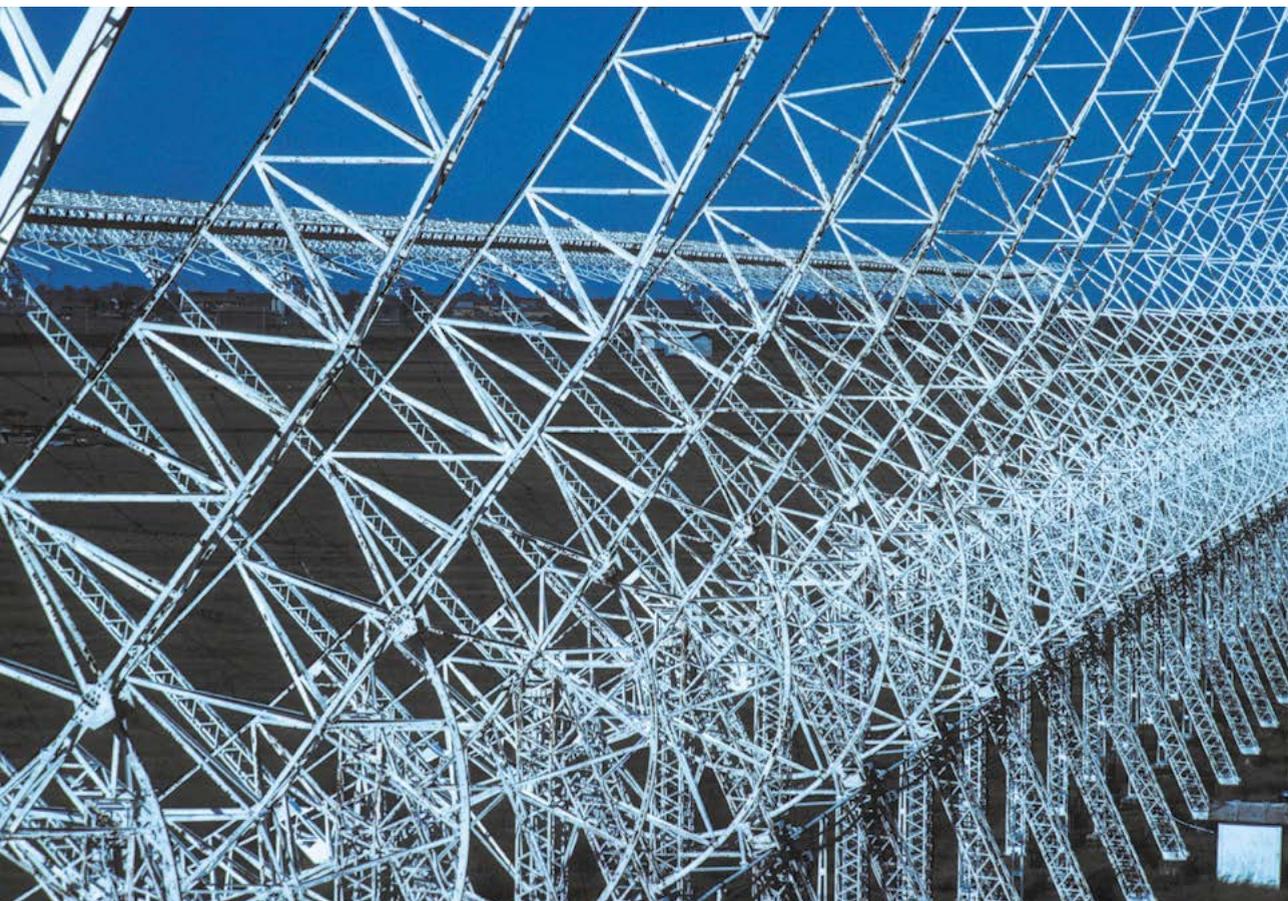


Loretta Gregorini - Luigina Feretti - Gabriele Giovannini
Franco Mantovani - Paola Parma - Giampaolo Vettolani



Perché non costruisci un radiotelescopio?

Quarant'anni di Radioastronomia a Bologna

Loretta Gregorini, Luigina Feretti, Gabriele Giovannini
Franco Mantovani, Paola Parma, Giampaolo Vettolani

Perché non costruisci un radiotelescopio?

Quarant'anni di Radioastronomia a Bologna

Bononia
University Press

© 2021 Bononia University Press

Bononia University Press
Via Ugo Foscolo 7 – 40123 Bologna
tel. (+39) 051 232 882
fax (+39) 051 221 019

www.buonline.com
email: info@buonline.com

I testi sono pubblicati sotto licenza Creative Commons BY-NC-SA 4.0

Immagini a corredo del testo © come indicato in didascalia

ISBN: 978-88-6923-776-8
ISBN online: 978-88-6923-801-7

In copertina: Particolare del ramo Est-Ovest del radiotelescopio Croce del Nord (Medicina, Bologna)

Impaginazione: Angelica Vio

Prima edizione: maggio 2021

« In un mondo in cui si è tentati di dimenticare
o ignorare troppo, la riconquista del nostro passato
collettivo dovrebbe essere tra i primi progetti
per il nostro futuro »

(Umberto Eco, *lectio* “Contro la perdita della memoria”,
Nazioni Unite, New York, 21 ottobre 2013)

Sommario

Prefazione	7
1. Dalla Croce del Nord al Laboratorio di Radioastronomia	9
1.1 Gli inizi	9
1.2 Il gruppo ROUB e il ramo Est-Ovest della Croce del Nord	14
1.3 La Croce del Nord e i cataloghi di radiosorgenti	23
1.4 Impatto del catalogo B2	26
1.5 Identificazione ottica di radiosorgenti	28
1.6 La ricerca di quasar radioquieti	30
2. Dal Laboratorio di Radioastronomia all'Istituto di Radioastronomia del CNR	33
3. Scienza con la Croce del Nord	41
4. Scienza con i moderni interferometri: il WSRT, il VLA e l'ATCA	47
4.1 Radiogalassie	47
4.2 Ammassi di galassie	50
4.3 Survey di radiosorgenti deboli	54
4.4 Resti di supernovae	55
5. Il progetto Very Long Baseline Interferometry (VLBI)	57
5.1 L'inizio	58
5.2 Nascita dell'European VLBI Network (EVN)	61
5.3 Sviluppo tecnologico	62
5.4 Iniziano le osservazioni VLBI	64
5.5 Una seconda antenna: Noto	68

5.6 Verso una terza antenna: il progetto Sardinia Radio Telescope (SRT)	71
5.7 Sviluppi scientifici del VLBI	73
5.8 VLBI e Geodesia	80
6. Attività alla stazione di Noto	85
7. Utilizzo dell'antenna di Medicina come strumento singolo	89
7.1 Molecole nello spazio	89
7.2 Search for Extra-Terrestrial Intelligence (SETI)	91
8. Astronomia X e radiazione X di fondo	93
9. Struttura a grande scala	97
10. Il Centro di Calcolo	101
Note conclusive	109
Lista degli acronimi	111
Riferimenti bibliografici	115

Prefazione

Questa storia dell'Istituto di Radioastronomia, dalle sue origini fino all'anno 2000, è stata stimolata dai ricordi e dagli scritti di Marcello Ceccarelli, di Carla e Roberto Fanti e di Giancarlo Setti ed è stata arricchita con i contributi di Jan Brand, Antonino Ficarra, Liliana Formiggini, Isabella Gioia, Gavril Grueff, Stelio Montebugnoli, Mauro Nanni, Nino Panagia, Goliardo Tomassetti, Tiziana Venturi e degli autori di queste pagine. Essendo scritta a più mani non risulta del tutto omogenea, in quanto ogni contributo riflette lo stile di chi lo ha scritto.

Pur avendo cercato di elencare tutti i ricercatori, i tecnici e gli amministrativi che hanno partecipato alla nascita e allo sviluppo della Radioastronomia bolognese siamo consapevoli di possibili mancanze e ce ne scusiamo.

La prima parte è stata estratta da un intervento di Carla e Roberto Fanti alla conferenza "Lo sviluppo dell'Astronomia a Bologna dal 1960 al 1990" presentato all'Accademia delle Scienze di Bologna il 15 maggio 2018 (Marano 2020).

Dalla nascita del gruppo ROUB (Radio Osservatorio Università di Bologna) all'Istituto di Radioastronomia i progetti scientifici e tecnologici sviluppati dai ricercatori sono stati numerosissimi e sarebbe impossibile descriverli tutti. Ci siamo quindi limitati ai filoni di ricerca che abbiamo ritenuto più rappresentativi e che meglio dimostrano la crescita delle competenze astrofisiche e cosmologiche che negli anni hanno portato l'Istituto di Radioastronomia a svolgere un importante ruolo in ambito internazionale.

Vorremmo in ogni caso evidenziare alcuni fatti che sono stati certamente motori di successo: innanzitutto la strettissima connessione tra ricerca radioastronomica e sviluppo tecnologico, la forte interazione con l'Università anche dopo la costituzione dell'Istituto CNR e l'apertura dell'Istituto verso filoni di ricerca non strettamente radioastronomici.

Fin dagli inizi la commistione tra ricerca scientifica e tecnologica è stata motore di sviluppo per la Radioastronomia a Bologna: la Croce del Nord non è stata concepita come un "osservatorio" funzionale all'attività scientifica ma come un vero e proprio esperimento di cosmologia. Questo approccio mirato è stato anche alla base della costru-

zione delle antenne VLBI di Medicina e Noto. Fino ai primi anni Novanta il gruppo radioastronomico ha condiviso non solo gli spazi e i servizi con i colleghi fisici, ma ha partecipato attivamente alla vita scientifica dell'Istituto di Fisica dell'Università di Bologna ed è cresciuto anche grazie alla sinergia con il mondo universitario.

La ricerca prettamente non radioastronomica è stata sempre svolta con successo all'IRA. Ciò ha avuto un effetto benefico sulla vita scientifica dell'Istituto sia in funzione dell'ampia discussione scientifica che ha generato, sia accrescendone anche la visibilità presso gruppi di ricerca e istituzioni non radioastronomici. Argomenti principali furono la ricerca di quasar radioquieti, gli ammassi di galassie in radio e X, l'astronomia X e in particolare il fondo X e la struttura a grande scala dell'Universo. A questi si aggiungono anche altri temi quali studi teorici di relatività generale, fisica dei buchi neri, dinamica delle galassie, proprietà IR di galassie, nuclei galattici attivi e altri argomenti astrofisici, che non verranno trattati nel seguito non perché meno importanti ma perché considerati frammentari rispetto ai filoni dominanti.

Come per tutte le storie raccontate anche questa sulla nascita e il progredire della Radioastronomia in Italia e sulla costituzione dell'Istituto di Radioastronomia ha prefissati limiti temporali. Il momento di inizio di questa avventura è naturale. La scelta di terminare questa storia alla fine del secondo millennio trova le sue motivazioni nei profondi cambiamenti avvenuti nel settore della ricerca di base nei primi anni del 2000. Nei primi mesi del 2000 il CNR promosse una ristrutturazione della sua rete di istituti con la finalità di diminuirne il numero accorpendo quelli che svolgevano attività di ricerca simili. In quegli anni l'IRA crebbe con l'inclusione del CAISMI di Firenze e dell'ITIS di Matera.

Inoltre, il 23 luglio 1999 fu pubblicato il decreto legislativo 296 che, fondando l'Istituto Nazionale di Astrofisica, aprì una nuova pagina della ricerca astronomica.

1. Dalla Croce del Nord al Laboratorio di Radioastronomia

1.1 Gli inizi

«Perché – mi dice un giorno G. Puppi sulle scale dell’Istituto – non costruisci un radio-telescopio?». Il prof. Giampietro Puppi, trasferitosi a Bologna da Padova, era il direttore dell’Istituto di Fisica.

Con queste parole Marcello Ceccarelli ricorda, in *Viaggio Provvisorio* (Ceccarelli 1976), con il suo solito stile scherzoso, l’inizio di questa avventura. Allora Puppi aveva 41 anni e Ceccarelli 31: erano quelli che oggi si definirebbero “due giovinotti”.



Figura 1.1 G. Puppi con un gruppo di allievi nel giardino dell’Istituto di Fisica “Augusto Righi”, nell’aprile del 1958. Da sinistra a destra: Luigi Monari, Vittorio Prodi, Virginio Bortolani, Lalla Delli Santi, Attilio Forino, Giampietro Puppi, Giorgio Casadei, Giancarlo Setti e Franco Casali. Foto di Alessandra Cavallini.

La data di questo incontro va collocata presumibilmente nel maggio del 1959 ed è probabile che il primo approccio di Puppi con Ceccarelli sia avvenuto proprio così. È però altrettanto probabile che Puppi stesse riflettendo da tempo sull'idea. Infatti, nella primavera del 1959 suggerì a Giancarlo Setti di orientare la sua tesi verso la Radioastronomia extragalattica, illustrandogli la sua idea di lanciare un grande progetto in questa disciplina. La tesi di G. Setti discusse i vantaggi per gli studi extragalattici e la cosmologia di un grande telescopio del tipo “Croce di Mills”, che era stato realizzato nel 1954 da B. Mills presso Sydney (Australia). La Radioastronomia è stata una delle tante iniziative di Puppi per promuovere nuovi settori di ricerca della fisica italiana che potessero affermarsi a livello internazionale. Quando si vuole intraprendere un progetto nuovo è fondamentale saper scegliere le persone adatte a condurlo in porto e questo non è sempre facile. Puppi scelse la persona giusta, Marcello Ceccarelli, chiamato a Bologna da Padova.

