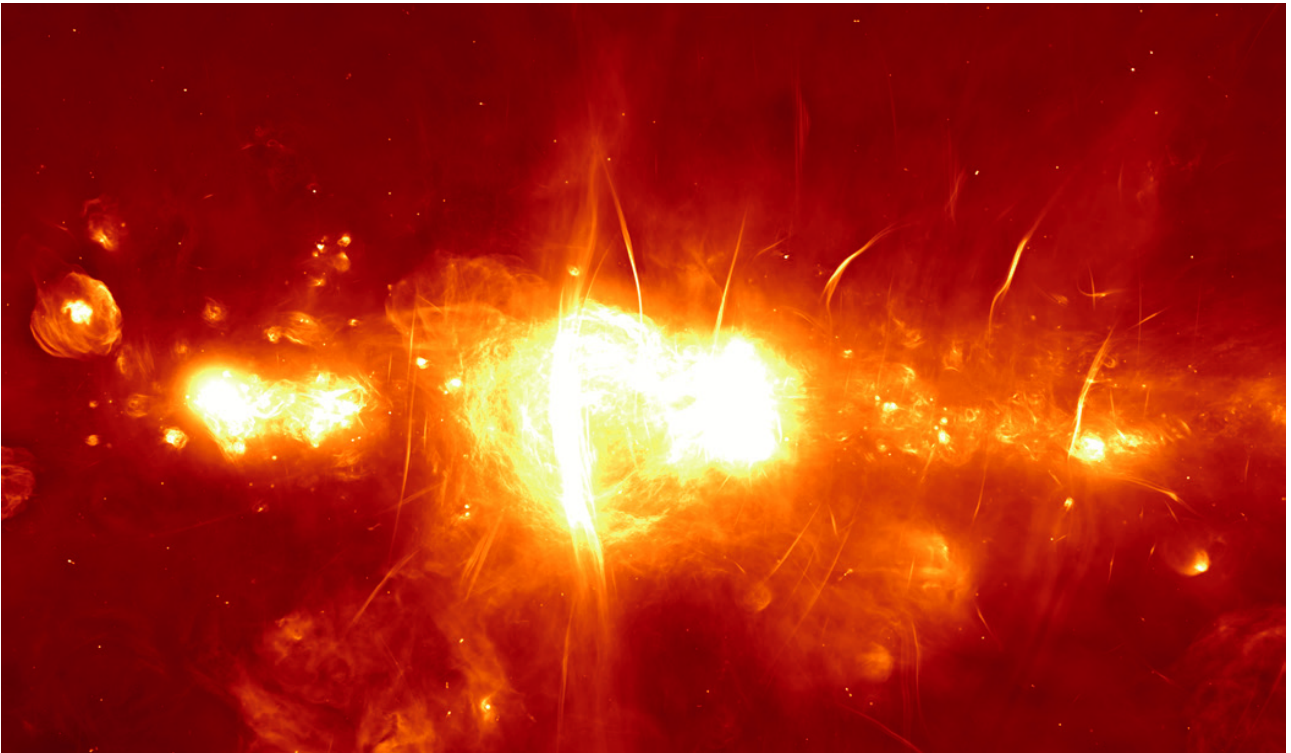


Le antenne MeerKAT nel deserto sudafricano del Karoo. Credits: SARAQ



Partecipazione Italiana al MeerKAT Telescope



Il centro Galattico visto da MeerKAT (Banda L). Credits: SARAQ

Premessa

Questo documento ha lo scopo di riassumere tutte le attività che INAF sta portando avanti, sia in ambito scientifico che tecnologico, relativamente al precursore di SKA, MeerKAT. È stato concepito come primo passo verso la definizione di una roadmap INAF per MeerKAT, roadmap che verrà finalizzata con il coinvolgimento della comunità.

Alcune delle attività presentate sono frutto di iniziative intraprese da singoli ricercatori, grazie alla partecipazione in grandi collaborazioni e al riconoscimento, in campo internazionale, quali esperti del settore. Nell'ambito della partecipazione Italiana a SKA, l'Unità Tematica Gestionale per la Radioastronomia, coordinata da Federica Govoni, ha individuato alcune tematiche, ciascuna con a capo un advisor. Questo documento è stato redatto nell'ambito delle iniziative promosse dal WG4 "Precursori e pathfinder di SKA ad alta frequenza". Lo scopo del WG4 è promuovere e coordinare iniziative ed azioni atte a:

- Consolidare e sostenere la partecipazione allo sfruttamento scientifico dei dati provenienti dai precursori e pathfinders di SKA ad alta frequenza;
- Facilitare la partecipazione allo sfruttamento scientifico dei precursori e pathfinders di SKA ad alta frequenza ai membri della comunità italiana con particolare riferimento ai colleghi con competenze non radioastronomiche.

Alcune delle attività, sia scientifiche che tecnologiche, riassunte nel seguito, sono frutto del lavoro di coordinamento fatto fino ad oggi dal WG4.

Tra le varie iniziative promosse dalla UTG-II, è stata molto importante la "National Conference of Science and technology of SKA" (Bologna 3-5 Dicembre 2018). Il meeting, a cui hanno preso parte circa 170 partecipanti, ha avuto come obiettivo la presentazione del progetto SKA alla comunità Italiana, fornire un aggiornamento sul suo stato, presentare le opportunità offerte dai precursori/pathfinder già operativi ed esplorare le possibili sinergie con gli altri progetti in cui INAF è significativamente coinvolto, sia in termini di risorse umane che economiche (<https://indico.ict.inaf.it/event/685/>).

Tra i più importanti *outcomes* del meeting, le raccomandazioni fornite agli organi di governo dell'Ente e in particolare (tratto dalla Roadmap SKA Italy):

I precursori SKA rappresentano un'occasione unica per rafforzare le competenze tecnico/scientifiche dei ricercatori italiani. Così come già fatto per LOFAR, forme di coinvolgimento formale nei precursori ASKAP e MeerKAT devono essere esplorate.

Una partecipazione più ampia alle *Legacy Surveys* e un maggior coinvolgimento allo sfruttamento scientifico di MeerKAT permetterebbero alla comunità italiana di partecipare a scoperte scientifiche di frontiera, utilizzando una facility con prestazioni uniche, almeno fino a quando SKA sarà operativo. Un pieno coinvolgimento allo sviluppo tecnologico e di sofisticate pipeline per l'analisi di dati di MeerKAT permetterà la formazione continua per giovani ricercatori e tecnologi nell'era pre-SKA, preparando una nuova generazione di scienziati pronti ad affrontare le sfide di SKA.

In questo contesto la partecipazione di INAF al progetto MK+ appare una risposta concreta ed efficiente da parte dell'Ente alle richieste della comunità di riferimento.

Questo documento è stato redatto con gli inputs dei membri del WG4 (G. Umana, A. Possenti, I. Prandoni, T. Venturi, A. Melis e C. Trigilio) e di F. Schillirò, P. Serra e U. Becciani.

1 Il Telescopio MeerKAT

MeerKAT è un interferometro formato da 64 antenne, di 13.5 m di diametro, distribuite in una regione di 8 km nel deserto del Karoo, nella provincia del Northern Cape in Sudafrica. Inaugurato nel luglio del 2018 e gestito dal South African Radio Astronomy Observatory (SARAO), MeerKAT è, al momento, l'interferometro più sensibile operativo nell'emisfero australe ed è precursore di SKA (**S**quare **K**ilometre **A**rray), il radiotelescopio che verrà realizzato in Australia (SKA_LOW) e Sudafrica (SKA_MID). MeerKAT verrà integrato nello SKA_MID nella prossima decade, durante la prima fase di costruzione di SKA, durante la quale verranno implementati SKA1_LOW e SKA1_MID. SKA1_MID sarà formato dalle 64 antenne MeerKAT, che ne formeranno il core, e da 133 antenne SKA (15m), distribuite in una regione di 150 km.

MeerKAT è al momento equipaggiato con ricevitori in banda L (0.9-1.67 GHz) e in banda UHF (0.58-1.02 GHz); sono previsti anche ricevitori in banda S (1.65-3.05 GHz), attualmente in fase di testing e installazione. Ulteriori informazioni al link: <https://science.ska.ac.za/meerkat>

Le specifiche del telescopio sono riassunte in tabella I.

Tabella I

Numero di antenne	64 (offset Gregorian)
Diametro	13.5 m
Baseline minima	29 m
Baseline massima	7700 m
Centro di fase dell'array	30 42' 39.8" sud 21 26' 38.0" est 1086.6 m elevazione
Banda L	900-1670 MHz
Banda UHF	580- 1015 MHz
<i>Banda S</i>	<i>1750-3500 MHz</i>
Sensibilità continuo (L-band)	12 μ Jy (1 hr)
Sensibilità spectral line (L-band)	184 μ Jy (1 hr, 209 kHz channel)

L'array è organizzato con un core interno, che contiene il 70% delle antenne, e una componente più esterna, che si estende fino al baseline massima di 7700 m, che contiene il rimanente 30% delle antenne. Il layout dell'array è ottimizzato per sorgenti a sud dell'equatore.

In figura 1, viene mostrato il layout di SKA1_MID (indicato in rosso) rispetto a quello di MeerKAT (indicato in bianco).

1.1 Modalità di accesso al telescopio

Ci sono tre tipologie di proposal per ottenere tempo osservativo di MeerKAT su base competitiva: i Large Survey Projects (LSPs), Open Time e Director's Discretionary time (DDT).

I primi 5 anni di attività di MeerKAT saranno dedicati per almeno il 67% alla realizzazione di 8 *Legacy Surveys*, selezionate nel 2010 e ulteriormente riviste nel 2017, che coinvolgono grossi teams internazionali.

