



# La radioastronomia all'Osservatorio di Arcetri: le antenne italiane, ALMA e SKA

*Radioastronomy at Arcetri Observatory: Italian antennas,  
ALMA and SKA*

Gianni Comoretto  
INAF – Osservatorio Astrofisico di Arcetri

**Riassunto.** La radioastronomia ad Arcetri inizia negli anni '50 con i primi radiotelescopi solari. Dagli anni '80 il gruppo si è specializzato nel disegno di sistemi di ottica elettromagnetica e nelle tecniche di processamento di segnali radio, contribuendo a diversi ricevitori e spettrometri per le antenne italiane e per satelliti astronomici, ed a correlatori in grandi interferometri come ALMA e SKA.

**Parole chiave.** Radioastronomia, radiotelescopi, antenne, correlatori.

Arcetri ha una lunghissima tradizione di osservazioni radioastronomiche. Negli anni '50 il direttore Guglielmo Righini pensò di affiancare le osservazioni ottiche del Sole a osservazioni nelle bande radio. Dopo primi prototipi realizzati con dipoli e reti da pollaio, nel 1957 venne costruito il primo vero radiotelescopio italiano, con un array di 5 antenne elicoidali montato su una struttura equatoriale (Fig. 1). Lo strumento, costato 10 milioni di lire dell'epoca, aveva una sensibilità

**Abstract.** Radioastronomy at Arcetri began in the '50s, with the first solar radiotelesopes. As of the '80s, the radioastronomy group focused on digital signal processing techniques and the design of electromagnetic optical components. It contributed to several receivers and spectrometers for Italian antennas and for astronomic satellites and to correlators for large interferometers like ALMA and SKA.

**Keywords.** Radioastronomy, radiotelesopes, antennas, correlators.

Arcetri has a long-standing history of radioastronomical observations. In the '50s, Director Guglielmo Righini advanced the idea of observing the Sun, not only in visible light, but also in the radio band. After the first prototypes built with dipoles and chicken wire, the first real Italian telescope was built in 1957, made up of an array of 5 helix antennas on an equatorial mount (Fig. 1). The instrument, which cost 10 million Italian lire, was sensitive enough to reliably measure the radio flux of the quiet sun. In 1959, it was joined by a dish measuring two