La Radioastronomia era, a quell'epoca, un settore relativamente nuovo dell'Astronomia, ma già consolidato a livello internazionale. Dopo aver escluso che le radiosorgenti fossero radio stelle, si pensò che l'emissione radio provenisse da galassie e, anche se non si conoscevano ancora i quasar, si erano fatti notevoli passi avanti. Le nuove scoperte avevano dato un potente impulso aprendo nuovi orizzonti: si pensi alla possibilità di studiare l'idrogeno atomico interstellare mediante la riga che esso emette alla lunghezza d'onda di 21 cm. Inoltre, la Radioastronomia era entrata con forza nel vivace dibattito cosmologico dell'epoca fra i sostenitori della “Teoria dello Stato Stazionario”, età infinita e creazione continua di materia (Bondi & Gold 1948), e quelli del “Big Bang”, modelli derivati dalla relatività generale di Einstein dal matematico russo Aleksandr Friedmann. Un'importante discriminante fra le due teorie è il conteggio del numero di radiosorgenti in funzione del flusso, o meglio nella sua forma. I conteggi sono ben rappresentati da una legge del tipo $N(>S) \propto S^{-\delta}$, dove $N(>S)$ rappresenta il numero di radiogalassie con flusso $>S$. Generalmente questa relazione è data in forma logaritmica cioè $\text{Log}(N>S) = -\delta \text{Log}S + \text{costante}$, e ci si riferisce ad essa col termine $\text{Log} N - \text{Log} S$. La pendenza prevista δ è al massimo 1.5 per la “Teoria dello Stato Stazionario” e >1.5 per i modelli relativistici. Le radiosorgenti extragalattiche erano così potenti da potersi rilevare a distanze enormemente superiori a quelle raggiungibili con i maggiori telescopi ottici dell'epoca, ed erano perciò considerate come le “sonde” ideali per chiarire questo problema in maniera definitiva. I risultati fino ad allora ottenuti erano però ancora contraddittori e un futuro grande radiotelescopio (italiano) avrebbe dato un contributo rapido e importante al dibattito, potendo osservare, in tempi brevi, grandi quantità di radiosorgenti a luminosità apparente molto piccola e quindi, presumibilmente, molto lontane.

G. Puppi ebbe l'idea, sponsorizzò il progetto, ne reperì i finanziamenti necessari e ne seguì con costante interesse lo sviluppo. Il progetto sarebbe stato finanziato dal Ministero della Pubblica Istruzione (MPI), con l'istituzione di un Laboratorio di Radioastronomia presso l'Università di Bologna per l'uso scientifico e per la manutenzione del radiotelescopio (800 M di lire, pari a circa 9 M di euro attuali secondo l'ISTAT).



Figura 1.2 Marcello Ceccarelli. Crediti: INAF-IRA.

M. Ceccarelli, giovane fisico nucleare di Padova, aveva ottenuto grandi risultati arrivando a sfiorare il premio Nobel, ma aveva deciso di lasciare la fisica subnucleare e cercava nuove tematiche. Con il suo ultimo lavoro di fisica nucleare “affondò” una importante teoria radioastronomica. La grande luminosità delle radiogalassie richiedeva una enorme quantità di energia, di cui non si sapeva spiegare l’origine. Famosi astrofisici teorici, quali G. Burbidge e F. Hoyle, suggerirono che si trattasse della annichilazione materia-antimateria, con conseguente produzione, fra l’altro, anche di “raggi gamma”. P. Morrison calcolò per Cygnus A, la radiosorgente più forte del cielo Nord, il flusso gamma aspettato a terra. M. Ceccarelli, usando strumentazione per la fisica subnucleare montata su palloni in alta quota, trovò, nel 1959, che il flusso gamma misurato era inferiore a quello previsto da Morrison di almeno 200 volte. Quindi, nessuna annichilazione materia-antimateria. All’esperienza avevano partecipato anche alcuni studenti, fra cui Alessandro Braccesi, che divenne poi il suo braccio destro.

M. Ceccarelli aveva fatto la prima osservazione di astronomia gamma al mondo ed era entrato nella Radioastronomia. Coraggiosamente, accettò la proposta di G. Puppi e si lanciò in un mondo ancora del tutto sconosciuto in Italia. Le operazioni partirono in maniera molto spedita.

All’inizio del 1960, con un annuncio sui giornali, fu arruolato Gianfranco Sinigaglia, ingegnere alla Marelli, che lasciò un lavoro certo per un altro più incerto ma molto più interessante.

Per avere suggerimenti furono presi rapidamente contatti con radioastronomi inglesi e australiani come M. Ryle, J. Högbom, B.Y. Mills, W.N. Christiansen, con i quali si stabilirono rapporti non solo di stima e collaborazione ma anche di vera amicizia.

Il progetto originale era quello di costruire uno strumento del tipo Croce di Mills, quindi con due rami tra loro perpendicolari che sarebbero stati di 1200 m in Est-Ovest (EW) e di 1200 m in Nord-Sud (NS), costituiti da sezioni longitudinali di cilindri a sezione parabolica, ruotabili in NS intorno ad assi orizzontali (Braccesi e Ceccarelli 1962).

Il radiotelescopio italiano fu chiamato “Croce del Nord”: sarebbe stato uno strumento di transito che, puntate le antenne a una certa declinazione, avrebbe permesso di registrare i segnali radio con continuità nell’arco delle 24 ore, mentre il cielo gli scorreva sopra a causa della rotazione terrestre.

Il ramo EW sarebbe stato costituito da un settore cilindrico da orientare in NS, mentre il ramo NS sarebbe stato formato da 128 corti cilindri ciascuno lungo 47 m e di 7.5 m di apertura, distanziati tra loro di 10 m. Per il puntamento meccanico del NS si sarebbero puntati tutti i singoli elementi, ma poi sarebbe stato necessario compensare opportunamente le fasi dei singoli segnali.

Una superficie riflettente continua era improponibile per questioni di peso e anche inutile per la prevista lunghezza d’onda di lavoro di 73.5 cm o 408 MHz. Sarebbe stata fatta di sottilissimi lunghi fili d’acciaio, distanti fra loro 2 cm e sostenuti da 23 centine, come quelle che tengono il fasciame delle navi. A questa lunghezza d’onda gli spazi tra i fili sarebbero risultati invisibili e la superficie sarebbe apparsa alla radiazione incidente come continua. La combinazione dei due rami avrebbe permesso di ottenere una buona risoluzione angolare di 2.5×2.5 minuti d’arco. Con uno strumento siffatto si sarebbero potute scandagliare, giorno dopo giorno, grandi strisce contigue di cielo registrando dati con grande efficienza e velocità. Il progetto dovette essere ridimensionato per scarsità di fondi: il ramo EW fu ridotto della metà e il ramo NS di un quarto, portando quindi la Croce ad assumere una forma a T.

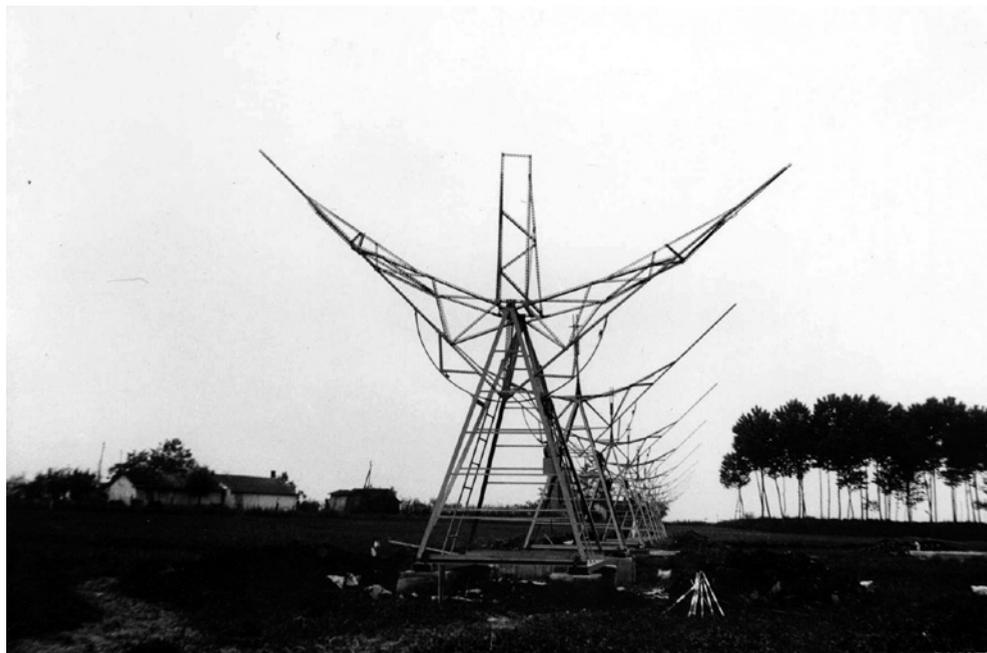


Figura 1.3 Il prototipo del ramo Est-Ovest della Croce del Nord in fase di costruzione nel 1960. Crediti: INAF-IRA.



Figura 1.4 Da sinistra: Giancarlo Setti, Gianfranco Sinigaglia, Guglielmo Righini, Giampietro Puppi, Giuseppe Mannino, Marcello Ceccarelli e seduto Alessandro Braccesi. Crediti: INAF-IRA.

Non c'era però esperienza radioastronomica in Italia. In una lettera ad Alessandro Braccesi, Ceccarelli scriveva: «Secondo Högbom il nostro colosso ha i piedi d'argilla, e questi piedi si chiamano mancanza di cultura astronomica...».

Nel giugno dello stesso anno (1960) fu realizzato il prototipo del ramo EW della Croce del Nord, un semicilindro parabolico di 7 x 110 m, operante a 327 MHz, che fu chiamato “Medicinoscopio” data la vicinanza alla località di Medicina.

Parteciparono ai lavori, assieme a M. Ceccarelli e G. Sinigaglia, i giovani Giancarlo Setti (neolaureato) e Alessandro Braccesi (ancora studente) più alcuni tecnici universitari. Una storica e memorabile foto, in cui compaiono, oltre a Ceccarelli e ai suddetti, G. Puppi, G. Righini, direttore dell'Osservatorio di Arcetri, e G. Mannino, direttore dell'Istituto di Astronomia dell'Università di Bologna, immortalata la conclusione di questa prima fase.

Il Ministro della Pubblica Istruzione G. Medici presenziò al primo test.

Nello stesso anno due tecnici guidati dall'ingegnere G. Sinigaglia iniziarono a costruire presso l'Istituto di Fisica dell'Università di Bologna quello che fu probabilmente il primo ricevitore radioastronomico italiano. Purtroppo, non esistono più tracce delle caratteristiche del ricevitore ma da descrizioni sommarie si sa che la tecnologia utilizzata faceva uso di dispositivi termoionici che non godevano di buona fama in ambito scientifico per la loro capacità di generare rumore termico e instabilità di guadagno. A questo ricevitore furono applicati alcuni accorgimenti tecnici, quali l'uso di valvole professionali e alimentatori rigorosamente stabilizzati in tensione, che permisero di fare le prime osservazioni a 327 MHz del Sole e di altre sorgenti radio note di media intensità. Fu poi

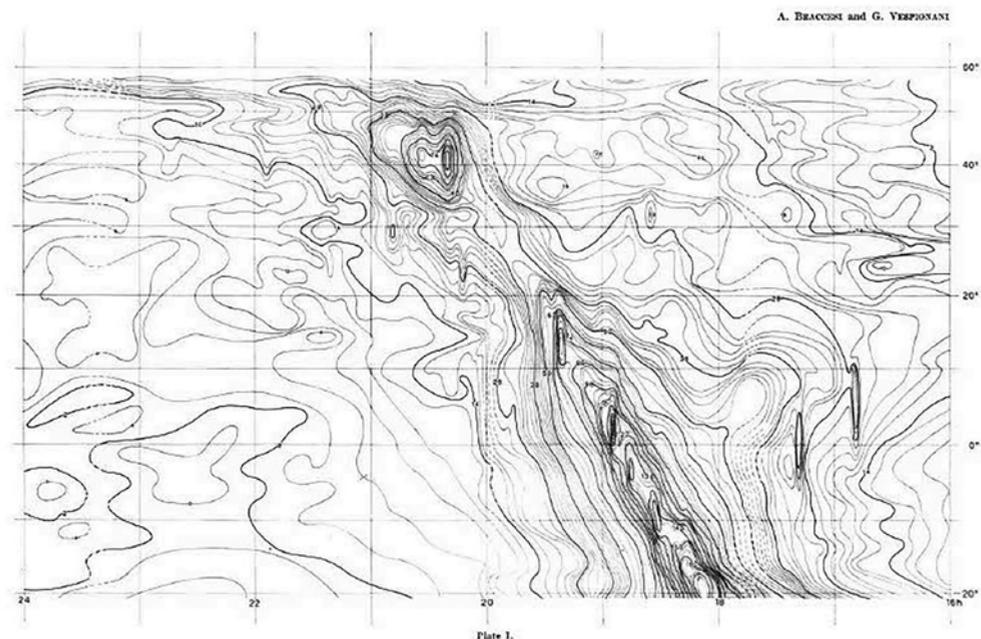


Figura 1.5 Immagine a 327 MHz di una regione del piano galattico ottenuta col “Medicinoscopio” (Braccesi e Vespignani 1964) con il gentile permesso della Società Italiana di Fisica.

costruito un nuovo ricevitore (Tomassetti 2016) in cui veniva applicata la tecnica della correlazione, destinata a sviluppi straordinari nei decenni seguenti. Questo ricevitore permise di pubblicare una bellissima mappa a 327 MHz del centro della nostra galassia (Braccesi e Vespignani 1964).