SKA1-mid Layout

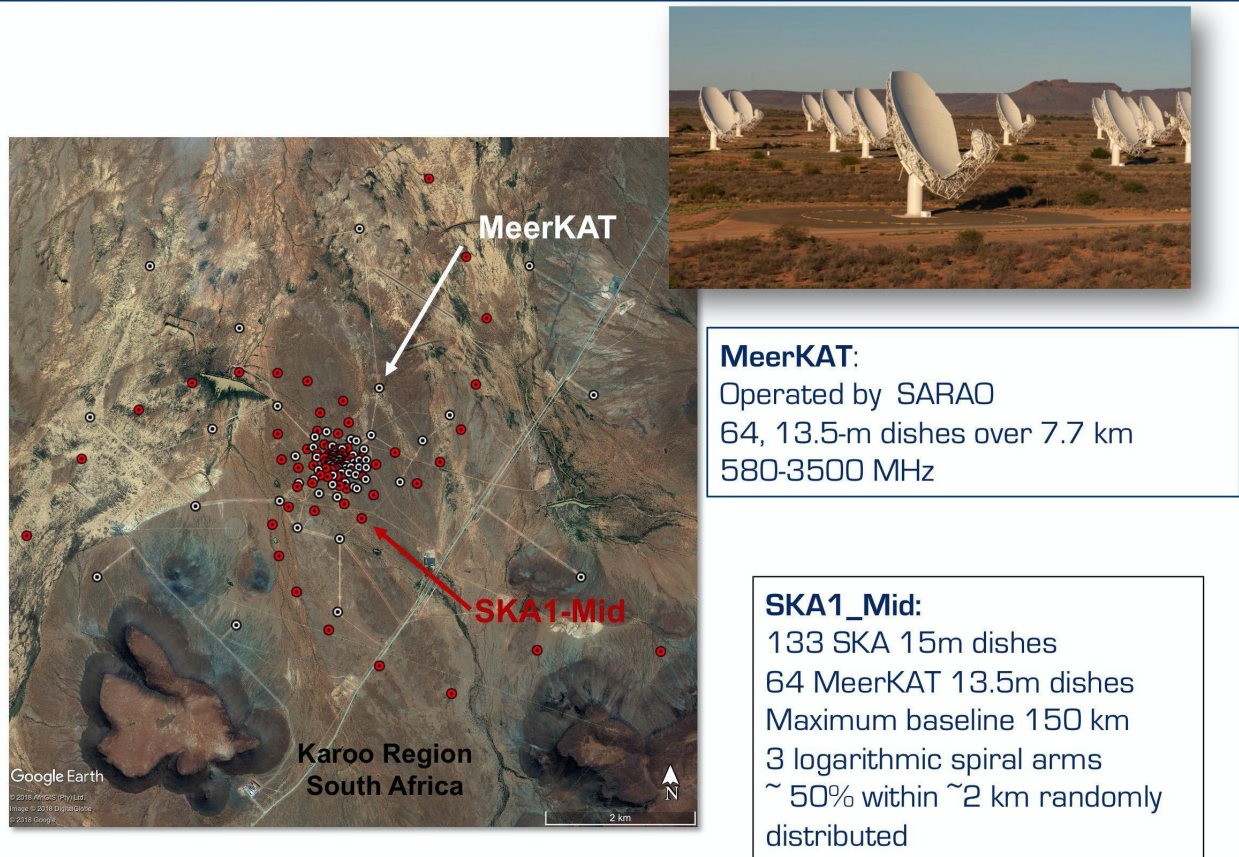


Figura 1: Layout di SKA1_MID

La lista delle Legacy Surveys, che per definizione implicano più di 1000 ore di tempo di osservazione, prevede:

1. LADUMA: Looking at the Distant Universe with the MeerKAT Array
2. MALS: The MeerKAT Absorption Line Survey
3. MeerKAT Fornax Survey
4. MeerTime: The MeerKAT Key Science Project on Pulsar Timing
5. MHONGOOSE: MeerKAT HI Observations of Nearby Galactic Objects: Observing Southern Emitters
6. MIGHTEE: The MeerKAT International GHz Tuned Extragalactic Exploration Survey
7. ThunderKAT: The Hunt for Dynamic and Explosive Radio Transients with MeerKAT
8. TRAPUM: Transients and Pulsars with MeerKAT

Il tempo restante è dedicato a calls in open time (fino al 28%). Una call Open Time (AO-0) è stata aperta alla fine del 2018, ma limitata a PIs con affiliazione Sud Africana. Le modalità osservative offerte non comprendevano osservazioni in riga a piena risoluzione spettrale e osservazioni di tipo Time-Domain.

Una prima Call for Proposals aperta a tutta la comunità internazionale e senza limitazioni circa la nazionalità dei PI (AO-1) è stata aperta nell'estate del 2020. Quest'ultima ancora non comprendeva la modalità osservativa Time-Domain.

Future call in Open Time prevedono una maggiore quantità di tempo telescopio e PI-ships non limitate a ricercatori con affiliazione Sud Africana. Fino al 5% del tempo telescopio è riservato a DDT.

2 Attuale coinvolgimento Italiano

2.1 Scienza

Ad oggi, molti ricercatori italiani, riconosciuti dalla comunità internazionale come esperti del settore, hanno accesso ai dati MeerKAT perché coinvolti nei team delle Legacy Surveys (Mightee, The MeerKAT Fornax Survey, Meertime, Trapum, ThunderKAT), dei progetti condotti nella fase di Early Phase o in risposta a Call in Open Time.

Gli interessi italiani coprono un'ampia gamma di tematiche scientifiche, tra cui: cosmologia, galassie e AGN e loro evoluzione, ammassi di galassie, pulsars per applicazioni di fisica fondamentale e scoperta di nuove pulsars, in particolare negli ammassi globulari, nelle nubi di Magellano e in alcune galassie esterne, HI e il magnetismo nell'Universo vicino e distante, transienti, emissione diffusa e radio sorgenti presenti nella nostra Galassia.

2.1.1

Legacy Surveys

I ricercatori italiani sono attualmente coinvolti in 5 delle 8 Legacy Surveys di MeerKAT:

a) La **MeerKAT Fornax** Survey, unica a leadership Italiana (Paolo Serra, INAF-OACa), consiste in un mosaico di 12 deg² dell'ammasso di galassie vicino Fornax (20 Mpc) eseguito con MeerKAT in banda L. L'obiettivo scientifico principale è studiare l'evoluzione delle galassie in un ammasso relativamente piccolo come Fornax ($M_{\text{vir}} \sim 5e+13 \text{ Msun}$) tramite la riga di emissione 21cm dell'idrogeno neutro (HI). Verrà studiata la morfologia dei dischi HI delle galassie in Fornax con particolare attenzione verso le indicazioni di interazioni di tipo idrodinamico e/o gravitazionale con l'ambiente circostante. Verrà misurata la pendenza della massa di funzione dell'HI (che è sensibile alle interazioni tipiche degli ammassi). E, grazie all'estrema sensibilità di MeerKAT, si cercherà di fare la prima detection di gas HI diffuso nello spazio intergalattico della cosmic web. I dati della MeerKAT Fornax Survey consentono di perseguire altri obiettivi importanti, in particolare lo studio degli AGN di varia luminosità nell'ammasso, la misurazione dello SFR dall'emissione di radio continuo, e la mappatura dei campi magnetici nell'ammasso.

b) La legacy survey **MIGHTEE** (MeerKAT International GHz Tiered Extragalactic Exploration) si propone di osservare quattro regioni di cielo extra-galattiche in banda L (900-1670 MHz), tra quelle più studiate a tutte le lunghezze d'onda, per un totale di 20 gradi quadrati, con sensibilità dell'ordine del micro-Jansky. Le osservazioni verranno accompagnate da osservazioni in banda S (1.75-3.5 GHz), non appena i ricevitori saranno disponibili, seppur limitatamente a una regione di circa 7 gradi quadrati. Queste osservazioni forniranno importanti informazioni sulla attività nucleare e sul tasso di formazione stellare delle galassie osservate, sulle loro proprietà in polarizzazione, e sul loro contenuto di idrogeno neutro. Queste informazioni, insieme alla gran quantità già disponibili, consentiranno di affrontare un'ampia gamma di interrogativi scientifici. Di seguito sono brevemente menzionati alcuni degli obiettivi principali: (i) lo studio dell'evoluzione cosmologica dell'attività di formazione stellare e dell'attività nucleare nelle galassie, e la loro dipendenza dalla massa stellare e dalle condizioni ambientali delle galassie stesse; (ii) lo studio dell'evoluzione cosmologica del contenuto di idrogeno neutro nell'Universo e il processo di

trasformazione dell'idrogeno neutro in idrogeno molecolare e infine in stelle; (iii) il ruolo dell'idrogeno neutro nell'alimentare l'attività nucleare nelle galassie; (iv) lo studio dei campi magnetici cosmici, della loro evoluzione nelle galassie e nei diversi ambienti in cui le galassie vivono (gruppi e ammassi di galassie, filamenti). I campi profondi osservati in MIGHTEE verranno inoltre studiati per identificare e caratterizzare l'emissione radio in campioni stellari nell'alone galattico. MIGHTEE rappresenta un ottimo progetto pilota per le survey cosmologiche programmate per il futuro con lo Square Kilometre Array (SKA).

c) **Meertime** è un progetto di timing di pulsar che si dispiega in 4 principali linee di ricerca: 1) osservazioni di Pulsar Binarie e Relativistiche, allo scopo di porre vincoli alla relatività generale e teorie alternative della gravità, oltreché per la misura della massa delle stelle di neutroni incluse nel sistema binario; 2) osservazioni di un insieme di Pulsar a Millisecondo per la rivelazione di onde gravitazionali di periodo ultra lungo; 3) osservazioni di pulsar contenute in Ammassi Globulari, al fine di vincolare i parametri dinamici, il contenuto di gas, e la presenza di campi magnetici negli Ammassi, oltreché studiare la presenza di materia oscura, sotto forma di buchi neri di massa intermedia; 4) osservazioni di un campione amplissimo di pulsar ordinarie, con lo scopo di determinare le proprietà della popolazione di stelle di neutroni radio emittenti e il loro meccanismo di emissione, oltreché studiare l'origine di irregolarità nel loro regime rotazionale.