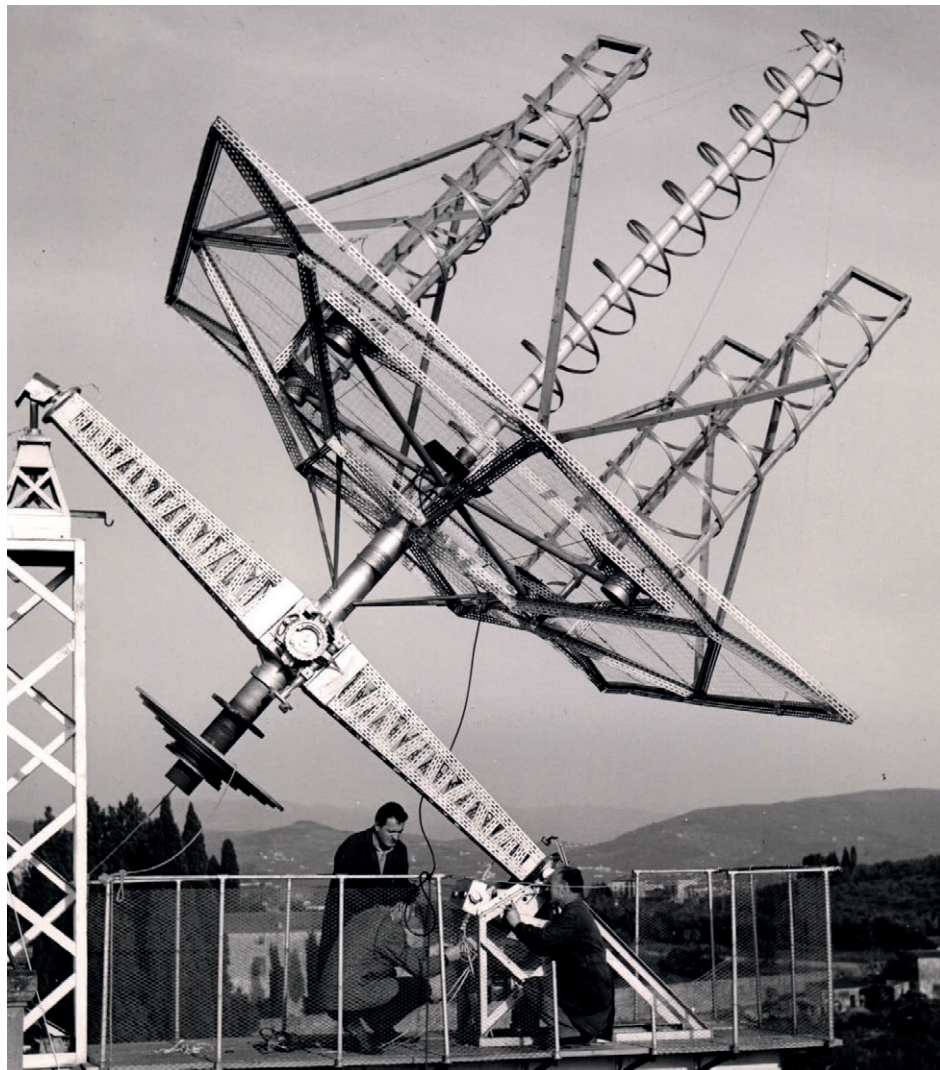


Figura 1. Il primo radiotelescopio di Arcetri nel 1957 (crediti: Archivio fotografico OAA).  
Figure 1. The first radiotelescope at Arcetri in 1957 (credits: Photographic Archives OAA).

sufficiente a misurare il flusso del Sole quieto. Nel 1959 gli si affiancò una parabola di 2 metri di diametro, operante a 10 GHz. Per ottenere una risoluzione sufficiente a risolvere l'immagine del Sole vennero costruite nuove antenne paraboliche: una prima di 5 metri a 1400 MHz, a cui fu affiancata una piccola antenna laterale in configurazione interferometrica. Nel 1962 si concluse la costruzione di una seconda antenna parabolica di 10 metri di diametro, con un ricevitore a 10 GHz costruito da Gianni Tofani e Paolo Pampaloni, rimasta operativa fino al 1998, ed immortalata nel retro della banconota da 2000 lire dedicata a Galileo. Questi strumenti verranno utilizzati principalmente per osservazioni solari, ma il 10 metri aveva una sensibilità sufficiente per osservare altri tipi di sorgenti astronomiche.

Negli anni '60 furono lanciati dagli USA satelliti della famiglia Solrad in grado di osservare il Sole nella banda dei raggi X. Righini comprese e sfruttò questa opportunità scientifica, realizzando sistemi di ricezione della telemetria per questi satelliti, con antenne ad hoc e successivamente installando 16 antenne Yagi sul perimetro del parabolone di 10 metri. Con quest'ultimo sistema, e utilizzando un ricevitore Microdyne, nel 1969 si riuscì ad ascoltare in diretta le voci degli astronauti dallo sbarco sulla Luna dell'Apollo 11.

Nel 1974 Gianni Tofani e Marcello Felli visitarono l'università di Stanford, dove iniziarono ad osservare regioni HII in banda radio. Nacque quello che poi diverrà il gruppo di formazione stellare, per 20 anni sostanzialmente integrato nel gruppo di radioastronomia con un fruttuosissimo scambio tra aspetti tecnologici ed osservativi/teorici, sia nel radio che nell'infrarosso. A questo nuovo campo di indagine diede un notevole impulso la direzione di Franco Pacini.

metres in diameter, operating at 10 GHz. To obtain a resolution sufficient to resolve the image of the Sun, new dishes were built: a first one measuring 5 metres at 1400 MHz, with a small side dish in an interferometric configuration. In 1962, the construction of a second 10-metre dish was completed, with a 10 GHz receiver built by Gianni Tofani and Paolo Pampaloni. This telescope remained operational until 1998 and was pictured on the back of the 2000 lire banknote dedicated to Galileo. These instruments were used mainly for solar observations but the 10-metre dish was sensitive enough to detect other astronomical sources.

In the 1960s, the US launched a family of satellites (Solrad) capable of observing the Sun in X rays. Righini understood and exploited this scientific opportunity. He built and installed telemetry receivers for these satellites, with dedicated antennas, and subsequently installed 16 Yagi antennas on the perimeter of the 10-metre dish. With the latter system and using a Microdyne receiver, it was possible, in 1969, to listen live to the voices of the astronauts engaged in the Apollo 11 moon landing.

