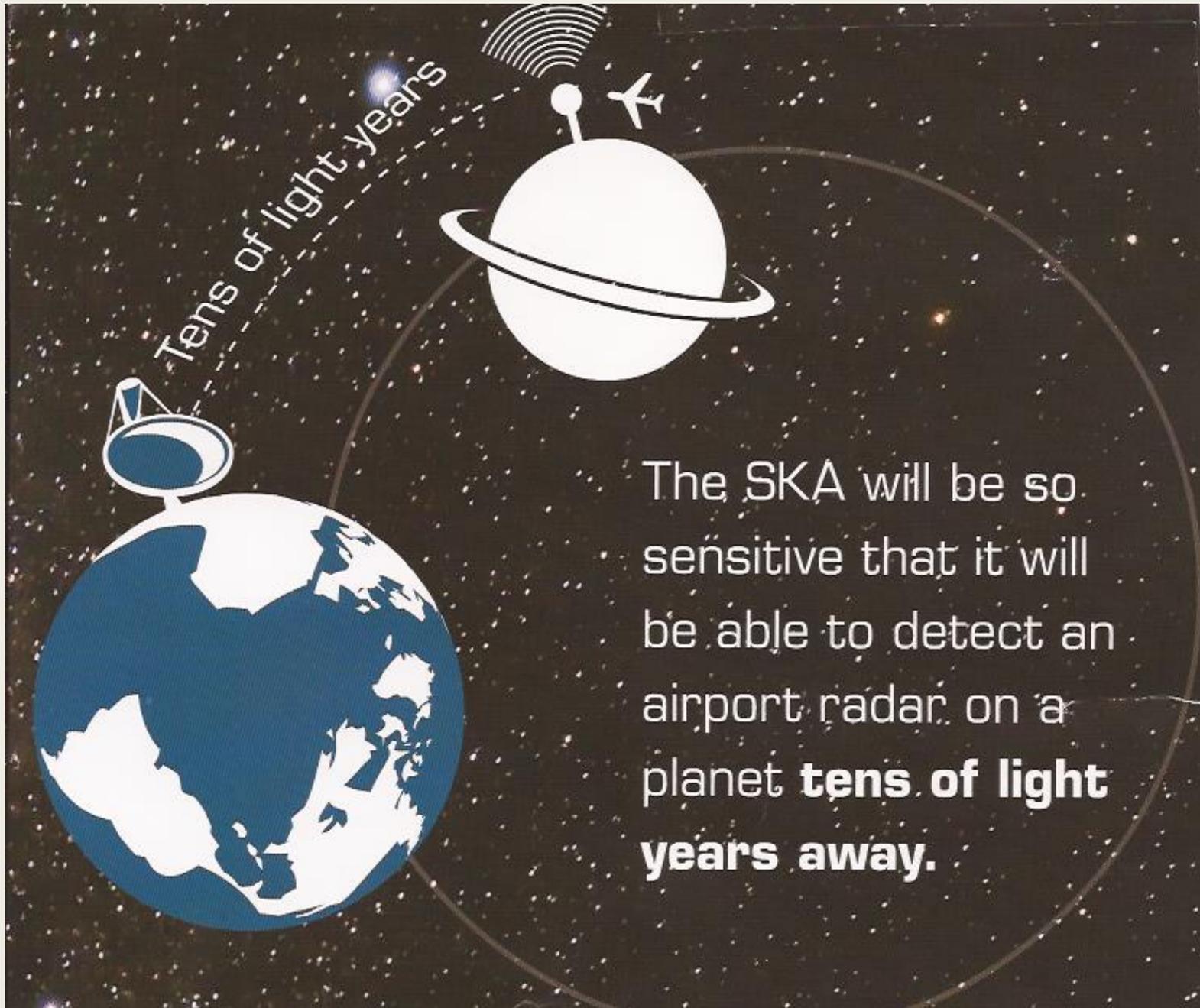
The aperture arrays in the SKA could produce more than **100 times** the global internet traffic.

100x



2x  
80000 km

The SKA will use enough optical fibre to wrap **twice** around the **Earth!**



The SKA will be so sensitive that it will be able to detect an airport radar on a planet **tens of light years away.**

# Ma quanto mi costi?

~ 1,5 Miliardi Euro

= 50 km di autostrada (30 della tangenziale di Mestre..)

= 5 volte costo [già pagato] per il ponte sullo Stretto

= 1/2 costo Torri Porta Nuova

PROGETTO INTERNAZIONALE



# OLTRE LA SCIENZA

Ingegneri all'avanguardia:

*calcolo di altissime prestazioni, gestione di grandi moli di dati, tecniche innovative di costruzione e manifattura.*

Molti dei prodotti che usiamo ogni giorno sono frutto di invenzioni scaturite dalla ricerca, ad es. la tecnica Wi-Fi, i GPS, la tecnologia digitale, la realizzazione di oggetti sempre più piccoli, le apparecchiature utilizzate per la diagnostica medica, ecc. ecc.

## RICADUTE TECNOLOGICHE

- creazione di know-how

formazione di nuovi scienziati e ingegneri con competenze innovative in un gran numero di campi di studio e di applicazione

- energia verde



# “Mysterious Fast Radio Bursts from Deep Space”



CHIME Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment



Come vedremmo il cielo se avessimo gli occhi "radio"