1.2 Il gruppo ROUB e il ramo Est-Ovest della Croce del Nord

Il gruppo di lavoro si estese acquisendo altre persone di grande qualità: gli ingegneri G. Gelato, appena reduce da una scuola militare, e C. Rosatelli, in prestito dal CNEN, due giovani neo-PhD, Dan Harris da Caltech e Louise Volders da Leiden, con buone competenze astronomiche, e un nutrito numero di tecnici molto bravi. Era nato il gruppo ROUB (Radio Osservatorio dell’Università di Bologna) che, con l’acquisizione delle nuove abilità scientifiche e tecnologiche, si dedicò alla progettazione del radiotelescopio Croce del Nord che avrebbe osservato a 408 MHz, frequenza considerata molto alta alla fine degli anni Cinquanta e al limite dell’operatività della strumentazione disponibile nel laboratorio del ROUB.



Figura 1.6 La prima centina del ramo Est-Ovest della Croce del Nord nelle officine SAE (Lecco) nel 1962. Crediti: INAF-IRA.



Figura 1.7 Il genio militare impegnato nella posa dei cavi coassiali nel 1964. A sinistra sono riconoscibili Marcello Ceccarelli e Luciano Baldeschi. Crediti: INAF-IRA.

All'inizio del 1962 una prima centina fu montata presso le officine SAE di Lecco. Più o meno alla stessa epoca fu completato il progetto dell'illuminatore, cioè dell'elemento che capta le onde elettromagnetiche. Nell'agosto del 1963, nelle campagne di Medicina (Bologna), furono erette le centine e in settembre tutta la "ferraglia" era in piedi. Il grande settore cilindrico-parabolico che costituiva il ramo EW della Croce del Nord si ergeva maestoso, con la sua estensione di 600 x 35 m. Durante la primavera del 1964

una squadra del genio militare fu impiegata per la posa dei cavi coassiali sotterranei che dovevano convogliare il segnale radio raccolto al registratore. I soldati lavoravano volentieri. Stavano molto meglio che in caserma e gradivano il pranzo nell'osteria "dei Cacciatori" vicina al sito della Croce.

Nel 1963 Michelangelo Antonioni girò nel sito del radiotelescopio di Medicina alcune scene di uno dei suoi film più noti ma anche più controversi: *Deserto Rosso*, con la sceneggiatura di Tonino Guerra e dello stesso Antonioni. Un incidente d'auto provoca in Giuliana (Monica Vitti) uno choc che, aggravato dall'ambiente particolare della periferia industriale di Ravenna, in cui la professione del marito (ingegnere elettronico) la costringe a vivere, si tramuta in uno stato di continua nevrosi depressiva. Corrado (Richard Harris), un amico del marito, si sente attratto dalla donna e tenta di aiutarla a uscire dalla sua solitudine piena di incubi, intrecciando con lei una fuggevole e amara relazione che non farà altro che aumentare il suo stato depressivo. I due si trovano a un certo punto presso il Radiotelescopio di Medicina, ridipinto con striature rosse per il film, dove Corrado tenta invano di proporre un nuovo lavoro a un tecnico che vi lavora e dove Giuliana chiede di poter ascoltare le stelle. Per *Deserto Rosso* Antonioni venne premiato per il miglior film con il Leone d'Oro a Venezia nel 1964 e Carlo Di Palma con il Nastro d'Argento per la fotografia a Taormina nel 1965.

Carla Fanti aveva intanto cominciato a collaborare con Louise Volders nel settore informatico, imparando il FORTRAN e sviluppando con lei alcuni semplici algoritmi per l'analisi dei futuri dati. Sotto la pressante necessità di essere pronti a osservare il cielo radio con il ramo EW, si rinunciò a progetti utilizzando tecniche avanzate e si optò per un ricevitore classico progettato da G. Tomassetti (Tomassetti 2016) con il contributo degli ingegneri C. Rosatelli e G. Gelato. Questa strumentazione avrebbe garantito stabilità e semplicità ma con una temperatura di rumore di oltre 900 °K. Per iniziare poteva andare bene.



Figura 1.8 Un frame del film *Deserto Rosso* (1963), regia di M. Antonioni. Monica Vitti e sullo sfondo il ramo Est-Ovest della Croce del Nord.

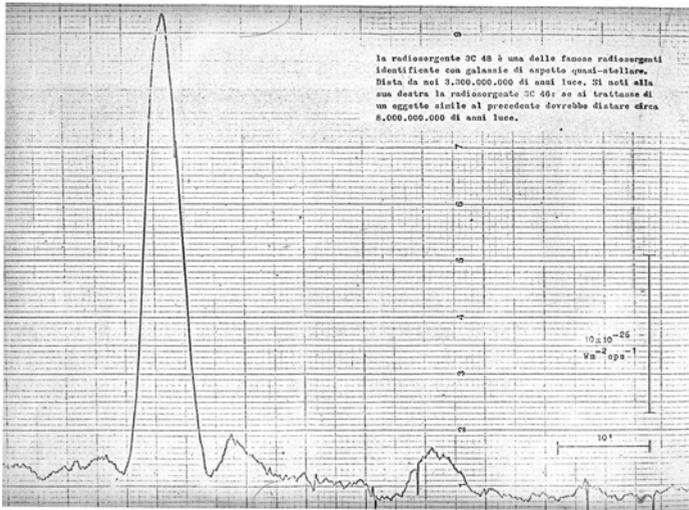


Figura 1.9 La radiosorgente 3C48 osservata con il ramo Est-Ovest della Croce del Nord nel 1964. Crediti: INAF-IRA.

Di questi anni Ceccarelli scrisse nel suo libro *Viaggio Provvisorio*: «Avevo moltissimo da fare. La macchina organizzativa per la costruzione del Radiotelescopio si era messa in moto e non avrei potuto ormai più fermarla, e questo anche se quella macchina tutti i momenti perdeva colpi. Difficoltà di soldi, di aiutanti, di colleghi. Piagnistei di burocrati, ingranaggi mal temperati, cavi troppo corti, saldature che si staccavano. Però intanto il grande scheletro bianco, la mia “nave di cavalli” prendeva anima e forma. Probabilmente nello standard delle grandi imprese [...] il nostro lavoro per la Croce del Nord è stato una piccolissima cosa, però per me è stato un lavoro immenso, bellissimo e pieno di disperazione».

Ai primi di ottobre 1964 il ramo EW, dotato di tre “occhi”, tecnicamente “beam”, che guardavano in tre direzioni leggermente diverse in direzione EW, era completamente montato. Il 7 ottobre 1964 G. Sinigaglia e collaboratori completarono il collegamento del ramo EW con il ricevitore.

Molti restarono fin oltre la mezzanotte per assistere alle prime osservazioni. Un successo. Si vedeva benissimo ciò che si doveva vedere e si vedeva anche ciò che c’era senza che nessuno lo sapesse. Si festeggiò con salame e Sangiovese.

M. Ceccarelli in *Viaggio Provvisorio*: «Avevo visto il pennino finalmente muoversi sulla carta del registratore. Muoversi bene, muoversi benissimo. Raccontava il passaggio di universi lontani e raccontava anche la fine di tante fatiche e timori. Mi allontanai dal gruppo dei miei collaboratori tutti in festa e mi sedetti nell’angolo solitario di una stanza, senza parlare, senza pensare».

Il 24 ottobre 1964 ci fu l’inaugurazione, presenti il Ministro della PI Luigi Gui, il Rettore dell’Università di Bologna Felice Battaglia, lo stato maggiore dell’Istituto di Fisica e il vescovo ausiliario di Bologna, mons. Bettazzi. L’inaugurazione fu un grande successo, eccezion fatta per un violento acquazzone che ridusse il terreno a



Figura 1.10 Inaugurazione del ramo Est-Ovest della Croce del Nord nel 1964. Marcello Ceccarelli a destra con il Ministro Luigi Gui. Crediti: INAF-IRA.

un mare di fango, impantanando la metà delle auto dei partecipanti, inclusa quella del Ministro.

Acquisito questo primo successo, l'operazione Croce del Nord era ben lungi dall'essere finita. Era stata costruita anche la frazione di 320 m del ramo NS, senza però poterla collegare con il ramo EW per carenza di finanziamenti.

Con il solo ramo EW il potere risolutore dello strumento era eccellente, per quei tempi, in ascensione retta 4 minuti d'arco, ma assai povero in declinazione, 1.8 gradi, col risultato di produrre posizioni incerte in NS. Inoltre, si incorreva nella possibilità che radiosorgenti, vicine in ascensione retta ma separate in declinazione, simulassero una sola radiosorgente più forte, la così detta confusione, introducendo delle incertezze nei dati, anche se parzialmente controllabili. Bisognava quindi mettere il ramo NS in condizioni di lavorare, anche se era di soli 320 m, e fare la correlazione dei segnali dai due rami. Tecnicamente non mancava molto, ma...

In attesa dell'attivazione del ramo NS, si cominciò a usare il solo ramo EW, cercando di farne subito il miglior uso astronomico possibile. I nostri esperti di Radioastronomia purtroppo erano partiti: D. Harris per Arecibo, all'inizio del 1964, e L. Volders era tornata in Olanda, attorno al 1966, insieme al marito, G. Gelato. Ma c'erano M. Ceccarelli e A. Braccisi a guidare i tanti pivellini, laureandi e neolaureati, appena arrivati. C'era un enorme entusiasmo e grande volontà di lavorare, senza conoscere orari, sabati o domeniche e altre feste comandate, Pasque, Natali e Capodanni compresi.

Il funzionamento dell'EW era purtroppo limitato dalla presenza diurna di una forte interferenza dovuta a un ponte radio militare, ovviamente abusivo, dato che la frequenza 408 MHz, dedicata alla Radioastronomia, doveva essere di solo ascolto, ma tant'è...

Individuata la sorgente dell'interferenza M. Ceccarelli contattò le alte gerarchie militari, con scarsi risultati, salendo progressivamente di livello, finché, persa la pazienza, inviò una lettera a Giulio Andreotti, allora Ministro della Difesa, in cui scriveva, usando il suo humor tagliente, che «l'alto grado di inefficienza delle Forze Armate gli faceva dubitare della possibilità che, in caso di attacco nemico dall'est, fossero in grado di resistere per quei 40 minuti che erano necessari perché la divisione corazzata americana di stanza ad Aviano potesse intervenire e bloccare gli invasori». Era periodo di Guerra fredda... Furore fra gli alti gradi delle forze armate. Il ponte radio fu spento.

Nel corso degli anni seguenti si ebbero però altre interferenze militari, che danneggiarono le osservazioni del radiotelescopio e provocarono qualche visita da parte dei carabinieri per sospetto spionaggio. In qualche modo, tuttavia, pian piano si giunse a un *modus vivendi* dinamico, che comunque rese sempre assai difficoltoso il lavoro.

L'osservazione col radiotelescopio consisteva nel registrare il segnale su tre registratori, uno per ogni "occhio o beam" dello strumento, usando rotoli di carta lunghi circa 15 m per 12 ore di osservazione. Poi si faceva, a mano con la matita, la media dei tre tracciati indipendenti, che venivano sovrapposti su un tavolo dotato di lampade che li illuminavano da sotto, e si misuravano posizione e intensità delle sorgenti con il doppio decimetro. I calcoli si facevano a mano, al massimo usando il regolo calcolatore per prodotti, divisioni e trigonometria. Se fortunati si poteva prendere in prestito la calcolatrice meccanica FRIDEN. Il lavoro era tanto e, lavorando a mano, non si riusciva a tenere il ritmo con cui i dati erano prodotti dallo strumento. Intanto, anche Carla Fanti e Roberto Fanti erano entrati nel gioco svolgendo due tesi di laurea su "Radiogalassie quasi stellari" e "Meccanismi di emissione nelle radiosorgenti extragalattiche", e si erano laureati nel luglio del 1964.

A fine dicembre 1964 si concluse, operando solo di notte, l'osservazione sistematica di un'area di cielo di circa 0.45 steradiani, già esplorata dal radiotelescopio parabolico di Parkes, Australia, che portò a un catalogo B1 contenente 654 radiosorgenti con luminosità apparente, o flusso, maggiore di 1 Jy. Il catalogo conteneva, oltre a tutte le radiosorgenti già viste da Parkes – le più forti, circa una quarantina – altre mai rivelate (Braccesi *et al.* 1965). Almeno una parte di esse era costituita da più radiosorgenti deboli la cui somma produceva la luminosità misurata, dovuta alla confusione. Successivamente furono osservate altre estese zone di cielo, questa volta intorno allo zenith, ma la prospettiva di continuare l'analisi dei dati a mano era improponibile. D'altronde le capacità di calcolo erano esigue. G. Puppi ottenne il permesso di accedere, solo di notte, all'IBM 1620 della facoltà di Ingegneria dell'Università di Bologna e di avere in prestito un tecnico informatico dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN).

Sotto la supervisione di A. Ficarra, si cominciò a utilizzare il "mangiaspago", un misuratore di coordinate realizzato dall'INFN per misurare le tracce delle camere a bolle. Venne concesso durante la notte per digitalizzare, con mano d'opera studentesca pagata, i tracciati cartacei prodotti dal radiotelescopio. Le misure venivano scritte in automatico su schede perforate e i dati elaborati con l'IBM 1620 per derivare posizione e luminosità delle sorgenti presenti, mediante software sviluppato in casa.