d) **Trapum** è un progetto di ricerca di nuove pulsar e di transienti radio veloci. Per quanto riguarda le pulsar, le osservazioni sono concentrate su 4 principali ambiti astrofisici: 1) sorgenti Fermi non identificate; 2) Pulsar Wind Nebulae, Resti di Supernova e sorgenti TeV non identificate; 3) Ammassi globulari; 4) Nubi di Magellano e un campione di galassie vicine alla Via Lattea. Individuare un cospicuo numero di pulsar in questi contesti permetterà di fare luce su un gran numero di questioni irrisolte nella astrofisica delle stelle di neutroni: dal loro birth-rate, alla relazione fra diverse sottoclassi di questi oggetti, dalla funzione di luminosità radio alla frazione ed età degli oggetti radio quieti, dalla dinamica delle stelle di neutroni nella Galassia al kick impartito nelle esplosioni di supernova che le originano. Il tutto condito dalla promettente possibilità di scoprire alcuni oggetti "estremi" che si possono probabilmente formare solo in questi sistemi: pulsar triple, pulsar doppie al millisecondo, pulsar orbitanti un buco nero stellare e/o un buco nero di massa intermedia. Per quanto riguarda i transienti radio veloci, questo esperimento ha la possibilità di rivelare un FRB e, congiuntamente, la sua posizione astrometrica. Ciò apre la possibilità di capire l'origine di questi eventi misteriosi e, al contempo, di utilizzarli per compiere misure cosmologiche.

e) **ThunderKAT** è un progetto dedicato allo studio dei Transienti e in particolare allo studio delle binarie X, delle variabili Cataclismatiche, agli short Gamma-ray Burst e alle Supernovae di tipo Ia. In aggiunta, ThunderKAT avrà accesso commensale a tutte le legacy Surveys di MeerKAT per quanto riguarda i fenomeni esplosivi cosmici, come ad esempio anche lo studio di flares stellari in stelle con attività magnetica di tipo solare. La banda L è particolarmente interessante per studiare i burst stellari dovuti a processi coerenti. L'accesso commensale a tutte le surveys per cercare transienti aumenta la probabilità di scoprire transient radio rari di un fattore 10. Il progetto MeerLICHT assicura copertura fotometrica multi-banda real-time alla posizione del transiente.

Di seguito, nelle tabelle II-VI, vengono riassunte le principali caratteristiche delle Legacy Surveys con coinvolgimento di personale INAF e Associato INAF

Tabella II MeerKAT Fornax Survey

PIs	Ore/ Bande	Tematiche	WGs	Partecipazione Italiana	Pubblicazioni Co-I Italiani
P. Serra	900/L	Tutte con focus sull'ammasso Fornax: Evoluzione delle galassie negli ammassi; Interazioni idrodinamiche e gravitazionali tra le galassie e il loro ambiente; La funzione di massa dell'HI negli ammassi di galassie; Gas HI diffuso nel mezzo intergalattico; Mappatura dei campi magnetici negli ammassi; Radio AGN negli ammassi di galassie; Tasso di formazione stellare a frequenze radio negli ammassi di galassie		Tutti INAF-OACa Govoni Kleiner Loi Loni Maccagni Molnar Murgia Ramatsoku Serra	Serra+2016 Serra+2019 Maccagni+2020 Kleiner+ 2021

Tabella III MIGHTEE

PIs	Ore/ Bande	Tematiche	WGs	Partecipazione Italiana	Pubblicazioni Co-I Italiani
M. Jarvis R. Taylor	1920/L &S	Star formation evolution with cosmic time; The merging history of galaxies; HI Evolution with cosmic time; The role of environment on SF quenching; AGN polarization as a probe of environment; AGN fueling & feedback; LSS & Cosmology; Clusters and their magnetic fields; The emergence and evolution of magnetic fields in galaxies; Digging into the noise: sub-threshold science	Continuum (CON) HI – Emission (HI) HI-Absorption (ABS) Polarization (POL) Stars (S) VLBI (V) GMRT (G) Cross-ids (XID)	Brienza (Postdoc, UniBo*) – CON/G Buemi (INAF-OACT)- CON/S Bufano (INAF-OACT) – CON/S Cavallaro (Postdoc, IDIA-UCT*) – POL/S Delvecchio (INAF-OAMi) – CON/V Ingallinera (INAF-OACT)-CON/S- POL/S/D Leto (INAF-OACT)- CON/S Locatelli (PhD, UniBO*) - POL Loru (INAF-OACT) – CON/S/D	Jarvis+2016 Maddox+2020 Delhaize+2021 Delvecchio+2021

		VLBI enhancement: enabling new science adding long baselines; Radio stars	Noise (N) Data (D)	Marchetti (UCT*) - CON/XID/G Maccagni (Postdoc, OACa) - HI/ABS Pannella (UniTS*) - CON Prandoni (IRA) - CON/HI/ABS/POL/G Riggi (INAF-OACT)- CON/S/D Rodighiero (UniPD*) - CON/HI/N Trigilio (INAF-OACT)- CON/S-POL/S Umana (INAF-OACT)- CON/S Vaccari (UWC*) - XID	
--	--	--	---------------------------	--	--

* Associati INAF

Tabella IV MEERTIME

PIs	Ore/ Bande	Tematiche	WGs	Partecipazione Italiana	Pubblicazioni Co-I Italiani
M. Bailes	2000/ UHF, L & S	Pulsar timing with reference to: Globular Clusters (<i>GC</i> , constraints of properties, inference of an IMBH); Relativistic Binaries (<i>RelBin</i> , gravity theories test; NS masses and binary evolution); Ordinary pulsars (<i>TPA</i> , population); Millisecond pulsars array (<i>PTA</i> , detection of GWs)	Globular Cluster Pulsars (GC) Relativistics Binaries (RelBin) 1000 pulsars array (TPA) Millisecond pulsars array (PTA)	Possenti (INAF-OACA) :Co-chair GC; member RelBin. Burgay (INAF-OACA) :-RelBin, TPA. Ridolfi (INAF-OACA): GC, RelBin, builder team. Abbate (INAF-OACA) Until 2019: GC, builder team	Bailes+2020 Abbate+2020 Ridolfi+2021 Kramer+2021

Tabella V- TRAPUM

PIs	Ore/ Bande	Tematiche	WGs	Partecipazione Italiana	Pubblicazioni Co-I Italiani
B. Stapper M.Kramer	1200/ UHF, L & S	Pulsar and time-domain searches, with references to: Pulsar in Globular Cluster;	Globular Cluster (GC)	Possenti (INAF-OACA): GC; PST, Fermi, Follow, OT.	Ridolfi+2021 Bailes+2021 Caleb+2020

		Pulsar in PWN/SNR and in Tev/Fermi sources; Pulsar in Nearby Galaxies; FRBs (detection and localization)	PWN/SNR/TeV(PST) Fermi unID (Fermi) Magellanic Clouds (MC) Fast Radio Bursts and Transient (FRB) Follow-ups (Follow) Open-time proposals (OT)	Burgay (INAF OACA): chair Follow-up, member Fermi. Ridolfi (INAF-OACA) chair GC	
--	--	--	--	---	--

Tabella VI- ThunderKAT

PIs	Ore/ Bande	Tematiche	WGs	Partecipazione Italiana	Pubblicazioni Co-I Italiani
P. Wouldt R. Fender		X-ray binaries; Cataclysmic Variables; Short Gamma-Ray Bursts; Type Ia Supernovae; Commensal access to all MeerKAT LSPs	Relativistic accretion White Dwarf accretion Cosmic explosions (CE) Fast and coherent transients Gravitational wave sources Algorithms & Infrastructure Multi-wavelength coordination	Buemi (INAF-OACT), CoOb Botticella (INAF-Capodimonte), CoOb, CE Bufano (INAF-OACT), CoOb, CE Cavallaro (UniCpT)*, CoOb Cappelaro (INAF-OAPd), CoOb, CE Elias Rosa (INAF-OAPd), CoOb,CE Ingallinera (INAF-OACT), CoOb Leto (INAF-OACT), CoOb Loru (INAF-OACT), CoOb Motta (INAF-OA Brera) CE Riggi	

			Commensal Observing (CoObs) MeerLICHT	(INAF-OACT), CoOb Trigilio (INAF-OACT), CoOb Umana (INAF-OACT), CoOb Vaccari (UWC)*	
--	--	--	--	--	--

* Associati INAF

2.1.2 Progetti con partecipazione Italiana in Early Science Phase

Galaxy clusters with MeerKAT: the premiere, Early Science Proposal with MeerKAT-16, PI: B. Hugo (SARAO), 14 hours

Partecipanti italiani: **T. Venturi, G. Bernardi, Beatrice Terni de Gregory** (Tesi di Dottorato 32 ciclo, finito il 16 Marzo 2020)

Abstract:

Osservazioni di ammassi di galassie a redshift intermedio effettuate con lo scopo di studiare l'emissione radio (di galassie e da intracluster medium) in ambienti diversi. I due ammassi studiati sono in un diverso stato dinamico. Essendo osservazioni di early science, il progetto è servito anche a dare riscontro al team relativamente alle procedure di riduzione dati.

Il progetto è parte della tesi di dottorato di B. Terni de Gregory e un articolo è in fase di pubblicazione sulla rivista MNRAS [arXiv:2104.05619].

2.1.3 Progetti con partecipazione Italiana in risposta a call in Open Time AO-O

The MeerKAT view of the Shapley Concentration, AO1 proposal (Gennaio 2019), P.I. Oleg Smirnov (SARAO) & T. Venturi, 16 ore

Partecipanti italiani: **T. Venturi** (INAF-IRA) e una lunga lista di collaboratori INAF. In particolare, **Paola Merluzzi** e **Giovanni Busarello** (OA Napoli), **Fabio Gastaldello** e **Mariachiara Rossetti** (OA Brera).

Abstract:

Il progetto riguarda uno studio completo delle regioni centrali della Shapley Concentration, il più grande superammasso locale visibile dall'emisfero Sud, dove si possono studiare gli effetti della formazione di ammassi di galassie all'epoca cosmologica attuale. La Shapley Concentration è costituita da ammassi e gruppi in stato dinamico molto diversificato e per questo permette uno studio completo ed estremamente dettagliato. Le osservazioni sono state effettuate nel 2019, sono state completamente ridotte da Oleg Smirnov e l'analisi dei dati è conclusa. Si tratta di due mosaici di svariati gradi quadrati di cielo, con un noise di 4-6 $\mu\text{Jy}/\text{b}$, di qualità eccezionale. La collaborazione con i colleghi italiani permette uno studio multibanda (radio-ottico-X) di qualità eccezionale.

Le osservazioni sono state combinate con due puntamenti (A3558 e A3562) appartenenti alla Galaxy Cluster Legacy Survey effettuata durante il commissioning scientifico di MeerKAT. In relazione alla politica di SARAO, per l'utilizzo di questi dati si è aperta una collaborazione con la Dott.ssa Kenda Knowles e la studentessa di dottorato Precious Sinenhlanhla Sikhosana. È stato inoltre presentato il progetto per una tesi di dottorato presso SARAO con supervisione a IRA a partire dal 2021.