In 1974, Gianni Tofani and Marcello Felli visited Stanford University, where they began to observe HII regions in the radio band: what would later become the star formation group was born. For the next 20 years, the observative and technological groups were strongly integrated, with a very fruitful exchange between technological and observational/theoretical aspects, both in radio and infrared. The direction of Franco Pacini strongly boosted this new field of investigation.

In 1978, the Institute of Radio Astronomy (then part of the Italian CNR) proposed the construction of two 32-metre radio telescopes, located in Medicina and Noto, to be part of the

Nel 1978 l'Istituto di Radioastronomia (allora parte del CNR) propose la costruzione di due radiotelescopi da 32 metri, da integrare alla rete VLBI europea, posti a Medicina e Noto. Il gruppo di Arcetri si propose come partner di questo progetto, acquisendo nuovo personale e competenze. In particolare iniziò a specializzarsi in quelli che saranno sempre i suoi punti di forza: la progettazione e realizzazione di ottica elettromagnetica, come *feed*, polarizzatori, trasduttori di modo (G. Tofani, M. Catarzi) e le tecniche di processamento digitale dei segnali radio, con il primo spettrometro a 50 MHz di banda poi usato per osservazioni di transizioni molecolari (G. Comoretto, F. Palagi). Arcetri ha avuto in carico il progetto e realizzazione dei *feed* e relativi componenti elettromagnetici per quasi tutti i ricevitori installati a Medicina e Noto e dell'integrazione e criogenia per alcuni di questi, e realizzò il software di puntamento e gestione delle osservazioni del radiotelescopio di Medicina. Negli stessi anni Arcetri acquisì la gestione del telescopio infrarosso del Gornergrat (TIRGO), formalmente con la creazione del CAISMI-CNR. Tra i gruppi strumentali radio e infrarosso e il dipartimento di Astronomia dell'Università di Firenze iniziò una strettissima collaborazione relativa alle competenze di tecniche criogeniche, elettronica e software, e integrando osservazioni radio ed infrarosse. Alcuni strumenti dell'epoca si ritrovano con un collage di etichette di inventario dei tre enti.

L'attività osservativa negli anni tra il 1985 ed il 2000 riguardò soprattutto l'utilizzo delle antenne di Medicina e Noto, con la realizzazione di un catalogo dei maser dell'acqua galattici, diventato una base per gli studi del settore, il monitoraggio di un sottoinsieme di questi che andrà avanti per 25 anni, ed osservazioni

European VLBI network. The Arcetri group launched a partnership in this project, enlisting new people and the necessary skills. It began specializing in what will always be its strengths: the design and construction of electromagnetic optics, such as feeds, polarizers, orthomodes (G. Tofani, M. Catarzi) and digital radio signal processing techniques, with the first 50 MHz bandwidth spectrometer used to observe molecular transitions (G. Comoretto, F. Palagi). Arcetri was responsible for the design and implementation of the feeds and related electromagnetic components for almost all the receivers installed in Medicina and Noto, and for the integration and cryogenics for some of these. It also wrote the software for pointing and managing the observations of the Medicina radio telescope.

During those same years, Arcetri took charge of the TIRGO infrared telescope, formally with the creation of the CAISMI-CNR. A very close collaboration began between the radio and infrared groups and the Astronomy Department of the University of Florence, working on cryogenic techniques, electronics and software, and integrating radio and infrared observations. Some of the instruments built at the time ended up with a collage of inventory labels from the three institutions.

Between 1985 and 2000, the observational activity was devoted mainly to the use of the Medicina and Noto antennas: the creation of a catalog of galactic  $\text{H}_2\text{O}$  masers which became a basis for studies in the sector, the monitoring of a subset of these, to be continued for 25 years, and observations of methanol masers (F. Palagi, L. Moscadelli), for which a dedicated receiver was built. Several molecular species were observed in collaboration with the Insti-

del maser del metanolo (F. Palagi, L. Moscadelli), per cui verrà costruito un ricevitore dedicato. In collaborazione con l'Istituto di Spettroscopia Molecolare del CNR si osservarono varie specie molecolari in nubi interstellari: nasceva l'attività di astrochimica, con Claudio Codella e Paola Caselli.