Nell'estate del 1965 durante una scuola estiva a Varenna, alla quale erano presenti G. Burbidge, W. Fowler, A. Sandage, K. Thorne e R. Giacconi, fu possibile far circolare i primi risultati. G. Burbidge, cui fu mostrato il preprint del catalogo B1, rimase impressionato dal numero di radiosorgenti non precedentemente catalogate che vi apparivano. W. Fowler chiese ripetutamente se i "600" di estensione dell'EW erano piedi o cos'altro.

Nel novembre del 1965 si tenne a Bologna il Congresso annuale della SIF. M. Ceccarelli fu invitato a fare una relazione sulla Croce del Nord nell'aula magna dell'Istituto di Fisica, piena di colleghi. Il successo fra i fisici fu notevole.

La SIF assegnò un premio di 500.000 lire alla Croce del Nord, che fu diviso in parti uguali fra tutti i membri, tecnici e laureati, del gruppo, ventiquattro persone, esclusi i professori ordinari (M. Ceccarelli e G. Mannino). Carla Fanti, unica donna del gruppo, ritirò l'assegno a nome di tutti.

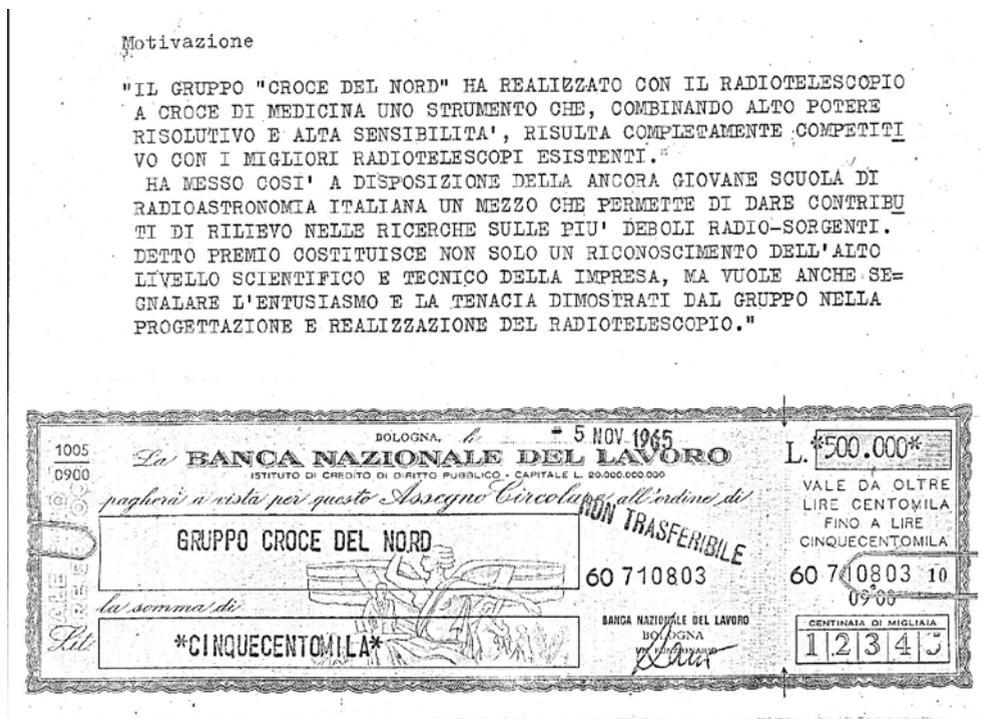


Figura 1.11 La motivazione e l'assegno di 500.000 lire assegnato nel 1965 dalla SIF al gruppo per la realizzazione della Croce del Nord. Crediti: INAF-IRA.

Carissimi,

come sapete sono stata premiata.

Siccome però non saprei in fondo che far-
mene di così pochi soldi, ho pensato di fare
il bel gesto e di dividerli tra i miei vecchi
..... genitori.

Vi abbraccio (solo in E-W)

"La Croce del Nord"

Gianfranco Sinigaglia

Alessandro Braccesi

Carla Giovannini

Roberto Fanti

Louise Gelato

Gianni Gelato

Carlo Rosatelli

Dan Harris

Ivo Tricario

Gerardo Vespignani

Luciano Baldeschi

Ruggero Cannonetti

O.F.G. Gallieri

Roberto Trebbi

Franco Magaroli

Cesare Rizzi

Goliardo Tommasetti

Alfonso Micheloni

Alberto Bombonati

Renato Trivelloni

Giovanni Frigeri

Giorgio Tabarroni

Luciano Pizzirani

Oriano Volta

P.S. Il regolamento della S.I.F. non permette
l'assegnazione di premi a professori di ruolo.

Nel regolamento però non è escluso che i pro-
fessori Ceccarelli e Mannino possano accettare
un invito a pranzo.

Figura 1.12 Lettera scherzosa scritta dalla Croce del Nord (ovvero da Marcello Ceccarelli) al gruppo che l'aveva realizzata. Crediti: INAF-IRA.

Subito dopo, a seguito di uno scambio di lettere con M. Ryle, fu inviato alla rivista «Nuovo Cimento» un articolo con i conteggi delle radiosorgenti e una dettagliata analisi degli effetti strumentali e delle correzioni applicate (Braccesi *et al.* 1965). In questa occasione C. Fanti e M. Ceccarelli, per stimare l'effetto dovuto alla confusione, che rende la funzione che descrive i conteggi più ripida, avevano sviluppato il primo metodo Montecarlo della storia radioastronomica bolognese che fu fatto girare sull'IBM 1620. Come numeri a caso furono utilizzati quelli di una lista presa da un libro di M. Ceccarelli, rinormalizzati per diventare le coordinate delle radiosorgenti del cielo simulato. I risultati erano intermedi fra quelli previsti dal “Big Bang” e quelli dello Stato Stazionario, sebbene con notevoli incertezze a causa della confusione dovuta alle sorgenti più deboli, malgrado il tentativo di applicare le correzioni del metodo Montecarlo. Poco dopo si poté discuterne con il noto cosmologo Dennis Sciama, che era venuto per tenere un seminario proprio sulla “Teoria dello Stato Stazionario”.

Oltre a ciò, capitò un grosso colpo di fortuna. Dopo l'estate uscì sulla rivista «Astrophysical Journal» la prima lista dei quasar selezionati otticamente (QSO) da A. Sandage. Furono fatte rapidamente osservazioni con l'EW di questi oggetti senza trovare emissione radio significativa da nessuna delle 15 QSO osservate a un livello di circa un ordine di grandezza inferiore a quella delle QSS (Quasi-Stellar radio Sources) più deboli. Fu inviata una lettera all'«Astrophysical Journal», che la pubblicò velocemente. Questo lavoro ebbe un notevole successo e rimase per molto tempo quanto di meglio c'era su questo argomento (Braccesi *et al.* 1966a).

Furono svolte altre ricerche con il solo ramo EW, che produssero circa una decina di pubblicazioni, fra cui i dati sulla scintillazione interplanetaria di 3C273 apparsi su «Nature» (Sinigaglia 1966), una survey con declinazione compresa fra -30° e -20°



Figura 1.13 Da sinistra: Liliana Formiggini, Carla Fanti, Roberto Fanti e Roberto Bergamini nel giardino dell'Istituto di Fisica dell'Università di Bologna (1967). Crediti: INAF-IRA.



Figura 1.14 Valentina Tereshkova, astronauta russa e prima donna nello spazio, in visita alla stazione radioastronomica di Medicina nel 1967, al centro della foto. A sinistra è riconoscibile M. Ceccarelli con una mano sulla testa di A. Ficarra. In ginocchio Liliana Formiggini. A. Braccesi è accanto a M. Ceccarelli. Crediti: INAF-IRA.

(Braccesi *et al.* 1965), osservazioni di campioni vari di QSO (fra cui Braccesi *et al.* 1966a e b), di galassie brillanti (Braccesi *et al.* 1967), di nebulose Planetarie (Ficarra e Padrielli 1968) e di un campione di radiosorgenti 4C (Fanti C. *et al.* 1969) (catalogo 4C: Pilkington e Scott 1965; Gower, Scott e Wills 1967).

La stazione radioastronomica di Medicina cominciò a diventare un luogo noto a livello internazionale e nel 1967 Valentina Tereshkova, astronauta russa e prima donna nello spazio – dove rimase per tre giorni a bordo del Vostok 6 – la visitò durante la sua permanenza a Bologna.

1.3 La Croce del Nord e i cataloghi di radiosorgenti

Pur con questi discreti successi, le prestazioni dell'EW da sole non erano ancora sufficientemente interessanti per la comunità internazionale.

Alcuni membri del gruppo furono mandati a turno al Caltech per fare esperienza con l'interferometro di Owens Valley e i telescopi a Monte Palomar: A. Braccesi fra il 1966 e il 1967, C. Fanti e R. Fanti fra il 1967 e il 1968, G. Grueff fra il 1969 e il 1970, nell'ambito di un accordo di collaborazione tra il ROUB e la National Science Foundation degli USA sia per lo studio dei quasar, la cui esistenza era nota da alcuni anni, sia per l'identificazione ottica di radiosorgenti. Questa collaborazione prevedeva una campagna di osservazione al telescopio 48" del Palomar per la raccolta di lastre fotografiche, la seguente analisi del materiale fotografico e la costruzione di strumentazione adatta allo scopo con una successiva campagna di studio spettroscopico degli oggetti trovati.

M. Ceccarelli cercò di stabilire rapporti con altri centri astronomici in USA e Gran Bretagna. Dopo un incontro con M. Ryle, che lo aveva invitato a cena, scriveva: «Bisogna riuscire a varcare la barriera tra l'essere stimati e l'essere richiesti. Qui tutti sono molto cordiali con me e ho la netta sensazione che non ci considerino affatto dei sottosviluppati. Però nessuno ha ancora bisogno dei nostri dati. Finché non avremo merce di scambio non saremo presi seriamente». Come detto, col radiotelescopio senza il ramo NS, si avevano delle incertezze sulle radiosorgenti deboli. Inoltre, al livello di 1 Jy, la confusione era già importante. Il passo veramente cruciale era il completamento della Croce del Nord, con la messa in funzione del ramo NS. Questo richiese tre anni dalla inaugurazione dell'EW. Durante questo periodo vi era stato un certo cambiamento nello staff tecnologico. C. Rosatelli e G. Gelato si erano trasferiti ed era subentrato G. Colla. Vi era inoltre stato un crescente coinvolgimento di G. Grueff e di A. Ficarra. Il ritardo nell'operazione NS era dovuto a vari fattori. Difficoltà per reperire finanziamenti dal MPI e con il CdA dell'Università di Bologna che non recepì mai la potenzialità innovativa del progetto e lo considerò sostanzialmente uno sgradevole disturbo. Alla fine del 1965 fu risolto il problema della messa in fase della NS con un semplice e ingegnoso sistema. Anziché usare dei pezzi di cavo per aggiustare i ritardi di fase fra le antenne, G. Sinigaglia aveva usato lo strattagemma di linee di trasmissione riempite di un dielettrico liquido, il cherosene, che permetteva di variare le fasi con continuità. Intanto G. Tomassetti era diventato il “mago dell'alta frequenza” (Tomassetti 2016). G. Colla aveva ereditato da G. Gelato il progetto di codificatore per registrare il segnale su nastro magnetico, che avrebbe liberato dalla schiavitù di carta e schede perforate. Aveva inoltre realizzato il prototipo di correlatore per combinare i dati provenienti dai due rami della Croce. Nell'estate del 1966 era prevista la posa dei cavi coassiali della NS, ma, per vari problemi col CdA dell'Università, le cose continuavano ad andare a rilento. M. Ceccarelli, il 10 agosto, dalla villeggiatura scriveva ad A. Braccisi: «Dalla tua capisco che i lavori del cavo non sono ancora cominciati. Se l'operazione cavi non potesse avvenire ho intenzione di passare decisamente all'attacco della amministrazione universitaria strumentalizzando tutti quanti per una Notte di S. Bartolomeo. E credo di riuscire a trascinare anche Puppi». Poi Ceccarelli raccontò dell'intervento durissimo di G. Puppi che minacciò di chiedere al Ministero della Pubblica Istruzione il trasferimento all'Università di Padova del progetto Croce del Nord. Questo aiutò non poco sul fronte bolognese. Restava però il fronte ministeriale, ossia l'ultimo lotto di finanziamento per il completamento della Croce e l'istituzione del “Laboratorio Nazionale di Radioastronomia”. Ancora Ceccarelli, in *Viaggio Provvisorio*, scrive: «Ero riuscito ad avere un appuntamento a Roma con il Ministro e avevo intenzione di dirgli che così, senza soldi e posti, il suo e nostro tanto decantato “Laboratorio Nazionale di Radioastronomia” aveva un presente molto grigio e prospettive ancora più scure... Stavolta il Ministro non si limitò ad “auspicare”. Decise. Prese un foglietto (Lei ha mille ragioni caro professore!), vi scrisse cifre e tempi e telefonò a un Direttore Generale che arrivò subito dopo tutto ossequioso e che si impossessò del foglietto e delle direttive corrispondenti. Dopo di ciò passarono settimane e mesi ma non successe assolutamente nulla». Quando poi Ceccarelli seppe che il progetto