Attualmente si sta completando un articolo, che include sia i dati MeerKAT menzionati sia dati relativo all'ASKAP Early Science Project 20.

A new look at old devils: imaging classical radio galaxies with uGMRT and MeerKAT, AO1

proposal [Gennaio 2019], P.I. Bernie Fanaroff & T. Venturi, 32 ore

Partecipanti italiani: **T. Venturi** e **M. Bondi** (INAF-IRA)

Abstract:

Il progetto ha lo scopo di osservare radiogalassie classiche alla risoluzione angolare e sensibilità di MeerKAT e uGMRT con lo scopo di evidenziare emissione a bassa brillantezza superficiale, finora non rivelata in seguito alle prestazioni limitate degli interferometri di precedente generazione, con gli scopi principali di studiare il ciclo di attività delle radiosorgenti, e l'interazione delle regioni di bassa brillantezza col mezzo circostante. Inoltre il progetto permette anche di studiare l'indice spettrale proprio in queste zone, cosa che sta rivelando tratti interessanti, quali ad esempio un andamento meno ripido di quando ci si aspettasse sulla base delle sensibilità delle immagini precedenti. Si sta anche valutando se è necessario rivedere la classificazione classica di FRI ed FRII.

Il progetto si basa anche su osservazioni uGMRT (P.I. Lal). I dati MeerKAT sono stati tutti ridotti da O.Smirnov. Un primo articolo è stato sottomesso alla rivista MNRAS (Fanaroff, Lal, Venturi et al.). In questo progetto, che ha ottenuto tempo anche nella call AO-1, è coinvolta una studentessa di dottorato sudafricana che ha appena iniziato a lavorare, con il co-tutoraggio di INAF (Venturi).

2.1.4 Progetti con partecipazione Italiana con dati ottenuti durante il commissioning scientifico.

Nel 2019 sono stati costituiti due consorzi internazionali per l'analisi di dati ottenuti durante il commissioning scientifico di MeerKAT:

Il SARAO MeerKAT Galaxy Cluster Legacy Survey e il SARAO MeerKAT Galactic Plane Legacy Survey

Al primo Consorzio partecipa T. Venturi (INAF-IRA). Il gruppo di lavoro, coordinato da K. Knowles e L. Rudnick, ha identificato 18 tematiche, che dovrebbero portare ad altrettanti articoli. T. Venturi è attivamente coinvolta nei seguenti gruppi di lavoro:

- D – Extended source catalog (P.I. V. Parekh)
- F – Diffuse (non-radio galaxy) emission catalog (P.I. K. Kolokythas)
- O – (new) structures of extended radio galaxies (L. Rudnick)
- Q – Relationships: diffuse emission and cluster dynamical state (K. Knowles).

Un primo articolo di presentazione della survey (Knowles et al., The MeerKAT Galaxy Cluster Legacy Survey. I. Overview and highlights) è in fase di scrittura avanzata.

Al secondo Consorzio partecipa il team di radioastronomia Galattica di INAF-OACT.

Il gruppo di lavoro, coordinato da Mark Thompson, Sharmila Goedhart, Michael Bietenholz e Grazia Umana (INAF-OACT), ha identificato 20 tematiche che porteranno ad altrettanti articoli.

Di seguito le tematiche in cui è coinvolto personale INAF:

- a) Survey description and release paper (P.I. Goedhart)
- b) Compact source catalogue paper (P.I. Mutale)
- c) Extended source catalogue paper (P.I. Riggi INAF-OACT)
- d) SNR catalogue (P.I. Cavallaro)
- e) SNR characterization (P.I. Loru INAF OACT)
- f) Planetary nebulae (P.I. Ingallinera INAF-OACT)
- g) Radio Stars (P.I. Woudt)
- h) LBVs and WRs (P.I. Umana INAF-OACT)

2.1.5 Progetti con partecipazione Italiana in risposta a call in Open Time AO-1

La prima call for proposals aperta a tutta la comunità internazionale, senza limitazioni circa la nazionalità dei PI, aveva come deadline il 1 Settembre 2020.

La valutazione delle proposals è avvenuta con un processo double-blind, per minimizzare i rischi di discriminazione (geografica e di genere) e l'esito è stato comunicato il 15 Febbraio 2021. La comunità INAF ha partecipato in misura massiccia alla call, con esito molto soddisfacente.

Nel seguito i proposal a partecipazione italiana che hanno ottenuto tempo telescopio:

Exploring new regimes in particle acceleration physics: the galaxy cluster pair Abell 141,

PI: G. Brunetti (INAF-IRA), 10 ore, priorità:A

Partecipanti italiani: G. Bernardi, R. Cassano, T. Venturi (INAF-IRA), INAF-IRA; F. Vazza, UniBo.

Exploring the large scale environment and star formation properties of the Spiderweb proto-cluster at $z = 2.17$ with MeerKAT,

PI: M. Pannella (UniTs), 6 ore, priorità:A

Partecipanti italiani: Strazzullo, Rasia (OATs) Saro, Borgani (UniTs, associati INAF), Paladino (INAF-IRA)

MeerKAT observations of the ridge connecting the galaxy clusters pair A399-A401,

PI: F. Govoni (INAF-OACa), 5 ore, priorità:A

Partecipanti italiani: D. Molnar, M. Murgia, V. Vacca, P. Serra, F. Loi, M. Ramatsoku, L. (OACa), Feretti, G. Giovannini (associati INAF)

The role of neutral atomic hydrogen in the evolution of Seyfert galaxies,

PI: F. Maccagni (INAF-OACa), , priorità:A

Partecipanti italiani: P. Serra (INAF-OACa) Cresci, F. Mannucci, Marasco (INAF- OAA), A. Marconi (UniFi)

A Spectral Census of Mini-Haloes with MeerKAT ,

PI: C. Riseley, UniBo, 73.5 ore, priorità: A

Partecipanti italiani: G. Brunetti (INAF-IRA), F. Loi (INAF-OACa), A. Bonafede, N. Biava, E. Bonnassieux, K. Rajpurohit (KR; Uni.Bologna), C. Stuardi (UniBo)

MERGHERS: evolution of cluster scale radio sources through cosmic time

PI: Kenda Knowles, UKZN, 50 ore, priorità: A

Partecipanti italiani: G. Bernardi, G. Brunetti, R. Cassano, T. Venturi (INAF-IRA)

HI intensity mapping with MeerKAT: Hunting down the power spectrum

PI: M. Santos, UWC, 85 ore, priorità: A

Partecipanti italiani: G. Bernardi

An HI perspective on galaxy evolution in Abell 2626 and its surroundings

PI: T. Deb, 48 ore, priorità: A

Partecipanti italiani: G. Brunetti (INAF-IRA), Poggianti (INAF-OAPd)

A treasure trove in the merging galaxy cluster Abell 520

PI: S. Giacintucci (NRL), priorità: A

Partecipanti italiani: T. Venturi (INAF-IRA)

Probing star-planet interaction in the Proxima - Proxima b system with MeerKAT

PI: M. Perres-Torrez (IAA), 18 ore, priorità: A

Partecipanti italiani: C. Trigilio, P. Leto, G. Umana (INAF-OACT)

An HI-census of the hidden Vela Supercluster

PI: R. Sambatrana, priorità: A

Partecipanti italiani: P. Serra (INAF-OACa)

Mapping tidal interactions in nearby galaxy groups

PI: B. Koribalski (CASS), priorità: A

Partecipanti italiani: D. Kleiner (INAF-OACa)

Searching for evidence of galactic winds in Centaurus A

PI: McKinley, B., A

Partecipanti italiani: F. Maccagni (INAF-OACa)

A MeerKAT view on galaxies in filaments falling onto the Virgo cluster (VirgoFil)

PI: P. Jablonka, 22,3 ore, priorità: B

Partecipanti italiani: B. Vulcani (INAF-OAPd)

Low frequency follow-up of giant radio galaxies that shouldn't exist!

PI: J., Delhaize, 8 ore, priorità: B

Partecipanti italiani: Delvecchio e Loiacono (INAF-OABrera)

A new look at old devils: imaging classical radio galaxies with MeerKAT and uGMRT

PI: B. Fanaroff (SARAO), priorità: B

Partecipanti italiani: T. Venturi, M. Bondi (INAF-IRA)

Extending the MeerKAT Monitoring of the Akari Deep Field South - Multi-Wavelength Time-Domain Science with MeerKAT/MeerLICHT on the way to SKA/LSST

PI: Vaccari, M (UWC/IDIA, SA), priorità: B

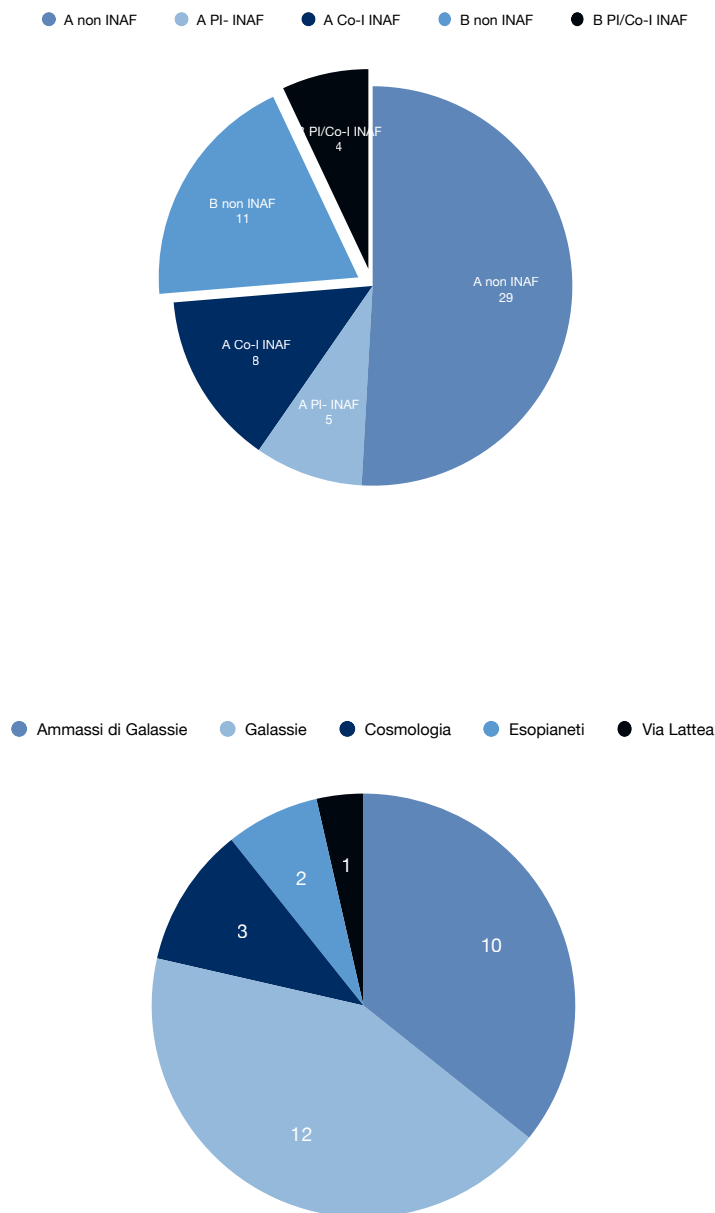
Partecipanti italiani: Botticella, M. T., (INAF-OANapoli), M. Paolillo (UniNa), I. Baronchelli (OAPd), I. Prandoni (IRA)