Nel 1987 iniziò la collaborazione con il gruppo di Radio Science diretto da Bruno Bertotti: venne sviluppato il primo ricevitore digitale italiano, impiegato per *tracking* Doppler di precisione di sonde interplanetarie, ed un *transponder* a 32 GHz (banda Ka), realizzato dalla ditta SMA, che volerà sulla sonda Cassini. L'obiettivo, molto ambizioso (e non raggiunto), era quello di rivelare onde gravitazionali usando una sonda a qualche ora luce dalla Terra come massa libera. Il sistema comunque consentì di effettuare le misure più precise mai realizzate per il ritardo relativistico del segnale radio nella buca di potenziale gravitazionale del Sole. La collaborazione continuò, in modo sporadico, fino ad oggi, nella realizzazione di sistemi di misura Doppler per l'ESA.

Nel 1998 l'Osservatorio di Arcetri si propose ad ESO per contribuire al nascente interferometro millimetrico ALMA, relativamente ai *feed* per le bande fino a 100 GHz, e con un interesse verso il correlatore. Il progetto di quest'ultimo era già in fase avanzata, per cui un consorzio comprendente Arcetri, IRAM (Francia), l'Osservatorio di Bordeaux e ASTRON (Olanda) esplorò idee per un correlatore successivo, che sarebbe potuto divenire operativo dopo una decina d'anni. Una di queste idee, proposta e sviluppata dal gruppo di Arcetri, risultò immediatamente applicabile al disegno esistente: sostituendo una scheda di filtro digitale con un sistema di 32 ricevitori digitali indipendenti fu possibile incrementare di 32 vol-

tute of Molecular Spectroscopy of the CNR: the astrochemical activity was born, with Claudio Codella and Paola Caselli.

1987 marked the start of the collaboration with the Radio Science group directed by Bruno Bertotti. Arcetri developed the first Italian digital receiver, which was used for the precision Doppler tracking of interplanetary probes, and a 32 GHz transponder (Ka band), built by the SMA industry, which was flown on the Cassini spacecraft. The very ambitious (but unfortunately unfulfilled) goal was to detect gravitational waves using a probe a few light hours from Earth as free mass. However, the system allowed the most precise measurements ever taken for the relativistic delay of the radio signal in the gravitational well of the Sun. The collaboration has continued, sporadically, to the present day, working on the creation of Doppler measurement systems for ESA.

In 1998, the Arcetri Observatory approached ESO about contributing to the new ALMA millimeter interferometer, regarding the design of feeds for bands up to 100 GHz, and with an interest in designing the correlator. The correlator was already in the advanced design stages so a consortium including Arcetri, IRAM, the Bordeaux Observatory and ASTRON explored ideas for a state-of-the-art correlator, to become operational about ten years later. One of these ideas, proposed and developed by the Arcetri group, was applied immediately to the existing design: by replacing a digital filter card with a system of 32 independent digital receivers, it was possible to increase the spectral resolution of the instrument 32 fold, and to analyze larger sub-portions of the band observed, allowing simultaneous observation of mul-



te la risoluzione spettrale dello strumento, ed analizzare a risoluzione maggiore sotto-porzioni della banda osservata, permettendo l'osservazione simultanea di più righe molecolari (Fig. 2). La modifica venne immediatamente accettata da ESO, che la propose come contributo europeo al correlatore. Questo disegno di un "correlatore ibrido" con una struttura di canalizzazione in frequenza a due stadi è attualmente uno standard diffuso in molti correlatori esistenti.

Nei primi anni 2000 il gruppo partecipò al progetto del nuovo radiotelescopio Sardinia Radio Telescope (SRT). Gianni Tofani, che nel frattempo aveva assunto la direzione dell'Istituto di Radioastronomia, contribuì in collaborazione con l'Università di Firenze al disegno elettromagnetico della parabola e del complesso sistema ottico. Venne realizzato un ricevitore a 7 pixel a 18-26 GHz, che richiese lo studio di una finestra da vuoto di grandi dimensioni, con uno spettropolarimetro digitale a 16 ingressi che sfruttò l'esperienza fatta con il correlatore di ALMA. Si sperimentarono inoltre filtri superconduttori, in grado di eliminare interferenze radio senza introdurre rumore termico. Questi strumenti costituiranno il ricevitore di prima luce dopo l'inaugurazione del telescopio, avvenuta nel 2013.