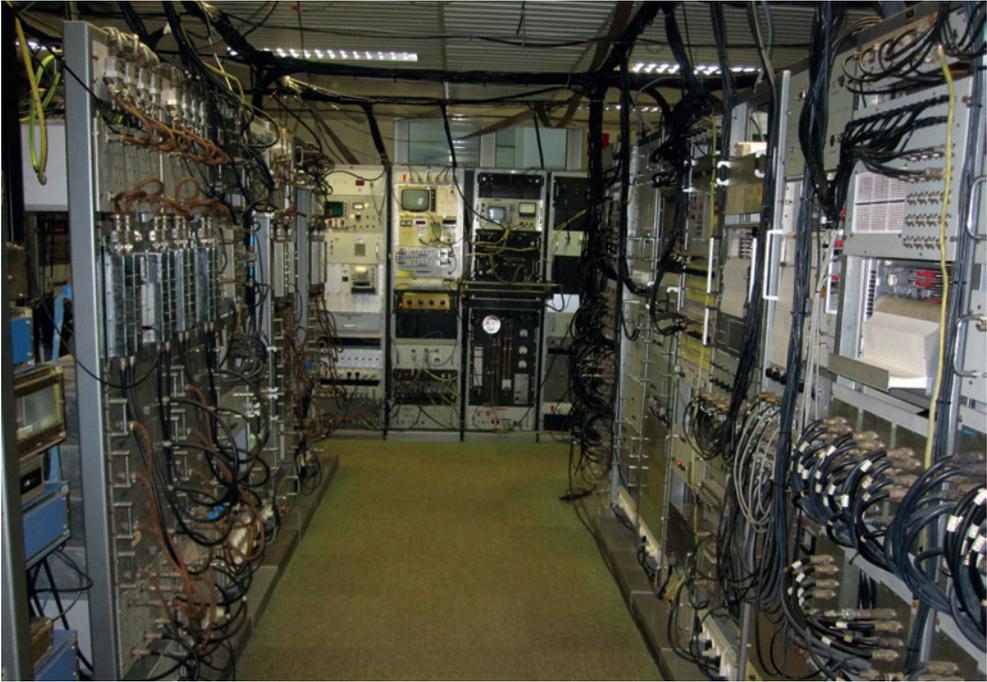


Figura 1.15 Interno della sala controllo della Croce del Nord. Crediti: INAF-IRA.

di istituzione del “Laboratorio Nazionale di Radioastronomia” era stato definitivamente respinto, commentò: «Quel tesoro del Tesoro ha bocciato il progetto». Non avendo altra scelta, G. Grueff, in primis, si rimboccò le maniche e l'anno successivo si riuscì a concludere i lavori, rinunciando purtroppo a completare il ramo NS, che avrebbe dovuto avere una estensione di 1200 m. Con gli ultimi soldi disponibili furono completati e montati gli illuminatori e fu costruito il sistema di sfasatori per il puntamento elettrico dei tre beam del ramo NS, che in seguito diventarono cinque. Fu realizzato un ricevitore di seconda generazione, chiamato MARK 2, che permise alla Croce del Nord di essere competitiva con i più importanti radiotelescopi del mondo. La notte della vigilia di Natale del 1967 A. Braccesi e G. Grueff poterono vedere le prime radiosorgenti con la Croce del Nord di 600 x 320 m che aveva un potere risolvente $3' \times 10'$. Un primo lotto di osservazioni produsse un catalogo preliminare di 328 radiosorgenti a 0.2 Jy che fu pubblicato nel luglio del 1968 (Grueff e Vigotti 1968).

In seguito, nel 1970 venne pubblicato, sulla rivista «Astronomy and Astrophysics», il B2.1, che conteneva più di 3000 radiosorgenti con luminosità apparente fino a 0.2 Jy, almeno cinque volte inferiore a quella dei grandi cataloghi allora esistenti, con forte impatto a livello internazionale. L'articolo sul B2.1, per qualche anno, fu il più citato a livello internazionale fra gli articoli italiani di astronomia (Colla *et al.* 1970). Nei tre anni successivi continuarono le osservazioni sistematiche e si pubblicarono i successivi cataloghi B2.2, B2.3

e B2.4 che contenevano in totale circa 10.000 radiosorgenti (Colla *et al.* 1972; Colla *et al.* 1973; Fanti *C. et al.* 1974a). Per l'elaborazione informatica delle osservazioni alcuni membri del gruppo avevano scritto il software necessario. Fu possibile accedere al calcolatore IBM del CNEN, ora ENEA, e l'analisi dei dati fu di ordini di grandezza più rapida e certamente un po' più accurata. In parallelo alla produzione dei cataloghi si iniziò un progetto per individuare gli oggetti ottici controparte delle radiosorgenti B2, usando le stampe delle lastre fotografiche del telescopio Schmidt 48" della Palomar Sky Survey (PSS).

A margine del racconto dello sviluppo scientifico della Radioastronomia vorremmo anche ricordare come una parte notevole dei membri del gruppo partecipasse attivamente alla attività politica che ha caratterizzato i moti studenteschi del 1968 e degli anni seguenti. Nel 1968 l'Istituto di Fisica "Augusto Righi" dell'Università è occupato a partire dal 14 febbraio. Iniziano una serie di "controcorsi". Il 20 febbraio gli studenti invitano i sindacati per un incontro sui problemi della disoccupazione tecnologica sulla base di un documento elaborato in primis da Roberto Bergamini. Il 22 si tiene un meeting per il Vietnam. Il 16 marzo gli studenti respingono un referendum, ritenuto ricattatorio, sulla ripresa degli esami. Il 22 marzo si dimette il direttore dell'Istituto, prof. Ceccarelli, che firma il documento dell'occupazione, dando inizio a una "spaccatura" tra il corpo docente. L'8 aprile un gruppo di docenti, alcuni dei quali molto noti in campo scientifico, effettuano una controoccupazione che ha grande risalto sui media nazionali. Gli studenti picchettano l'ingresso per isolarli e occupano la sede centrale dell'Università. L'agitazione a Fisica continuerà fino all'inizio di maggio, provocando tra l'altro le dimissioni del Rettore Felice Battaglia. Alcuni protagonisti di quei giorni li ritroviamo poi all'IRA negli anni successivi: Roberto Bergamini, Pasquale Londrillo, Paolo Tomasi, Nando Primavera e Carlo Lari.

1.4 Impatto del catalogo B2

Il catalogo B2 ebbe un forte impatto a livello internazionale. Era meno esteso del 4C ma era molto più profondo. A quel punto il Laboratorio aveva la merce di scambio di cui M. Ceccarelli aveva sottolineato la necessità. Dal conteggio del numero di radiosorgenti in funzione del flusso ($\text{LogN} - \text{LogS}$) si arrivò senza alcun dubbio al risultato che l'Universo si è evoluto secondo il modello del "Big Bang". Lo scopo primo del progetto era stato raggiunto, anche se la "Teoria dello Stato Stazionario" era già morta a seguito della scoperta, nel 1964, della radiazione cosmica di fondo con temperatura di 2.7 °K. Colleghi stranieri cominciarono a utilizzare il catalogo B2. Per Malcolm Longair e collaboratori a Cambridge questi dati furono essenziali per completare il loro lavoro per studi cosmologici. Una indicazione chiara del passaggio dall'essere stimati all'essere richiesti.

Nel 1970 Ernst Raimond, direttore del Westerbork Synthesis Radio Telescope (WSRT) – lo strumento che all'inizio degli anni Settanta rivoluzionò la radioastronomia –, con una lettera indirizzata ad A. Braccesi invitò i radioastronomi bolognesi a utilizzare il nuovo



Figura 1.16 Al centro Alessandro Braccesi che discute con colleghi stranieri allo YERAC del 1972. Crediti: INAF-IRA.

interferometro di 1200 m, per osservare le radiosorgenti B2 a una diversa frequenza, 1.4 GHz, e con risoluzione migliore (circa 20") raffinando le posizioni B2 per le identificazioni ottiche. Questa proposta fu accettata con entusiasmo e nella primavera del 1971 Carlo Lari si recò a Leiden per tre mesi per osservare una selezione di radiosorgenti del catalogo B2. Tornò con molti dati e, dopo aver sviluppato il software necessario, fu possibile realizzare le mappe delle sorgenti B2 osservate con WSRT. I risultati ottenuti furono mostrati al gruppo di Leiden in una visita successiva di C. Lari e R. Fanti. L'ottima qualità di questi risultati permise di stabilire una collaborazione duratura con i colleghi olandesi e un accesso continuo al WSRT che inizialmente non era aperto ai non olandesi.

Questo segnò l'inizio di una lunga collaborazione fra l'IRA e gli istituti olandesi. Ricercatori olandesi come Jet e Peter Katgert trascorsero un anno (1975) all'IRA mentre ricercatori dell'IRA, fra cui R. Fanti, C. Lari e P. Parma, si recarono regolarmente alle università di Leiden e Groningen. A partire dal 1980 Hans de Ruiter e in seguito Jan Brand si trasferirono all'IRA in modo permanente. Più tardi Raffaella Morganti si trasferì a Groningen. Alcune delle collaborazioni fra astronomi olandesi e astronome dell'IRA sono sfociate in matrimoni.

Studenti laureatisi con tesi svolte all'IRA iniziarono ad andare in Olanda per il loro progetto di tesi di dottorato. Alcuni di loro hanno trovato una posizione di lavoro e sono rimasti in Olanda, altri sono tornati a Bologna o comunque in Italia.

1.5 Identificazione ottica di radiosorgenti

Per identificare le controparti ottiche delle radiosorgenti si cercavano, entro l'area di errore posizionale della sorgente radio, gli oggetti ottici presenti sui Prints della Palomar Sky Survey (PSS), classificandoli secondo la loro morfologia. In questo lavoro venne coinvolta Liliana Formiggini, borsista CNR. Per fare una ricerca sistematica vennero prodotte delle mappe di identificazione, chiamate "overlay", sulla stessa scala dei Prints della PSS, con marcate le stelle e la posizione della sorgente radio. Le mappe venivano disegnate su plastica trasparente dal plotter munito di una puntina d'acciaio.

I dati digitalizzati delle posizioni delle stelle dello Smithsonian Stars Catalogue erano disponibili a Bologna presso il prof. Aldo Kranic sotto forma di schede perforate, contenute in molte cassette. Si trattò di copiare tutte le schede perforate che poi vennero memorizzate su disco magnetico. Per questo fu utilizzato il computer IBM 1620 della facoltà di Ingegneria di Bologna che però venne concesso solo nelle ore serali/notturne quando non era usato dalla facoltà. Aldo Spizzichino e Liliana Formiggini passarono molte notti in via Saragozza, sede della facoltà di Ingegneria, con un tecnico che doveva aprire la porta e controllare che tutto funzionasse. In pratica il tecnico, gentilissimo, si metteva a dormire sulla poltrona sdraio e, quando il lavoro era completato, veniva svegliato e chiudeva la porta. Il passo successivo consisteva, dopo aver individuato l'oggetto ottico corrispondente alla radiosorgente e averne misurato le coordinate, nella determi-

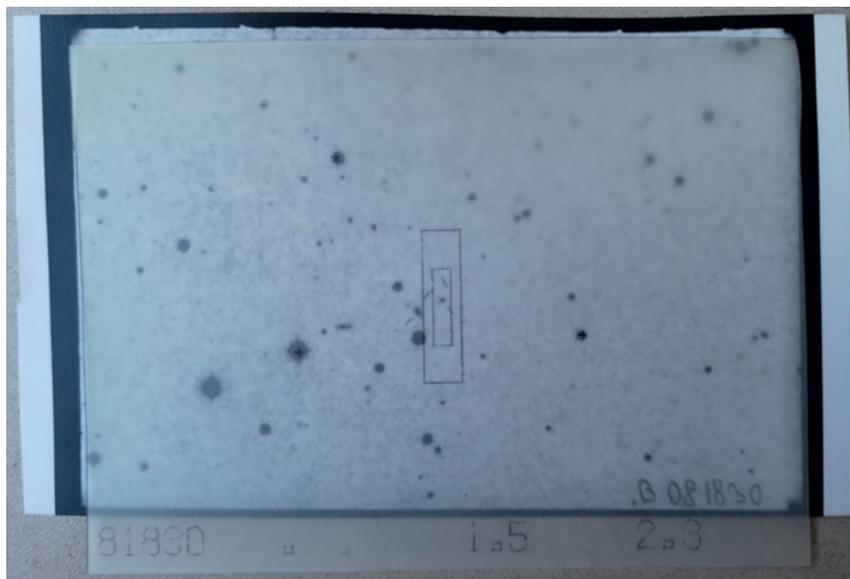


Figura 1.17 Un "overlay" con disegnati i due rettangoli corrispondenti a due livelli di incertezza sulla posizione della radiosorgente B2 0818+30. L'"overlay" è posizionato sul Print della Palomar Sky Survey. Crediti: INAF-IRA.