Delle 113 proposte ricevute dal SARAO, 28 sono state presentate da PI INAF o associato INAF o hanno personale INAF o associato INAF come co-I (25%).

Sono stati approvati un totale di 57 progetti di cui, 42 con priorità A e 15 con priorità B. Tra i proposals in priorità A, 5 hanno un PI INAF (3) o associato INAF (2) e 8 hanno personale INAF o

un associato INAF tra i Co-I. Tra i proposals approvati in categoria B, 4 proposals hanno personale INAF o associato INAF tra i co-I.

Questo porta a un rate del 30% di proposals approvati che hanno un contributo italiano. Inoltre, sono stati presentati 6 proposals con PI INAF o associato INAF e 5 con personale INAF o associato INAF, non approvati in questa call, ma che indicano un largo interesse nella comunità di riferimento. Sottolineiamo inoltre che per questa call non è stata attivata la modalità *time-domain* che avrebbe visto una partecipazione ancora più grande della comunità italiana.



Nel grafico in alto vengono indicati i proposals approvati nella call AO-1 divisi tra quelli approvati in priorità A (PI INAF o associato INAF e Co-PI INAF o associato INAF) e quelli in priorità B. Nel grafico in basso, viene indicata la distribuzione di tutti i proposals, accettati e non, con contributo italiano secondo le tematiche scientifiche.

2.2 Tecnologie per il Big Data Analysis

A partire dal 2018 i gruppi INAF di tecnologia che si occupano dell'analisi dati hanno cominciato a collaborare con gruppi di ricerca del Sud Africa che si occuperanno anche dell'analisi dei dati di MeerKAT e che arriveranno ai Regional Center di SKA.

Gli interessi dei ricercatori hanno trovato ambiti comuni di lavoro e le maturate esperienze professionali sono messe a fattore comune nello sviluppo di tecnologie informatiche innovative per il Big Data Analysis. Tale attività oggi formalizzata a diverso livello rappresenta un importante elemento di collaborazione nello sfruttamento dei dati di MeerKAT e del futuro SKA.

2.2.1 Progetti con partecipazione Italiana

2.2.1.1 IDaVIE. Tecnologie di Visual Analytic in Virtual Reality

Ricercatori Coinvolti

Sud Africa Cape Town IDIA: Prof. Tom Jarrett (PI), Prof. Russ Taylor (Co-PI), Lucia Marchetti (Project Scientist and Project Manager), Mattia Vaccari (Italy-South Africa Bilateral Program representative);

INAF OACT, OACa, IRA : Ugo Becciani (Co-PI), Paolo Serra (Co-Project Scientist, HI expert and HI Community Representative), F. Vitello.

A partire da Aprile 2019 è stata stabilita una collaborazione tra INAF-OACT e OACa con IDIA e UCT per lo sviluppo di un tool di analisi dati. Lo scopo di questo progetto è implementare l'analisi quantitativa dei dati radio utilizzando tecniche di realtà virtuale. Questo progetto fa anche parte delle attività del Programma bilaterale Italia-Sudafrica gestito dal Progetto congiunto di progetto di ricerca (Progetto di Grande Rilevanza) tra il Ministero degli Affari Esteri e della Cooperazione Internazionale (MAECI) e la Fondazione Nazionale per la Ricerca RADIO SKY 2020.

I gruppi coinvolti hanno concordato di collaborare allo sviluppo di un pilot user driven per consentire l'esplorazione del data cube di MeerKAT HI e identificazione delle sorgenti.

La collaborazione è formalizzata con la sigla di un MoU tra INAF-OACT e OACa con IDIA avvenuta a Settembre 2019 a Catania.

2.2.1.2 SA-EU A Federated Cloud Demonstrator

Ricercatori Coinvolti

Sud Africa Cape Town IDIA: Prof. Rob Simmonds, Prof. Russ Taylor, Kechil Kirkham

INAF: Alessandro Costa, Giuliano Taffoni, Mauro Nanni, Matteo Stagni, Paolo Serra, Andrea Possenti, Mattia Vaccari, Riccardo Smareglia.

A partire da Febbraio 2019 è stata attivata una linea di intervento e collaborazione tra INAF e UCT per la progettazione e la prototipizzazione di una cloud federation tra INAF e Cloud IDIA.

Fra i principali obiettivi del prototipo sono stati individuati la capacità di "ospitare" diversi progetti ciascuno con il proprio ecosistema di dati e la realizzazione di un infrastruttura atta a facilitare la collaborazione e l'elaborazione scientifica end-to-end per grandi moli di dati focalizzata su programmi scientifici riguardanti SKA o i suoi precursori.

2.2.1.3 Big Data Analysis and Machine Learning Techniques for MeerKAT

Ricercatori Coinvolti

Sud Africa, Cape Town (UCT/UWC/IDIA): Prof. Mattia Vaccari, Prof. Patrick Marais, Prof. Amit Mishra

INAF: Ugo Becciani, Simone Riggi, Eva Sciacca, Fabio Vitello

Nel corso del 2020 INAF - OACT e UCT/UWC/IDIA hanno iniziato una collaborazione per un percorso comune nello sviluppo di tools per il Big data Analysis basato su tecniche di Visual Analytic e Machine Learning. È interesse comune formalizzare un futuro progetto più importante con un accordo che preveda un programma di ricerca ben definito e user driven basato all'analisi dati di MeerKAT ed SKA più in generale. Si prevede un programma con scambio di ricercatori e studenti PhD con contributi di Assegnisti e Ricercatori.

Contesto

IDIA è in prima linea nei recenti sviluppi nel software e nell'hardware di elaborazione della ricerca per la ricerca ad alta intensità di dati. Tra le altre cose, IDIA ha: a) sviluppato una suite di pipeline di elaborazione dati di uso generale e le ha ottimizzate per i dati MeerKAT - <https://idia-pipelines.github.io> - b) ha sviluppato un cloud di ricerca che supporta l'elaborazione dei dati di 5 degli 8 progetti di indagine MeerKAT Lage, nonché diversi progetti open-time e attività di formazione MeerKAT c) hanno creato un laboratorio di visualizzazione - <https://vislab.idia.ac.za> - dove vengono sviluppate soluzioni di visualizzazione innovative per i dati astronomici per essere visualizzato e manipolato su dispositivi che vanno dai laptop ai desktop, dispositivi VR e cupole digitali / planetaria d) ha sviluppato Cube Analysis and Rendering Tool for Astronomy (CARTA) - <https://cartavis.github.io> - uno strumento di visualizzazione e analisi delle immagini progettato per ALMA, VLA e SKA pathfinder che alla fine sostituiranno il visualizzatore CASA e) hanno sviluppato forti legami internazionali con gruppi di ricerca nel Regno Unito, Paesi Bassi, Australia, USA, Canada, India, Cina, Italia.

Nell'ambito della collaborazione è interesse comune attivare 1-2 posti di PhD congiunti presso una delle Università partner di IDIA (Università di Cape Town, Università del Western Cape e Università di Pretoria) in collaborazione con INAF. Il progetto di ricerca avrà una durata di 3 anni. Ai dottorandi verrà assegnata una borsa di dottorato con compartecipazione dell'INAF. Gli studenti di PhD del programma congiunto risiedono abitualmente in una delle università partner di IDIA ma effettueranno visite annuali all'INAF. Sono altresì previsti scambi bilaterali di ricercatori per periodi di visite programmate.

Gli studenti saranno supervisionati da ricercatori IDIA e co-supervisionati da ricercatori INAF.

Lo scopo del progetto è quello di ricercare, progettare, e valutare strumenti software per il rilevamento di caratteristiche e la scoperta delle peculiarità del dato basandosi su tecniche di visual analytic per supportare i radioastronomi. Le tecniche impiegate potranno anche essere adattate per altri programmi scientifici anche al di là della radioastronomia, ma il focus chiave sarà

sulla progettazione di strumenti per l'analisi dei dati MeerKAT, ASKAP, LOFAR e GMRT, nonché per i data challenge di SKA, anche nel contesto di dati multi-banda (ottici e infrarossi in particolare) Recentemente, nel corso di Giugno 2020 sono state già avviate e concluse con successo 2 internship in collaborazione tra INAF-OACt e UCT:

A) Analisi Dati con tecniche di Visual Analytic

Ricercatori Coinvolti

Sud Africa Cape Town UCT: Prof. Patrick Marais, Cilliers Pretorius

INAF OACt : Dr.ssa Eva Sciacca, Dr. Ugo Becciani, Dr. Fabio Vitello

Attività: Sviluppo e adeguamento di features dello strumento tool di Visual Analytic VLVA sviluppato in ambito progetto ViaLactea FP7 e in prosecuzione con ECOGAL (ERC-Synergy) finalizzato allo sfruttamento di rilevazioni astrofisiche del Piano Galattico per studiare il processo di formazione stellare.