Tra il 2000 ed il 2010 il gruppo ha partecipato allo sviluppo di strumenti per esperimenti da satellite, contribuendo alla realizzazione dello spettrometro acusto-ottico HiFi per il satellite Herschel (E. Natale), con un ulteriore contributo al relativo software di riduzione dati (A. Lorenzani), ed al progetto elettromagnetico dei *feed* nelle bande tra 27 e 77 GHz del *Low Frequency Instrument* del satellite Planck. Nello stesso periodo ha contribuito allo sviluppo di un nuovo tipo di ricevitore che utilizzava la tecnica dei *phased array feed* (PAF), e che servirà da

multiple molecular lines (Fig. 2). The alteration was immediately accepted by ESO, who proposed it as a European contribution to the correlator. This "hybrid correlator" design with a two-stage frequency channeling structure is now a widespread standard in many existing correlators.

In the early 2000s, the group took part in the project for the new SRT radio telescope. Gianni Tofani, who in the meantime had taken over the direction of the Institute of Radio Astronomy, contributed in collaboration with the University of Florence to the electromagnetic design of the parabola and the complex optical system. An 18-26 GHz 7-pixel receiver was built, requiring the study of a large vacuum window, with a 16-input digital spectropolarimeter which exploited the experience gained with the ALMA correlator. Superconducting filters, capable of eliminating radio interference without introducing thermal noise, were also tested. These instruments made up the receiver for the first light observations, following the inauguration of the telescope in 2013.

Between 2000 and 2010, the group also participated in the construction of the HiFi acousto-optic spectrometer for the Herschel satellite (E. Natale), with a further contribution to the relative data reduction software (A. Lorenzani), and in the design of the feeds for the Low Frequency Instrument in the Planck satellite, in the bands between 27 and 77 GHz. At the same time, it contributed to the design of a new kind of receiver based on phased array technology. This experience served as the basis for work on SKA's phased array feeds. Due to several retirements and the impossibility of offering young researchers stable positions, the group shrank in size, and in 2013 or thereabouts, the work was carried out by just three scientists and three technicians.

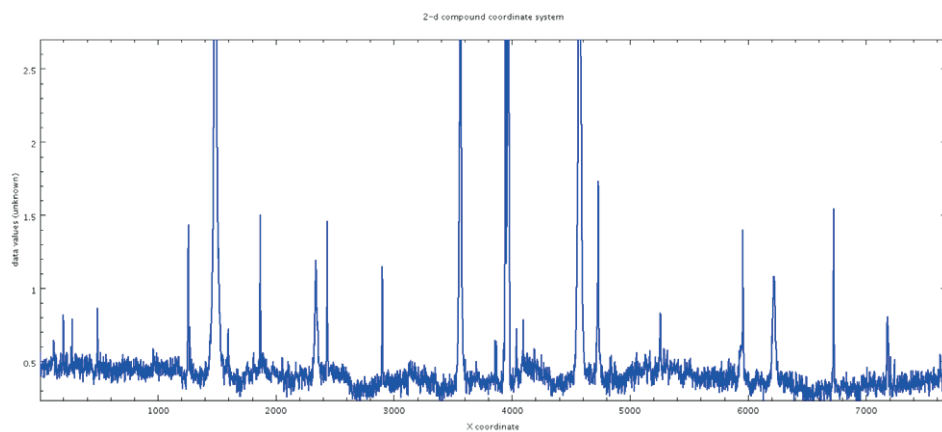


Figura 2. Sopra: il correlatore di ALMA. Sotto: la prima osservazione di righe molecolari in Orione, con 8000 canali spettrali.

Figure 2. Above: the ALMA correlator. Below: the first observation of molecular lines in Orion, with 8000 spectral channels (credits: G. Comoretto).

base per l'attuale lavoro sui *phased array feed* di SKA. In questi anni il gruppo, a causa di diversi pensionamenti e dell'impossibilità di fornire posizioni stabili ai giovani ricercatori che ci si avvicendarono, si ridusse numericamente: intorno al 2013 il lavoro era portato avanti solamente da 3 scienziati e 3 tecnici.

Nel 2018 iniziò il progetto PON Ricerca e Innovazione 2014-2020 per il potenziamento di SRT. Dei 9 obiettivi realizzativi del progetto, due hanno un PI nel gruppo di Arcetri: il sistema di *back end* digitali (G. Comoretto), ed un ricevitore in grado di ricevere simultaneamente 3 bande di frequenza (P. Bolli). Arcetri è significativamente presente in altri 3 obiettivi, relativamente a due ricevitori multi-pixel e al sistema di calcolo. Arcetri ha contribuito a quasi tutti i ricevitori attualmente in funzione a SRT. Per i nuovi ricevitori multi-pixel sono state studiate tecniche per semplificare la costruzione di *feed* e polarizzatori, riducendone il costo in una produzione in serie, ed utilizzate nel ricevitore nella banda Q (33-50 GHz) a 19 pixel del PON.