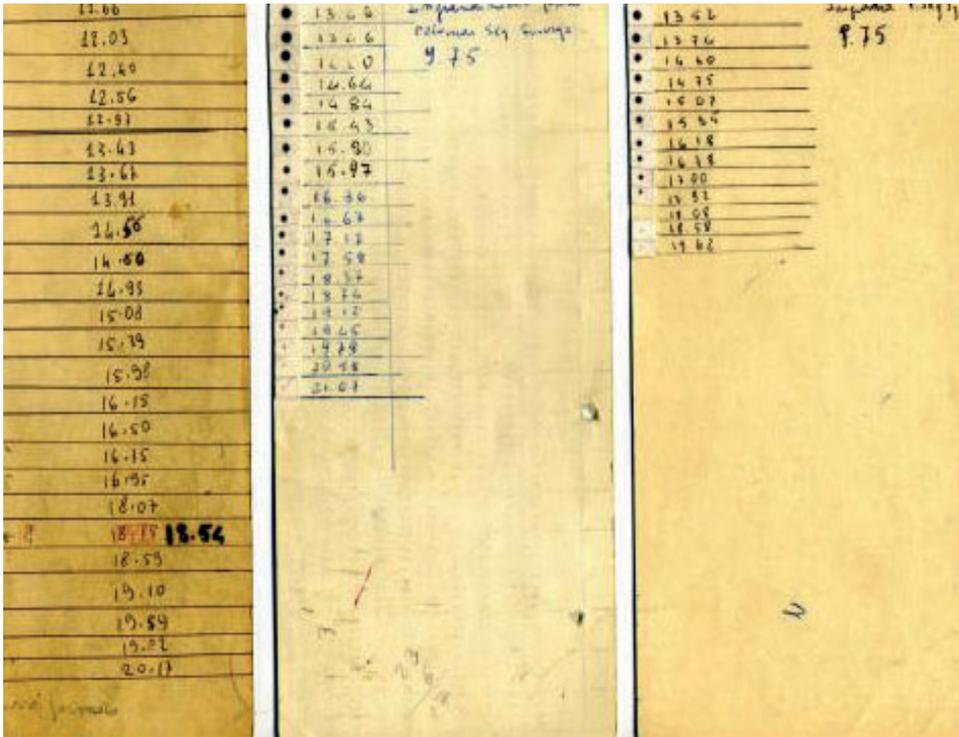


Figura 1.18 Per determinare la magnitudine ottica di una galassia si confrontava la sua immagine con una serie di foto di galassie con magnitudine conosciuta (“scaletta”). Crediti: INAF-IRA.

nazione della sua magnitudine ottica attraverso un confronto con una “scaletta”, cioè con una serie di foto di galassie con magnitudine conosciuta.

Questo metodo con i primi “overlay” fu presentato al Congresso della SAI 1967, a Padova, e poi divenne di uso comune per varie ricerche. Da questo lavoro “preistorico” ebbe inizio l’identificazione ottica delle radiosorgenti dei cataloghi radio prodotti dalla Croce del Nord.

Fondamentale per questo lavoro fu la costruzione, in loco, di un misuratore di coordinate realizzato modificando il COSO2, costruito come comparatore di lastre fotografiche per lo studio dei quasar (vedi ricerca di quasar radio quieti), che venne successivamente interfacciato a un elaboratore (Callegari 1978; Gallerani *et al.* 1982; Vigotti e Grueff 1985). Tutto il lavoro fotografico connesso con le identificazioni e con la misura delle posizioni delle stelle sugli “overlay” fu eseguito da Nando Primavera.

Questo metodo di identificazione con la strumentazione apposita ebbe molto successo e venne utilizzato da colleghi di altri istituti italiani e attirò anche astronomi stranieri, per esempio Jet Katgert dall’Olanda.



Figura 1.19 Franco Mantovani al lavoro con il misuratore di coordinate (COSO2). Crediti: INAF-IRA.

1.6 La ricerca di quasar radioquieti

Dopo l'identificazione del primo quasar (3C273) nel 1963, se ne aggiunsero molti altri nel breve arco di un paio di anni, sia da identificazioni di radiosorgenti che da oggetti che sulle lastre fotografiche mostravano eccessi nell'ultravioletto. Ma vi era un problema: a parità di eccesso uv il numero delle stelle rispetto ai quasar era enorme ed era necessario un ulteriore criterio per poterli estrarre. Fu Alessandro Braccesi, allora visiting scientist al Palomar, ad avere una brillante intuizione. Avendo le stelle uno spettro termico e i quasar uno non termico, questi ultimi si dovevano distinguere per la presenza anche di un eccesso nel vicino infrarosso (Banda I). Questo diede l'avvio a un lavoro importante di costruzione di campioni di quasar radioquieti a Bologna, nell'ambito di un accordo di collaborazione tra il CNR e la National Science Foundation negli USA. Questa collaborazione prevedeva una campagna di osservazione al telescopio 48" del Palomar per la raccolta di lastre fotografiche, la costituzione di un gruppo di lavoro al Laboratorio di Radioastronomia di Bologna per l'analisi del materiale fotografico e la costruzione di strumentazione adatta allo scopo e una successiva campagna di studio spettroscopico degli oggetti trovati per confermarne la natura. Il gruppo di lavoro a Bologna era composto da Alessandro Braccesi, Liliana Formiggini, Giuliano Colla, Antonino Ficarra, Luciano Baldeschi, Pierluigi Cova. Le campagne di osservazione di A. Braccesi del 1967-1968 e 1969

produssero circa 100 lastre e furono eseguite 100.000 misure. L'esecuzione materiale delle misure fu affidata a studenti con mansioni di operatori-scanner, tra cui Bruno Giorgini, Ernesto Cicconetti e Valentina Zitelli. Ulteriori lastre furono ottenute negli anni Settanta.

Con l'aiuto di M. Ceccarelli e di U. Dall'Olmo, furono costruiti artigianalmente nel Laboratorio due strumenti di nuova concezione adatti al programma di riduzione dei dati: 1) microscopio – blink e fotometro a iride collegato con una perforatrice automatica di schede per avere la scrittura automatica delle letture dell'iride fotometrica; 2) microscopio comparatore a sovrapposizione di immagini che permetteva la visione simultanea di una coppia di immagini. Questi strumenti vennero denominati COSO1 e COSO2, cioè “comparatore di oggetti stellari ottici”, ed erano stati costruiti in modo da poter utilizzare le lastre di 36 x 36 cm del Palomar.

Durante i moti di contestazione degli studenti nella primavera del Sessantotto e l'occupazione dell'Istituto di Fisica, l'importanza del programma di collaborazione con gli USA venne riconosciuta dagli studenti che “occupavano” l'Istituto, per cui fu concesso a L. Formiggini il permesso di entrare la mattina e di poter lavorare nella stanza dove erano i due strumenti, mentre le stanze accanto erano occupate da studenti che presidiavano l'Istituto e dormivano nei sacchi a pelo.

Le riduzioni dei dati vennero eseguite tramite il calcolatore IBM 1620 della facoltà di Ingegneria di Bologna e in seguito anche con l'elaboratore CDC 6600 del Centro di Calcolo Interuniversitario a Casalecchio (Bologna).

Un primo catalogo più brillante di $B = 19.4$ su 36 gradi quadrati coperti dalle lastre fotografiche del telescopio Schmidt da 48” del Palomar che A. Braccesi aveva riportato dagli USA a Bologna mostrava una pendenza molto ripida dei conteggi in funzione della magnitudine. Per la prima volta era messa in evidenza la presenza di una forte evoluzione cosmologica dei quasar radio quieti, cioè dei quasar che non emettevano nella banda radio (Braccesi e Formiggini 1969; Braccesi, Formiggini e Gandolfi 1970). L'articolo di Braccesi e Formiggini del 1969 fu recensito da «Nature» (1969, vol. 224, 751) che mise in evidenza l'importanza dei risultati ottenuti per la cosmologia restringendo i possibili modelli di Universo.

Un sostanziale passo avanti nella ricerca e nello studio delle proprietà dei quasar radioquieti avvenne coi lavori di Formiggini *et al.* (1980) e Braccesi *et al.* (1980), in cui l'esame approfondito delle parti centrali delle lastre del Palomar permise di selezionare un campione di quasar radioquieti con magnitudine blu maggiore di 20. L'analisi di questi oggetti dimostrò una forte evoluzione in densità della funzione di luminosità dei quasar.

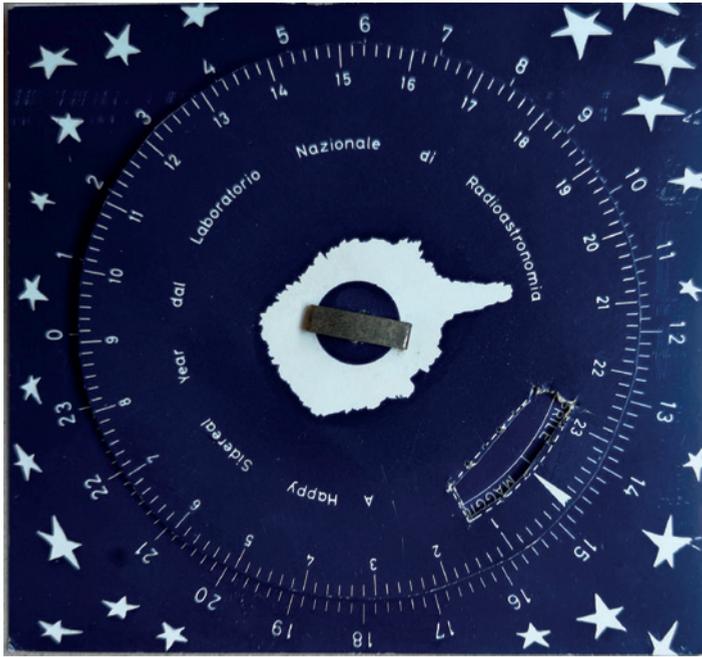


Figura 1.20 “Orologio” tascabile di cartone che permette di passare dall’ora solare all’ora siderale e viceversa. Piccolo strumento molto utile per conoscere l’ora locale del sorgere e del tramontare di una radiosorgente da osservare. Crediti: INAF-IRA.

2. Dal Laboratorio di Radioastronomia all'Istituto di Radioastronomia del CNR

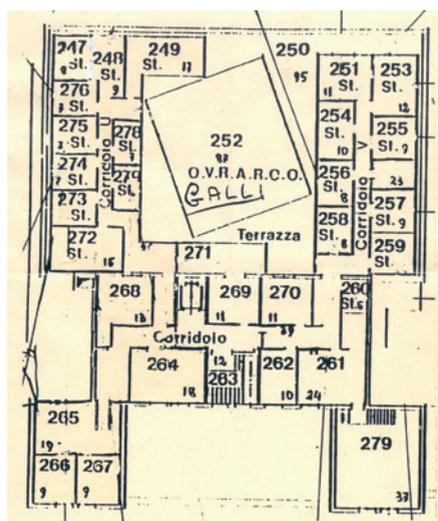
Restava un importante punto irrisolto: dare alla Radioastronomia un assetto istituzionale. L'operazione "Laboratorio Nazionale di Radioastronomia" del Ministero della PI era fallita e ci vollero molti passi per convincere il CNR a farsi carico della Croce del Nord e della Radioastronomia italiana. Questo avvenne con successo alla fine del 1970 grazie anche al ruolo fondamentale giocato, ancora una volta, da G. Puppi. Il CNR istituì il Laboratorio di Radioastronomia, diventato poi Istituto di Radioastronomia (IRA) nel 1979. G. Setti era tornato a Bologna nel 1967, dopo essere stato a Leiden (Olanda) e a Roma presso il Centro di Astrofisica di Frascati, e aveva creato un gruppetto di astrofisica teorica legato al ROUB, comprendente C. Lari, R. Bergamini e P. Londrillo. G. Setti fu il primo direttore dell'IRA dal 1970 e lo rimase per molti anni fino al 1992. Sotto la sua direzione, l'Istituto si espanse, non solo come numero di ricercatori, ma anche nella ricerca scientifica. Fu sotto la sua direzione e con il suo contributo che si arrivò al progetto VLBI. Quando Giancarlo Setti, nel 1982, assunse l'incarico di direttore scientifico dell'ESO, a Garching (Germania), nominò come facente funzioni prima Gavril Grueff e poi dal 1986 Lucia Padrielli. Lucia assunse poi la direzione dal 1992 al 1999.

L'Università di Bologna assegnò all'IRA la gestione della Croce, tuttora di sua proprietà, insieme a un contributo per le spese ordinarie. In seguito il CNR acquistò il terreno su cui sorge la Croce. Tramite il Laboratorio/Istituto di Radioastronomia, il CNR garantiva un finanziamento regolare per la ricerca e la strumentazione, le posizioni stabili per ricercatori e tecnici e la possibilità di sviluppi successivi, sia tecnici che informatici. In tempi accettabili furono disponibili svariati posti di lavoro, fra tecnici e ricercatori.

Il nucleo iniziale fu costituito da Roberto Bergamini, Alberto Bombonati, Giuliano Colla, Pierluigi Cova, Carla e Roberto Fanti, Antonino Ficarra, Enzo Gandolfi, Liliana Formiggini, Gavril Grueff, Carlo Lari, Franco Magaroli, Bruno Marano, Alfonso Micheloni, Lucia Padrielli, Cesare Rizzi, Giancarlo Setti, Gianfranco Sinigaglia, Paolo Tomasi, Goliardo Tomassetti e Mario Vigotti. Il legame con l'Università di Bologna rimase sempre molto forte grazie a contratti di collaborazione gratuita contemplati dal

CNR per i docenti universitari che poterono continuare la loro attività di ricerca all'interno dell'Istituto.