B) Tecniche di Machine Learning per dati radio

Ricercatori Coinvolti

Sud Africa Cape Town UWC: Prof. Mattia Vaccari, Kyle Leon Jordaan

INAF OACt : Dr. Simone Riggi, Dr. Ugo Becciani, Dr.ssa Eva Sciacca

Sviluppo di un Web Service (REST APIs + backend) per estrattore automatico di sorgenti da mappe radio, su infrastruttura Cloud. Porting del source extractor su Docker container. Utilizzo di orchestrator per l'esecuzione del container sulla cloud (Kubernetes).

2.1.1.4 Radio interferometry pipeline

CARACal pipeline

Ricercatori coinvolti:

ITA: P. Serra, M. Ramatsoku, D. Molnar, D. Kleiner, F. Maccagni

SA: G. Jozsa, O. Smirnov, S. Makhathini, K. Thorat, B. Hugo, S. Perkins, A. Ramaila, L. Andati, S. White

webpages:

<https://github.com/caracal-pipeline/caracal> , <https://caracal.readthedocs.io>

Il gruppo sta sviluppando CARACal, una nuova pipeline per l'elaborazione di dati ottenuti con interferometri radio. La filosofia di questa pipeline è di consentire l'utilizzo di tutti i migliori software esistenti all'interno di un unico framework (anziché re-implementare i migliori algoritmi in un nuovo software). La pipeline è in via di sviluppo da 3 anni. È motivata dall'apertura del nuovo telescopio MeerKAT, e dunque focalizzata su "large data volumes" e "high dynamic range", ma è stata già usata con successo anche su dati presi con altri radiotelescopi come il JVL A. Una prima versione di CARACal è stata pubblicata a maggio 2020. La pipeline è già stata utilizzata per numerosi articoli scientifici pubblicati nel 2019 e 2020 ([p.es.](#), Serra et al 2019, Maccagni et al. 2020, Ramatsoku et al. 2019, 2020a, 2020b).

3 Programmi e Iniziative MAECI

Il ministero degli Affari Esteri e della Cooperazione Internazionale intraprende tutta una serie di iniziative atte a favorire la cooperazione nel settore della ricerca scientifica e tecnologica. La cooperazione tra Italia e Sud Africa si sviluppa sulle linee guida definite attraverso accordo bilaterale, successivamente implementato tramite programmi esecutivi. La Radioastronomia è tra le aree di collaborazione internazionali individuate quali prioritarie dal governo Sudafricano e sulle quali si incentra la collaborazione tra Italia e Sudafrica.

All'interno del programma esecutivo, vengono selezionati programmi riguardanti la mobilità dei ricercatori, finanziati dal MAECI e dalla National Research Foundation (NRF) sudafricana, e progetti di Grande Rilevanza, programmi ritenuti significativi per i rapporti bilaterali, finanziati dal MAECI.

Per il 2014-2017, sono stati finanziati un programma di Grande Rilevanza *"Esplorando il cielo in banda radio sulla via di SKA. Dai buchi neri alle grandi strutture cosmiche: una visione multiscala dell'Universo."* PIs Prandoni (Italia)/Vaccari(SA) e uno per la mobilità *"Sinergie tra Italia e Sudafrica. Ammassi di galassie: un caso scientifico centrale per i precursori di SKA"* (Pis Venturi (Italia)/Bernardi (SA).

Per il 2018-2020, è stato finanziato un progetto di Grande Rilevanza *"Radio SKY 2020. Verso il consolidamento della collaborazione scientifica e tecnologica tra Italia e Sudafrica attraverso la Radioastronomia"* Pis Venturi (Italia)/Vaccari (SA). Il programma Radio SKY 2020, che verrà esteso anche al 2021, ha coinvolto 5 sedi INAF e 3 Università Italiane, con un budget di circa 80 kEuro/anno. Principali scopi del programma sono: assicurare il migliore sfruttamento possibile dei dati ottenuti mediante infrastrutture sudafricane, con particolare riferimento a MeerKAT, promuovendo sforzi comuni per lo sviluppo di tools di riduzione e analisi dati SKA-oriented; scambio di conoscenze per incentivare la costruzione, implementazione e gestione di antenne single-dish per il VLBI (progetto African VLBI Network); promuovere la collaborazione tra i gruppi italiani e sudafricani nel settore scientifico che tecnologico.

Un meeting telematico di Radio Sky 2020 è stato organizzato il 18/06/2020. Durante il meeting sono stati presentati i notevoli progressi e i risultati raggiunti nell'ambito del programma. Nella tavola rotonda finale si sono anche analizzate le azioni necessarie da intraprendere per organizzare in modo sempre più efficace la partecipazione Italiana ai futuri programmi esecutivi.

Sempre nel contesto della cooperazione nel settore scienza e tecnologia tra Italia e Sud Africa, l'ambasciata Italiana a Pretoria, in collaborazione con INAF e diversi partners Sud Africani, tra cui il Ministero della Scienza e Tecnologia, il South African Radio Astronomy Observatory (SARAO) che gestisce la partecipazione sudafricana in SKA, la NRS ed il Consorzio Inter-Universitario per la Data Intensive Astronomy -IDIA- ha organizzato un workshop a Pretoria, il 24-25 Ottobre 2018, presso la sede della National Research Foundation, dal titolo *"Italy-South Africa Radio Astronomy workshop Enhancing the collaboration in radio-astronomy between Italy and South Africa"*. L'incontro, incentrato su quattro macro-temi (osservazioni e la strumentazione SKA e VLBI; le sfide di SKA tra cui i BIG-DATA e il Cloud computing; le opportunità industriali; le collaborazioni bilaterali nel settore della formazione e dello sviluppo del capitale umano) è stato estremamente efficace ed ha inoltre promosso l'inizio di numerose collaborazioni tra i gruppi di ricerca italiani e sudafricani nel settore sia scientifico che tecnologico, vedi in particolare quelle illustrate nel precedente punto 2.2.

4 Il Progetto MK+

MeerKAT Extension (MK+) è un progetto di potenziamento del telescopio MeerKAT, inizialmente finanziato dal South African Radio Observatory (SARAO) e il Max-Planck Gesellschaft (MPG) Organization in Germania.

L'obiettivo del progetto è estendere il Radiotelescopio MeerKAT aggiungendo 20 antenne SKA (15m) alle attuali 64 antenne MeerKAT (13.5m).

Il progetto rappresenta un sostanziale aumento nelle capacità osservative di MeerKAT, con un aumento della sensibilità dovuto all'incremento della superficie di raccolta e un miglioramento del potere risolutivo dovuto all'ampliamento della massima baseline da 7.7km a 18km.

MeerKAT Extension verrà integrato in SKA1_MID e costituisce, quindi, il primo passo verso la costruzione del segmento a media frequenza di SKA.



Il dimostratore SKA-dish del Max Planck Dish al momento operativo presso il sito SKA sudafricano nel deserto del Karoo. L'antenna fornisce un bench mark nell'ambito del progetto MeerKAT +.

Credit: Gundolf Wieching / MPIfR- SARAO

4.1 Status

Dal dicembre 2020, INAF è ufficialmente partner del progetto MK+, dopo aver siglato un annex al "memorandum of agreement" firmato tra SARAO e MPG il 31.07.2019. In questo documento INAF si impegna a contribuire alle attività legate alla realizzazione di MK+, con

finanziamenti in cash e in kind. La comunità Italiana contribuirà fattivamente alla definizione del programma scientifico e avrà un coinvolgimento tecnologico in alcuni settori specifici (vedi 4.2). Al momento è in itinere la gara di appalto per la fornitura delle antenne a cui hanno risposto anche soggetti industriali italiani.

Si prevede di avviare le prime attività di installazione al sito entro il 2021, mentre l'integrazione e la fase di commissioning scientifico è prevista per il 2023

4.2 Tecnologia: Coinvolgimento Italiano

L'INAF in questi anni ha maturato conoscenze ed esperienza in settori strategici per lo sviluppo di array distribuiti sia a livello squisitamente tecnologico, come per esempio nel campo del controllo dei telescopi e calcolo avanzato per l'acquisizione dati, che in quello del data processing, fino all'analisi e la validazione scientifica del dato prodotto. Tale attività ha avuto un culmine nello sviluppo di strumenti nazionali (SRT) ed internazionali, soprattutto per quanto riguarda precursori e pathfinder di SKA (LOFAR, ASKAP e MeerKAT) e lo sviluppo ed il design di SKA.

Nel progetto MK+, l'Italia può dare un importante contributo in alcuni specifici settori in cui ha maturato e consolidato delle *expertise* riconosciute a livello mondiale. Queste riguardano attività sviluppate in ambito INAF ed aziendale.

Le aree di intervento, descritte in dettaglio più avanti sono relative a:

- Dish SKA in MeerKAT Extension;
- Correlatore digitale per l'array MeerKAT completo.

4.2.1 Dish SKA in MeerKAT Extension

Molte di queste attività sono state sviluppate durante la fase di *pre-construction* di SKA, dal 2013 al 2020. L'Italia ha infatti partecipato a quattro consorzi, quali SKA Dish Consortium (SKADC), Low Frequency Aperture Array (LFAA), Telescope Manager (TM) e Central Signal Processor (CSP).

Per quanto riguarda l'intervento italiano in ambito Dish, in alcune INAF ha sviluppato in toto le competenze ed avviato importanti collaborazioni sia con SARAO che con MPG. Altre sono di chiara competenza industriale, ma vedono INAF fortemente coinvolta sia per le *expertise* maturate in ambito radioastronomico, sia per la connessione con il tessuto industriale italiano e internazionale corroborata negli anni dai gruppi di ricerca.