Nel 2013 il gruppo entrò a far parte del consorzio per il correlatore di SKA. Al progetto si associarono Carlo Baffa ed Elisabetta Giani, che contribuiranno in modo importante al software di gestione. SKA è composto da due telescopi indipendenti, rispettivamente a bassa (fino a 350 MHz) e alta frequenza. Arcetri ha contribuito con diversi elementi ad entrambi i correlatori, ma dopo il 2015 si è spostato sul sistema di *beamforming* del telescopio *low*, e sullo studio teorico/simulativo delle caratteristiche del sistema digitale. Pietro Bolli, trasferito in quegli anni a Firenze, iniziò a studiare le antenne per questo elemento. Il gruppo acquisì Carolina Belli (ingegnere di sistema), Simone Chiarucci (modellizzazione del se-

The 2014-2020 PON Research and Innovation project for the enhancement of SRT was launched in 2018. Of the project's nine goals, two have a PI in the Arcetri group: the digital back-end system (G. Comoretto), and a receiver capable of simultaneously receiving three frequency bands (P. Bolli). Arcetri is significantly present in three more goals, relating to two multi-pixel receivers and the computing system. Arcetri has contributed to nearly all the receivers currently in operation at SRT. In particular, for the 19-pixel PON Q-band receiver (33-50 GHz), techniques have been studied to simplify the construction of feeds and polarizers, reducing their cost in mass production.

In 2013, the group joined the SKA correlator consortium. Carlo Baffa and Elisabetta Giani joined the project, contributing significantly to the operating software. SKA consists of two independent telescopes, at low (up to 350 MHz) and high frequency respectively. Arcetri contributed various elements to both correlators but after 2015, the activity moved to the beamforming system of the low telescope and to the theoretical study/simulation of the characteristics of the digital system. Pietro Bolli, who moved to Florence around about then, began studying antennas for this element. The group engaged Carolina Belli (system engineering), Simone Chiarucci (signal modeling), and Paola Di Ninni (antenna simulations). This, together with the consistent group of the Institute of Radio Astronomy, which had already been working on the project for years, and the IASF in Milan, formed a very robust group, capable of taking charge of the complete design and construction of the low aperture array system, made up of 131 thousand antennas, receivers and the demanding digital signal processing system.



gnale), Paola Di Ninni (simulazione di antenne). Assieme al consistente gruppo dell'Istituto di Radioastronomia, che già lavorava da anni al progetto, e dell'IASF di Milano si formò così un gruppo molto solido, in grado di prendere in carico in modo completo il disegno e la realizzazione di tutto il sistema del *Low Frequency Aperture Array*, composto da 131 mila antenne e ricevitori e dell'impegnativo sistema di *signal processing* digitale.

Oggi e nei prossimi anni l'impegno del gruppo sarà soprattutto rivolto a SKA. Per ALMA Arcetri è coinvolta nella realizzazione di un ricevitore tra 67 e 116 GHz (banda 2+3) con un sistema di *feed* che, grazie alle competenze in progettazione elettromagnetica, permette di risparmiare un ricevitore coprendo 2 bande. È stata approvata nell'ambito del PNRR la realizzazione di una camera anecoica di grandi dimensioni, che diventerà una *facility* nazionale per il test di antenne.

**Gianni Comoretto** lavora dal 1982 nel gruppo di radioastronomia di Arcetri, che dirige dal 2006. Si è occupato principalmente dello sviluppo di strumentazione ed algoritmi per l'acquisizione e l'analisi di dati astronomici e di software di controllo.

Today and in the years to come, the group will be committed mainly to SKA. Arcetri is involved in the creation of a receiver between 70 and 115 GHz (band 2+3) for ALMA, with a feed system which, thanks to its electromagnetic design expertise, saves a receiver by covering two bands. The construction of a large anechoic chamber approved within the framework of the PNRR will provide a national facility for testing antennas.

Gianni Comoretto joined the Arcetri radioastronomy group in 1982 and has led it since 2006. His main interests are the design and construction of radio and infrared instrumentation, radio signal processing algorithms and data analysis, as well as instrumentation control software.