La sede del Laboratorio di Radioastronomia e poi dell'IRA, Istituto del Consiglio Nazionale delle Ricerche, si trovava in locali prefabbricati in legno e materiali (poco) isolanti detti "baracche" poste sul tetto a terrazza dell'Istituto di Fisica dell'Università di Bologna, in via Irnerio 46. Si poteva raggiungere con un montacarichi o attraverso lo scalone del palazzo fino al secondo piano proseguendo lungo una stretta scala per raggiungere il tetto. Non disponiamo di immagini dei locali. Ci basti una breve descrizione. Due baracche disposte parallelamente costituivano buona parte dell'Istituto. Ognuna ospitava piccoli uffici, le cui porte venivano lasciate dagli occupanti sempre aperte, disposti ai lati del corridoio centrale. L'ambiente ristretto impediva ogni forma di riservatezza. Ognuno dei due corridoi ospitava in un angolo un unico apparecchio telefonico. Allo squillare del telefono la persona più prossima sollevava la cornetta e poi chiamava a gran voce il destinatario della chiamata. Gli uffici erano ben riscaldati l'inverno... e purtroppo anche d'estate. Una terza baracca, che ospitava la strumentazione per un esperimento dei fisici sui raggi cosmici, era interposta tra le due baracche IRA e il suo



a)

Occupazione 3 Piano Istituto A. Righi in data 1974 (?)

- 247 8 m² Kurt Weiler
- 248 9m² laureandi
- 249 17m² lab Donati (OVRARCO)
- 250 spazio terrazzo intorno Lab. OVRARCO
- 251 11m² Bergamini
- 252 Lab OVRARCO (Galli)
- 253 12m² Fanti C e Lari
- 254 10m² Tomasi
- 255 8m² FantiR
- 256 8 m² terminale CNEN
- Tra 255 e 257 spazio x incontri
- 257 9m² Ficarra
- 258 8m² Parma e Gioia
- 259 9m² Padrielli
- 260 8m² Marano
- 261 22 m² Laboratorio (lastre, misuratore coordinate, plotter ecc)
- 262 10m² Laboratorio Fotografico (Primavera)
- 263 Atrio - scale
- 264 18m² Biblioteca e Lab. Grafico (Baldeschi)
- 265 10m² Materiale amministrazione (Archivio)
- 266 9m² Arbizzani (Segretaria Amministrativa)
- 267 9m² Volta P. e Zanlungo P (segreteria - dattiloscritti)
- 268 12m² Galli
- Ascensore
- 269 15m² Laboratorio Fotografico
- 270 8m² Formiggini
- 271 10m² Camera Oscura
- 272 18m² Setti (Direzione)
- 273 8m² Grueff
- 274 6m² Vigotti
- 275 6m² Vettolani e Zamorani
- 276 6m² Panagia
- 277 6m² Studio ROUB (materiale Medicina di Grueff)
- 278 6m² Laboratorio ROUB-Grueff

b)

Figura 2.1 Mappa a) e occupazione b) delle baracche situate sul terrazzo dell'Istituto di Fisica dell'Università di Bologna, sede del Laboratorio di Radioastronomia poi Istituto di Radioastronomia. Crediti: INAF-IRA.

rumoroso sistema di condizionamento si mescolava coi rumori prodotti dalla normale attività dei ricercatori. La struttura delle baracche era costruita con pannelli ignifughi. Si provò che resistevano al fuoco quando un cortocircuito provocò un incendio nella camera oscura e le fiamme si estinsero senza propagarsi agli altri locali. I pannelli resistevano meno all'acqua.

Ogni infiltrazione, ed erano frequenti specie dopo alcuni anni dalla costruzione, causava seri danni. Diversi uffici, compreso quello che ospitava il direttore facente funzione Lucia Padrielli, mostravano abnormi deformazioni e aloni nel soffitto. I soli locali in muratura erano il laboratorio a microonde, sistemato al piano sotto, la segreteria e la biblioteca IRA, che erano ospitati nella parte alta delle due torri che caratterizzano il fronte dell'Istituto di Fisica. Erano stanze male illuminate dalle lunette della parte superiore dei finestroni della facciata del palazzo. Un mistero come si potesse fare ricerca in quelle condizioni, ma ci si riusciva, e anche bene! Le baracche furono smantellate quando l'IRA si trasferì presso l'Area di Ricerca del CNR nel 1993.

Nel periodo 1972-76, sotto la gestione CNR, fu possibile un robusto aggiornamento della Croce del Nord. Il ramo NS fu tagliato nel senso della lunghezza e le antenne, diventate lunghe circa 23.5 m, furono ridistribuite in modo da ottenere un ramo di 600 m, raddoppiando così il potere risolvente totale (2.6' x 4.8') della Croce del Nord. Nel 1976 vennero installati nella Croce del Nord quattordici ricevitori per la cui progettazione erano state sfruttate tutte le esperienze e le conoscenze a disposizione dei tecnologi dell'IRA (Tomassetti 2016). L'alta qualità della terza generazione di ricevitori impiegati a Medicina, progetto MARK3, era dovuta essenzialmente all'uso di transistor di ultima generazione, alla stabilità elettrica e meccanica, all'accurata termostatazione e alimentazione in continua e all'uso di circuitistica allo stato dell'arte. Si erano finalmente raggiunte temperature di rumore del ricevitore inferiori, anche se di poco, ai 100 °K.

Le modifiche radicali all'elettronica e al software di gestione ed elaborazione dati fecero funzionare la Croce del Nord come un interferometro multiplo con 6 sezioni EW per 8 sezioni NS, permettendo di ottenere dati migliori. L'acquisizione dati della Croce del Nord era gestita da uno dei primi computer della SELENIA, il GP16 (Ficarra *et al.* 1977).

In quegli anni nella stazione lavoravano anche Romano Andalò e Gemma Cevenini.

Fino al 1980 il lavoro a Medicina si svolgeva in baracche prefabbricate fornite dall'ENI, non proprio eleganti però molto accoglienti. Contenevano l'officina meccanica, gli uffici, l'aula degli studenti e dei visitatori, una cucinetta, un grande laboratorio e i servizi. Col tempo e la scarsa manutenzione le baracche iniziarono a degradare. Si arrivò al punto che la porta di accesso alla stazione non si riusciva più a chiudere. L'unica parte in muratura della stazione era abitata dal custode Renato Trivelloni. Capitava che in piena notte il ricercatore al lavoro nella rumorosa stanza dei ricevitori si sentisse salutare con un vigoroso: «Buona sera. Tutto bene!» da qualcuno entrato inosservato. Per fortuna erano sempre i carabinieri della vicina caserma di Portonovo in perlustrazione.



Figura 2.2 Fino al 1980 il lavoro alla stazione radioastronomica di Medicina si svolgeva in baracche prefabbricate molto spartane. Crediti: INAF-IRA.

Dall'inizio degli anni Ottanta, per circa tre anni, fu presente a Medicina il cantiere per la costruzione della nuova stazione, che rese molto difficili le attività scientifiche e tecniche. Il risultato però fu di una stazione completamente rinnovata.

A cominciare dal 1982 si progettò la nuova acquisizione dati della Croce del Nord e fu utilizzato un Apple II Plus con una memoria di 48K. Questa piccola macchinetta era più che sufficiente per controllare il banco di correlatori, posizionare il cherosene nel ramo NS, impostare i ritardi variabili nelle catene NS, acquisire i dati delle catene EW e NS e memorizzarli su un'unità nastro della Mactronics, gestita via IEEE 488 con una routine scritta da Gianni Comoretto. Con questo nuovo sistema fu prodotto un nuovo catalogo, il B3 (Ficarra, Grueff e Tomassetti 1985) di 13354 sorgenti, a un flusso limite di 0.1 Jy, due volte inferiore a quello del B2. Il catalogo B3 ebbe un impatto notevole a livello internazionale, anche per la tecnica innovativa con cui furono effettuate le osservazioni.

Negli stessi anni continuò la ricerca tecnologica focalizzata alla riduzione della temperatura di sistema che è data dalla somma della temperatura di rumore del ricevitore, circa 100 °K, della temperatura del cielo, che a 408 MHz è circa 40 °K, e della parte più preponderante, cioè la temperatura di circa 300 °K delle linee di trasmissione. Abbandonata la soluzione possibile, ma molto complessa, di installare i ricevitori, o parte di essi, direttamente all'uscita di ciascuna delle sei sezioni di antenne, si optò



Figura 2.3 Scuola di Erice (1979). Da sinistra in ginocchio: Bruno Marano, Marino Mezzetti, Edoardo Trussoni, Amerigo Setti, Paola Parma, Leonardo Setti, Loretta Gregorini. Da sinistra in piedi: Hans de Ruiter, Monica Tosi, Gianni Zamorani, Luigina Feretti. Crediti: INAF-IRA.

per l'utilizzo di un nuovo transistor che avrebbe garantito una temperatura inferiore ai 50 °K. Furono quindi costruiti dei nuovi amplificatori che vennero distribuiti lungo il ramo EW. I nuovi "front-end" vennero posti in ambiente termostato all'interno di sei contenitori stagni, costituiti da recipienti per il trasporto del latte, utilizzati dalle aziende agricole circostanti la stazione radio di Medicina. Gli ultimi miglioramenti portarono la temperatura di sistema prossima ai 150 °K (Tomassetti 2016).

Fra gli anni Settanta e Ottanta il personale dell'IRA aumentò notevolmente con l'arrivo di R. Ambrosini, I. Gioia, T. Maccacaro, F. Mantovani, S. Montebugnoli, N. Panagia, P. Parma, G. Vettolani, G. Zamorani. Anche la componente universitaria vide un'espansione con S. Faondi, L. Feretti, G. Giovannini e L. Gregorini. In quegli anni vi fu anche un incremento del numero delle tesi di laurea e più tardi delle tesi di dottorato svolte da studenti all'interno dell'IRA sulle tematiche scientifiche dell'istituto. Tutto ciò creò, fra Università e IRA, un'atmosfera di reciproco scambio, che permise una crescita sia in campo scientifico che tecnologico per entrambe le istituzioni. In quegli anni, i ricercatori ebbero l'opportunità di scambi internazionali attraverso le 5 "Scuole di Erice", dirette da G. Setti nell'ambito della "International School of Astrophysics", che si tennero nel 1972, 1974, 1977 e 1979 a Erice (Trapani) e nel 1975 a Urbino (Pesaro). Oltre che promuovere collaborazioni scientifiche, queste scuole permisero di far conoscere l'IRA a livello internazionale.

Nel 1983 fu attivato presso l'Università di Bologna il dottorato in Astronomia a cui hanno attivamente contribuito anche i ricercatori dell'IRA. I primi a ottenere il titolo di dottore di ricerca, insieme ad Alberto Buzzoni, furono Raffaella Morganti con una tesi sulle proprietà delle radiogalassie di bassa potenza e Anna Rogora con una tesi sui quasar del catalogo B2. Da allora i radioastronomi formati alla scuola di dottorato bolognese furono numerosi e la grande maggioranza di loro ha trovato posto presso università ed enti di ricerca sia nazionali che internazionali.



Figura 2.4 I partecipanti allo “Young European Radio Astronomers Conference” (YERAC) del 1980 fotografati sui gradini dell’Istituto di Fisica dell’Università di Bologna. Crediti: INAF-IRA.

I radioastronomi bolognesi contribuirono attivamente all’iniziativa avviata dalla comunità radioastronomica europea, a partire dal 1968, di organizzare lo “Young European Radio Astronomers Conference” (YERAC). Per molti partecipanti è il primo meeting internazionale a cui presentare il proprio lavoro e rappresenta anche un’opportunità per conoscere i colleghi degli altri Paesi con i quali spesso iniziano fruttuose collaborazioni che si protraggono negli anni. L’Istituto di Radioastronomia ha organizzato tre YERAC (1972, 1980, 1996) che sono rimasti nei ricordi di molti non solo per il contenuto scientifico ma anche per l’atmosfera simpatica, il cibo e il vino.

Dal 1980 al 2000 altre persone si aggiunsero al personale di ricerca dell’Istituto: Raffaella Morganti, Tiziana Venturi, Alfredo Gallerani e Alessandro Orfei a Bologna e Medicina; Luigina Feretti trasferita dall’Università di Bologna all’IRA; Carlo Stanghellini, Corrado Trigilio, Gino Tuccari e Grazia Umata a Noto. Alla componente universitaria si aggiunse Daniele Dallacasa. Nel centro calcolo presero servizio Mauro Nanni, Franco Tinarelli e Marco Tugnoli. Per il funzionamento della nuova parabola si aggiunsero al personale di Medicina: Claudio Bortolotti, Alessandro Cattani, Andrea Maccaferri, Giuseppe Maccaferri, Sergio Mariotti, Marco Morsiani, Mauro Roma, Giampaolo Zacchiroli e Jader Zini.

Un evento rilevante nella vita dell’IRA fu il trasloco dall’Istituto di Fisica “Augusto Righi” alla nuova Area di ricerca del CNR. Nel 1991 chi passava per la rotonda Gobetti poteva notare i lavori in corso in un grande cantiere. Con le fondamenta già terminate si iniziavano a innalzare i muri della futura Area di Ricerca del CNR. I

lavori durarono a lungo e finalmente alla fine del 1992 si cominciò a discutere sulle mappe delle sedi dei diversi Istituti e sulla organizzazione degli spazi. Per la parte dell'IRA, la direttrice Lucia Padrielli, coadiuvata da Ficarra e Nanni, seguì i lavori in dettaglio e si cominciò a pensare al trasloco, a come riempire gli scatoloni e trasferire tutto nella nuova sede.

Il trasferimento nella nuova sede era aspettato e desiderato in quanto, come detto sopra, "le baracche" sul tetto dell'Istituto di Fisica in via Irnerio 46 ormai erano a pezzi, con infiltrazioni di acqua in inverno e troppo caldo d'estate. Inoltre, l'aumento di personale e le nuove esigenze di calcolo rendevano difficile se non impossibile continuare a lavorare nella vecchia sede. Esistevano, tuttavia, anche preoccupazioni in merito al trasloco. Trasferirsi in una sede in una zona periferica, per quanto insieme a tutti gli Istituti CNR, significava allontanarsi dall'Università, dagli studenti, dall'Istituto di Fisica in cui l'IRA era nato e si era sviluppato. Il timore di perdere i contatti con la componente universitaria era forte.