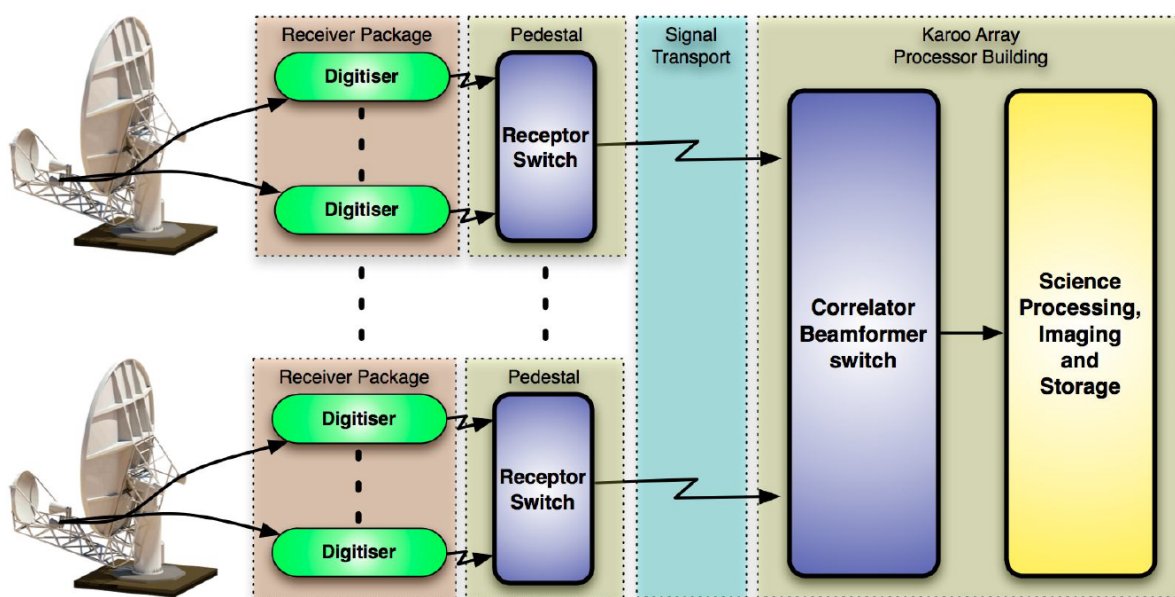
- a) **Feed Indexer.** All'interno del consorzio SKADC, aziende italiane hanno curato il design e successivamente sviluppato un prototipo di *Feed Indexer*, la cui funzione è quella di posizionare i feed dei ricevitori nel fuoco dell'antenna SKA. Considerato che le 20 antenne per MK+ sono antenne di design SKA, il *Feed Indexer* sarà replicato ed installato sulle antenne SKA d senza interventi onerosi aggiuntivi. INAF collabora al controllo del *Feed Indexer*, e ne ha seguito le implicazioni industriali sin dalla nascita del concept per SKA.

- b) **Componenti di antenna.** L'esperienza di INAF nella costruzione di radiotelescopi, nonché nella loro gestione e manutenzione, è indiscussa. Il coinvolgimento di aziende industriale le cui tecnologie sono allo stato dell'arte, forniscono all'opera un altissimo valore aggiunto dal punto di vista strutturale e funzionale.
- c) **LMC per Dish MK+.** Sempre in fase di pre-costruzione di SKA, all'interno del consorzio SKADC, INAF ha curato il design del sotto-elemento Local Monitor and Control (LMC) del Dish, che consiste, per ogni Dish dell'array, nell'hardware un computer industriale) e nel software di gestione, come interfaccia tra la strumentazione del Dish ed il controllo centralizzato dell'array. Il software è stato testato nei primi mesi del 2020 con il primo prototipo di antenna SKA (SKA-MPI) nel sito di Karoo in Sud Africa, in un test environment completo che comprende anche gli altri sotto-elementi del dish, quali i) il Single Pixel Feed (SPF) di SKA (banda 1 e 2), ii) il sistema della Dish Structure (DS) che comprende l'ACU, il Feed Indexer e la power distribution unit (PDU), iii) e i digitizer di Meerkat che inviano i segnali tramite fibra ottica all'unità centrale di correlazione dell'array. Durante questa fase si sono anche fatti i **primi test di integrazione del dish di SKA con il sistema di gestione dei telescopi di MeerKAT**. In particolare, in collaborazione con il team Meerkat al SARAO, è stata mostrata la capacità del LMC di SKA di interfacciarsi con il software di controllo di MeerKAT (CAM), primo ed importantissimo **passo verso MK+**. La realizzazione di LMC per i Dish di MK+ prevede però alcune modifiche rispetto al design SKA. Infatti, pur essendo i Dish di MK+ dei dish SKA, il sistema di controllo e di trasmissione dati al correlatore è quello MeerKAT. Questo comporta i) un diverso interfacciamento col sistema centrale (CAM), già testato in fase di integrazione; ii) una modifica del software per abilitare il controllo ed il monitoraggio del ricevitore S-band di MeerKAT; iii) il supporto del team INAF per lo sviluppo, l'ingegnerizzazione del software, la sua integrazione nel sistema MeerKAT e l'early operation nei 20 dish SKA in MK+; iv) il procurement dell'hardware per LMC, che consiste nell'acquisto, trasporto ed installazione di 20 PC (+2 spares) di tipo industriale adeguati allo scopo, nei pedestal dei dish SKA in MeerKAT.
- d) **ACU open source.** All'interno di una collaborazione con industrie italiane, si sta valutando la possibilità di un programma congiunto per lo sviluppo un software di ACU dell'antenna open source, ovvero senza alcuna licenza o proprietà intellettuale legata ad un prototipo commerciale. Attualmente l'ACU è sviluppata da MTM con software proprietari, ma la sua costruzione con software open source, che tra l'altro è un requisito SKA, consente una ottima fase di ingegnerizzazione del software ed una notevole semplificazione delle attività di manutenzione, compreso un certo abbattimento dei costi.
- e) **Sviluppo di un sistema di test bench per il software di LMC e ACU.** È previsto lo sviluppo di un test-bench automatizzato per testare le funzionalità del LMC e del software dell'ACU (punti c, d) e garantire così una semplificazione delle attività di manutenzione del software a medio-lungo termine, nonché la sperimentazione dei tools nella fase di deploy del software nel breve periodo.

4.2.2 Sviluppo e realizzazione di un nuovo correlatore per Extended MeerKAT

A fine 2019, è iniziata una collaborazione fra l'INAF e il SARAO per la realizzazione di un nuovo correlatore per l'Extended MeerKAT (MK+). Gli istituti INAF coinvolti sono quelli di Cagliari, Catania e IRA Bologna/Medicina.

L'attuale correlatore per MeerKAT utilizza, come motore unico di processing, 288 schede SKARAB [Square Kilometre Array Reconfigurable Application Board] basate su FPGA Xilinx Virtex 7, con tecnologia 28 nm. Le schede SKARAB disponibili sarebbero in teoria sufficienti per gestire l'upgrade da 64 a 84 antenne, tuttavia l'intero design è stato concepito per gestire un numero di antenne multiplo di 2, quindi non compatibile con le 84 previste per MK+.



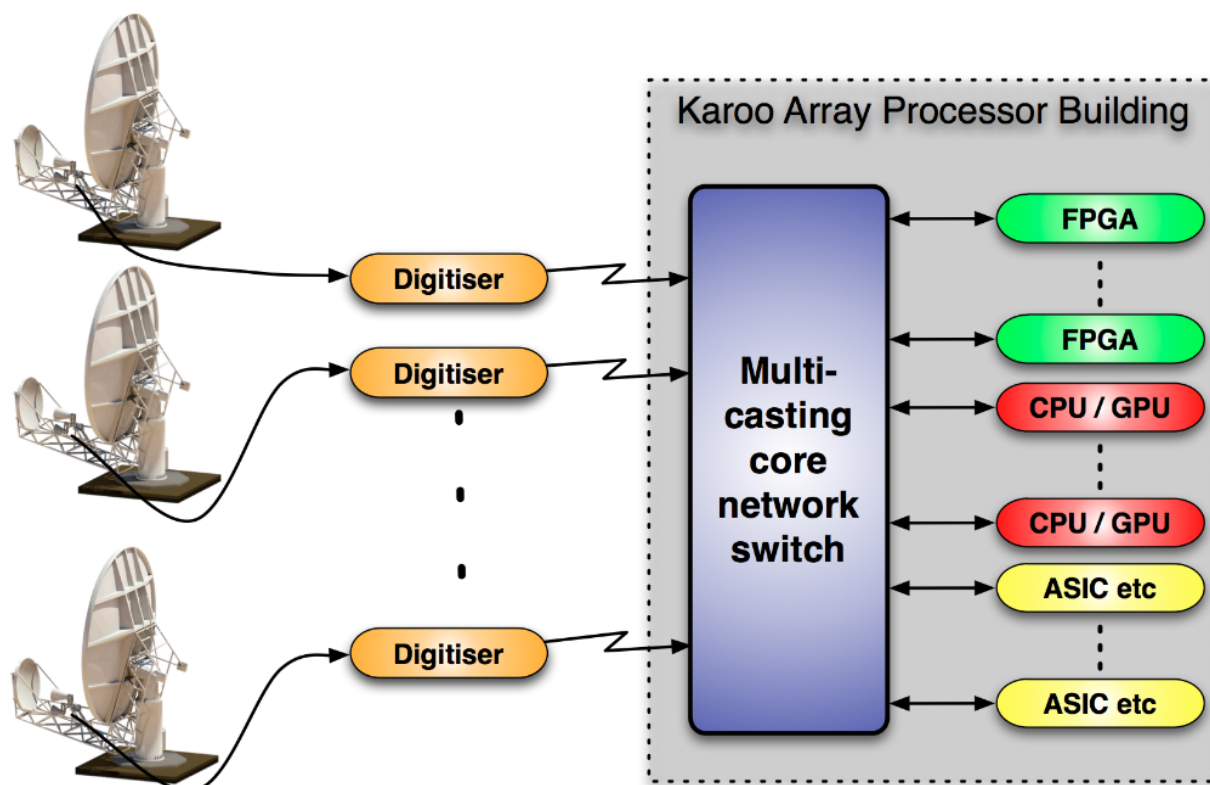
Schema a blocchi del correlatore dell'attuale MeerKAT

Si è quindi deciso di riprogettare completamente il correlatore, sia per le esigenze attuali di MK+, sia in ottica SKA; l'obiettivo è quello di sviluppare un sistema completamente scalabile, che prescindendo dal numero di antenne, in modo che sia perfettamente compatibile con le richieste computazionali previste per SKA. La stima prevista per il completamento del nuovo correlatore è la metà 2024.

Rispetto alla scelta di utilizzare la sola tecnologia FPGA per tutti gli stadi di digital signal processing (F-engine, X-engine e B-engine), per MK+ si è condotta una profonda analisi di quello che offre il mercato per individuare la soluzione migliore in termini di prestazioni, costo, consumo di potenza e scalabilità. Infatti, al giorno d'oggi, nel tentativo di aumentare la potenza di calcolo, si stanno affermando dispositivi eterogenei basati sulla interazione di strumenti di natura diversa (FPGA, GPU, CPU) capaci di rendere efficienti le operazioni legate alla correlazione dei segnali, nell'ottica di parallelizzare il calcolo stesso.

Dispositivi di questo tipo sono in fase di rilascio da parte di grandi aziende del settore (Xilinx, Altera), e sono destinati ad avere costi sempre più contenuti grazie all'impiego legato all'IoT o alle tecniche di AI, utilizzate ormai anche dalla comunità astrofisica.

Le soluzioni sotto indagine per MK+ sono state molteplici. Il lavoro è stato diviso in work packages (WPs), con l'obiettivo di svolgere approfondite analisi indipendenti circa vantaggi e svantaggi di ciascuna tecnologia rispetto ad un'altra; INAF è coinvolto in diversi di questi WPs, tra cui quelli riguardanti le FPGA, le GPU, le Versal ACAP (Adaptive Compute Acceleration Platform) e l'analisi delle soluzioni di cooling più adatte a gestire tale rinnovata potenza di calcolo.

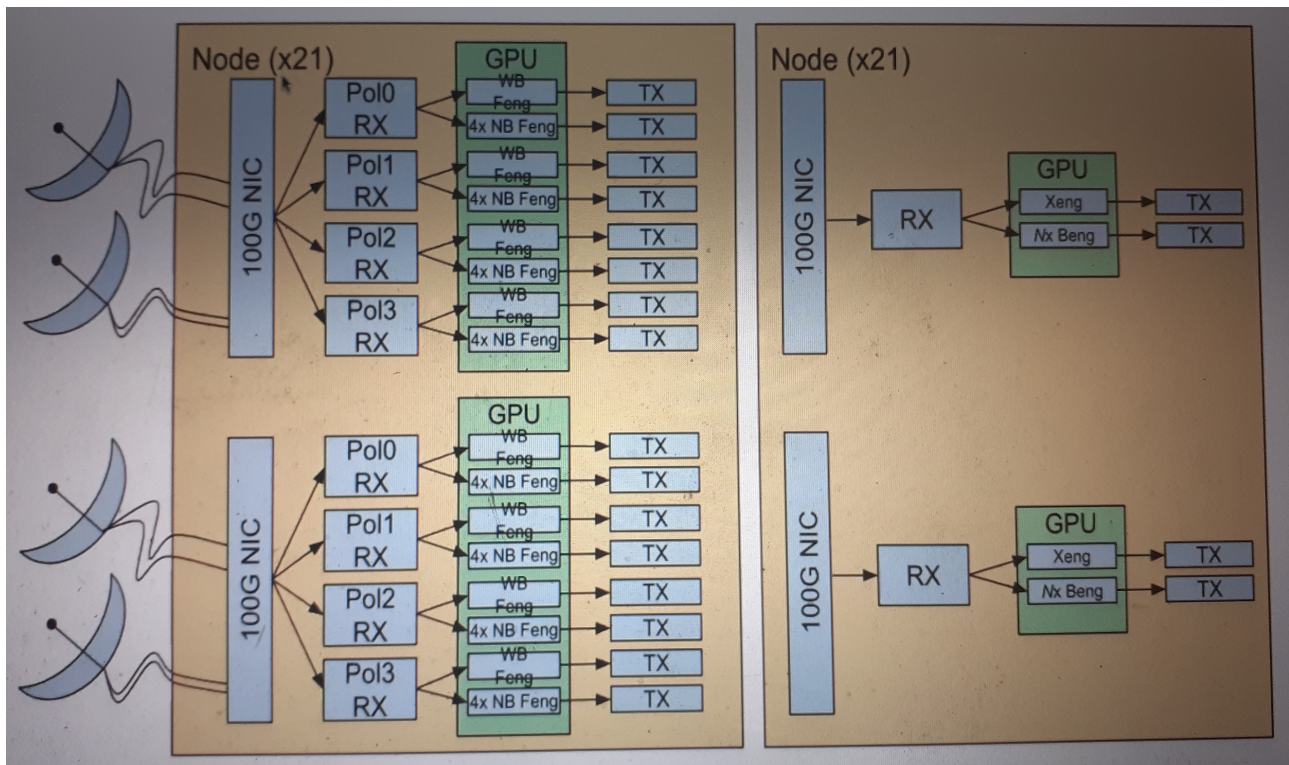


Schema a blocchi del correlatore per MK+

Lato FPGA si stanno indagando due differenti boards, entrambe basate su Virtex Ultrascale+ della Xilinx con tecnologia 16 nm: la scheda acceleratrice Alveo U50 e la scheda acceleratrice Alveo U280, entrambe prodotte dalla Xilinx stessa. INAF ha acquistato 4 modelli di Alveo U50 e 1 di Alveo U280. Nel 2021 verranno inoltre commercializzate le schede Alveo U55c, che combinano le potenzialità dei modelli U50 e U280 e che sono le principali candidate per l'implementazione del blocco F-engine del correlatore, ossia la canalizzazione dei 168 segnali a larga banda forniti (già in formato digitale) dalle 84 antenne. L'attività principale, al momento, è la piena fruibilità delle board Alveo nell'ambiente CASPER (Collaboration for Astronomy Signal Processing and Electronic Research) e l'implementazione del canalizzatore nel Toolflow; sono però previsti test intensivi dal punto di vista della potenza dissipata e delle prestazioni a pieno carico.

Lato GPU, è stata individuata la scheda RTX 3080 quale candidata unica per gli altri due stadi principali del correlatore: la correlazione fra tutte le antenne (X-Engine) e la creazione del/dei beam (B-Engine). Sono in corso diverse verifiche di implementazione anche del motore F-Engine su GPU, al fine di valutare la reale fattibilità di un correlatore interamente basato su GPU; tuttavia, i

limiti dell'I/O costituiscono ancora un collo di bottiglia, superabile (probabilmente) solo con nuovi modelli ancora non disponibili. Di seguito uno schema a blocchi con possibile implementazione solo su GPU:

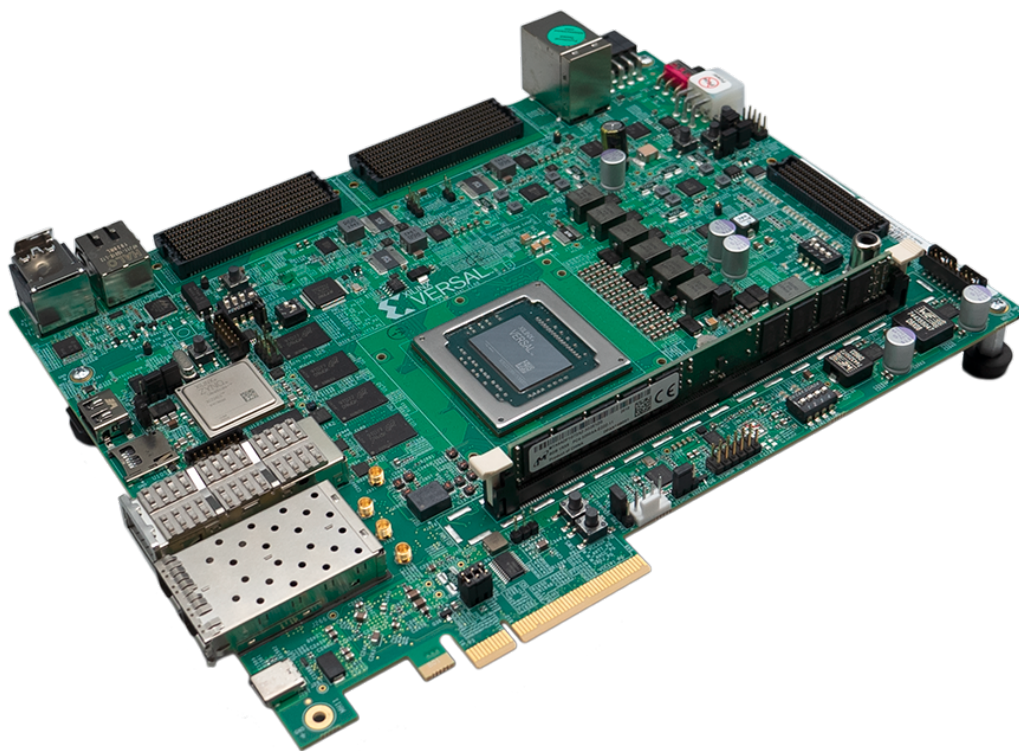


Possibile schema a blocchi del correlatore implementato su GPU

Il sistema sarà composto da 42 super server del modello Supermicro 4124GS-TNR (<https://www.supermicro.com/en/Aplus/system/4U/4124/AS-4124GS-TNR.cfm>) ciascuno contenente due GPU RTX 3080 o due Alveo board per l'F-engine e due GPU RTX 3080 per X-engine e B-engine. INAF ha acquistato due di questi server e ordinato diversi modelli di RTX 3080 su cui sono previsti test prestazionali e di water cooling per le GPU, nonché test prestazionali e possibili soluzioni di cooling per le schede Alveo.

Le Versal ACAP sono senz'altro il futuro. Si basano su tecnologia a 7 nm e si preparano a rivoluzionare il mercato per le loro prestazioni; appaiono assolutamente indicati per un sistema di correlazione su piattaforma ibrida, sulla quale è possibile implementare algoritmi di Machine Learning ed in generale di AI.

Di recente la Xilinx ha rilasciato il primo evaluation kit (<https://www.xilinx.com/products/boards-and-kits/vck190.html>):



Versal AI Core Series VCK190 Evaluation Kit

Entro il 2021 verranno acquistate due di queste board per valutarne le prestazioni e i possibili benefici. Tale attività è condotta in sinergia col progetto MOSAICO, e i risultati saranno molto preziosi anche in prospettiva SKA.

Per concludere, la piena partecipazione di INAF alla realizzazione del nuovo correlatore sarà di notevole importanza anche da un punto di vista prettamente scientifico. Le modalità osservative da sviluppare e poi offrire saranno discusse in dettaglio con i radio astronomi italiani e sudafricani, e l'importante fase di commissioning tecnico/scientifico dello strumento potrà garantire ai radio astronomi INAF un accesso "anticipato" al MK+.