Furono giorni di attività frenetica: riempire e chiudere scatoloni, decidere cosa tenere e cosa scartare in tempi in cui la carta era il principale se non unico supporto, non fu facile.

Nell'ottobre del 1993 fu effettuato il trasloco. Trovarsi in nuovi ambienti luminosi e condizionati, senza problemi per il parcheggio, con ampi spazi per la biblioteca, per le sale riunioni e per il centro calcolo, incontrò il favore di tutti. Per non perdere bruscamente i contatti con la vecchia sede e l'ambiente universitario la direzione dell'IRA organizzò a sue spese un servizio di navetta gratuita che durò alcuni mesi. Un piccolo autobus partiva un paio di volte al giorno da via Irnerio di fronte all'Istituto di Fisica, arrivava nella nuova sede in Gobetti 101 e poi ritornava.

Dopo poco tempo il vantaggio di avere ampi spazi e attrezzature iniziò a prevalere sui problemi della distanza. Il paventato distacco con il mondo universitario non ci fu e ben presto laureandi e dottorandi iniziarono a frequentare la nuova sede.

Va infine ricordato il fondamentale lavoro dell'amministrazione e della segreteria per tutte le attività dell'Istituto, non solo per la gestione dei fondi – ad esempio preventivi, consuntivi, acquisti e missioni – ma anche per il supporto organizzativo ai meeting e ai congressi, per l'assistenza in qualsiasi evento anche occasionale. Responsabile amministrativo era Brunella Arbizzani, coadiuvata per le varie mansioni da Paola Volta e Paola Zanolungo, e successivamente da Paola Cesari, Luca Minerva, Maria Rezzaghi e Margherita Tassinari. A quei tempi, inoltre, non si disponeva dei programmi di scrittura dei testi, tipo TEX, LATEX e WORD, per cui la segreteria si faceva carico di scrivere a macchina gli articoli scientifici, mentre le figure venivano realizzate da Nando Primavera, Luciano Baldeschi e Vittorio Albertazzi. I lavori, infatti, venivano sottomessi alle riviste scientifiche per posta in forma cartacea con le fotografie, e i tempi erano molti diluiti rispetto ad adesso!



Figura 2.5 Lucia Padrielli, direttrice dell'IRA dal 1993 al 1999, quando fu nominata membro del Consiglio Direttivo del CNR. Crediti: INAF-IRA

3. Scienza con la Croce del Nord

Oltre alla pubblicazione dei cataloghi radio sono state molte le ricerche portate avanti con dati ottenuti dalla Croce del Nord. Qui ne sono descritte solamente alcune con lo scopo di mostrare l'ampio panorama scientifico al quale hanno contribuito i risultati delle osservazioni col radiotelescopio.

Grazie al lavoro di identificazione ottica, le sorgenti del catalogo B2 furono confrontate con le galassie dei cataloghi ottici disponibili (de Vaucouleurs G. e de Vaucouleurs A., 1964; Zwicky, Herzog e Wild 1963, 1966). I possibili candidati alle identificazioni furono poi osservati con il radiotelescopio WSRT per eliminare le identificazioni spurie e ottenere quindi un campione di radiogalassie B2 (Braccesi *et al.* 1970; Fanti R. *et al.* 1973) il cui notevole impatto scientifico è discusso più dettagliatamente in seguito.

Nel vasto campo di ricerche condotte con la Croce del Nord non poteva mancare uno studio delle proprietà dei quasar. All'inizio degli anni Settanta erano conosciuti circa 200 quasar. Di questi, solo una piccola parte apparteneva a campioni statisticamente ben definiti come il 3CR e il 4C. Di conseguenza gli studi delle loro proprietà erano problematici. Fu quindi naturale, dopo la produzione del catalogo B2, procedere alla selezione di candidati quasar, per migliorare le conoscenze di questa classe di oggetti e per individuare oggetti con potenza radio più debole del limite del 3CR e 4C. Furono estratti 116 candidati (Bergamini *et al.* 1973; Fanti C. *et al.* 1975a) con flusso ≥ 200 mJy, identificati con oggetti stellari visibili sulla Palomar Sky Survey e caratterizzati dall'eccesso ultravioletto tipico dei quasar. Il campione fu successivamente ripulito utilizzando posizioni radio accurate ottenute da osservazioni a 6 cm con WSRT (parte del lavoro costituì la tesi di laurea in Fisica di Gabriele Giovannini), e lastre multicolore ottenute al telescopio 48" Schmidt di Mount Palomar da A. Braccesi. Il campione finale consisteva di 74 quasar con flusso radio > 200 mJy e magnitudine blu apparente < 21 . Da studi successivi a 1.4 GHz con WSRT furono ottenuti importanti risultati. Le radiosorgenti mostravano strutture principalmente doppie spesso asimmetriche, dette "one-sided" o non risolte, spettri con appiattimento ad alta frequenza a dimostrazione dell'esistenza di una componente compatta con spettro piatto

o invertito, conteggi consistenti con evoluzione di densità in un Universo di Friedman, e funzione di luminosità in notevole accordo con quella dei nuclei delle galassie ellittiche (Fanti C. *et al.* 1975b, 1977; Fanti R. *et al.* 1979). Questi studi contribuirono alla derivazione del modello unificato delle radiosorgenti soprattutto a bassa potenza.

Negli anni Ottanta il campione di quasar deboli fu osservato anche con il VLA a 5.0 GHz e i dati vennero ridotti e analizzati da A. Rogora per la sua tesi di dottorato. I quasar B2, più deboli di quelli del catalogo 3C, mostrano un'alta percentuale di radiosorgenti triple con un forte disallineamento dei lobi rispetto al nucleo, molto maggiore rispetto ai quasar 3C. Questo suggerisce che essendo deboli sono fortemente influenzati dal mezzo esterno, cioè confinati e distorti.

Una ricerca che contribuì a chiarire un fenomeno molto studiato negli anni Settanta fu quella che riguardò le sorgenti variabili. La variabilità delle sorgenti radio a frequenze maggiori di 1 GHz era ben nota e studiata, ma le teorie correnti non prevedevano variazioni cospicue a basse frequenze, se non invocando fenomeni superluminali estremi e temperature di brillantezza inaccettabilmente alte. Tuttavia, venivano sempre più di frequente segnalati fenomeni di variabilità a bassa frequenza. Era necessario quindi uno studio più approfondito.

Nel 1975 cominciò, sotto la guida di Carla e Roberto Fanti e Lucia Padrielli, un lavoro sistematico, che si protrasse fino agli anni Novanta, di osservazioni a 408 MHz, col solo ramo EW, di un campione di sorgenti variabili, che crebbe negli anni fino a raggiungere 125 oggetti. Alle osservazioni, quasi mensili, collaborarono anche A. Ficarra, L. Gregorini e F. Mantovani.

La tecnica di osservazione prevedeva di puntare il ramo EW alla declinazione prevista per ogni sorgente della lista e attendere che transitasse sopra il radiotelescopio. Al suo passaggio, sul registratore a carta veniva disegnato il profilo puntiforme della radiosorgente. Dalla sua altezza si ricavava la densità di flusso emessa dall'oggetto. Tutte le operazioni di puntamento si eseguivano manualmente, mediamente ogni venti minuti, alimentando i motori elettrici di movimentazione. Si verificavano a volte problemi meccanici ai riduttori posti sulle centine del radiotelescopio. La loro meccanica non era stata disegnata per sopportare frequenti cambiamenti in declinazione. La sessione osservativa si prolungava per tre giorni (e notti) indipendentemente dalle condizioni atmosferiche. I ricercatori si davano il cambio ogni otto ore. I risultati dello studio delle sorgenti variabili furono pubblicati in diversi articoli, fra cui in Fanti C. *et al.* (1983c) e Bondi *et al.* (1996a).

Una sera, tra il 26 e il 27 novembre 1977, il cielo minacciava neve. Le antenne del ramo NS non impiegate nelle osservazioni furono poste nella posizione di riposo. La lunga antenna in EW continuò a muoversi anche quando iniziò a nevicare. Le registrazioni risultavano buone e fu deciso di continuare. Verso le tre di notte venne a mancare l'energia elettrica e la stazione rimase completamente al buio. All'unico osservatore presente non rimase che raggiungere a tentoni la stanza da letto col proposito di avvisare per tempo via telefono il ricercatore del turno successivo. Si poteva evitarli il viaggio nella tempesta per raggiungere il radiotelescopio. Quando verso le sei provò a chiamare

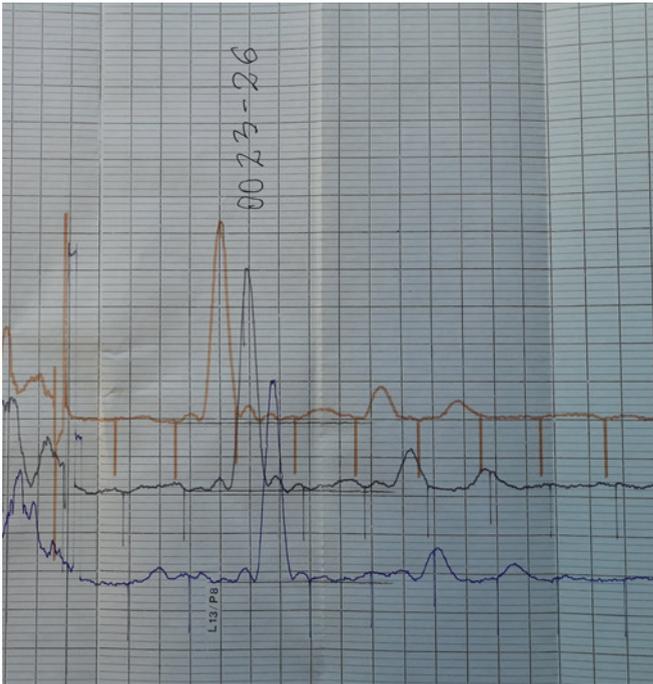


Figura 3.1 Osservazione della sorgente variabile 0023-26 con il ramo Est-Ovest della Croce del Nord. I tre tracciati su carta corrispondono a tre direzioni in EW leggermente diverse, tecnicamente chiamati "beam". Crediti: INAF-IRA.

anche le linee telefoniche risultarono interrotte. Intanto il cielo andava schiarendosi nonostante la neve continuasse a cadere. Lo spettacolo che si presentò fu peggiore di un incubo. Buona parte delle antenne del NS era crollata a terra o risultava distorta sotto il peso della neve. Poco prima delle otto A. Ficarra, puntuale come sempre, raggiunse la stazione per il cambio turno. Fu il secondo testimone della devastazione del ramo NS della Croce. Il ramo EW invece non mostrava danni apparenti alla struttura metallica. Per puro caso quando era mancata l'energia elettrica l'antenna si era trovata nella posizione di riposo. Certamente averla mossa per i frequenti puntamenti aveva contribuito a scrollare dalla struttura la pesante neve che stava cadendo. Passati i primi momenti di rabbia e tristezza per la devastazione del ramo NS, iniziarono progetti e lavori per ripristinarlo e dopo alcuni mesi ritornò a essere funzionante.

Intorno agli anni 1979-1980, la collaborazione con M.F. Aller e H.D. Aller dell'Università del Michigan fornì osservazioni simultanee delle sorgenti variabili a 4.8, 8.0, 14.5 GHz. Questo lavoro rivelò l'esistenza di tre modalità di comportamento, riassumibili come: i) variabilità in flusso solo a lunghezze d'onda metriche; ii) continuità in tempo e in ampiezza delle variazioni in flusso dalle alte alle basse frequenze; iii) variazioni a tutte le frequenze, ma scorrelate, presumibilmente la sovrapposizione dei primi due casi. Questo suggerì due cause diverse per la variabilità. Una *intrinseca*, la seconda modalità

citata sopra, dovuta all'espansione relativistica di plasmoidi che irradiano per sincrotrone secondo il modello van der Laan (1966), e una presumibilmente *estrinseca*, la prima modalità, dovuta a scintillazione nel mezzo interstellare della galassia, fenomeno plausibile, ma allora ancora sconosciuto.

Per verificare le due ipotesi era necessario ottenere immagini delle radiosorgenti, o delle loro sottostrutture, con risoluzioni dell'ordine dei millesimi di secondi d'arco (mas). Da qui lo stimolo a intraprendere osservazioni con la rete VLBI globale a 18 cm con 8-11 antenne, a seconda della disponibilità delle stazioni radioastronomiche. In quei tempi la rete VLBI era ancora in una fase operativa pionieristica, come verrà commentato più avanti. Le osservazioni VLBI, ripetute nel tempo (1980, 1981, 1987), mostrarono che variazioni di struttura o nascita di nuove componenti erano correlate con aumenti di flusso solo per le sorgenti il cui comportamento è spiegato da cause intrinseche. Per le altre radiosorgenti, lo studio dei parametri quali indice e periodo di variabilità, rivelò una buona correlazione con la latitudine galattica, mostrando che il fenomeno è esterno alla radiosorgente e avviene nella galassia. Le dimensioni delle strutture radio permisero di stimare le dimensioni delle disomogeneità del mezzo interstellare responsabile della scintillazione, e la velocità con cui queste disomogeneità si muovono. La trattazione teorica di questo fenomeno fu condotta in collaborazione con Steven Spangler dell'Università di Iowa (USA) (Spangler *et al.* 1989). L'interpretazione della variabilità radio a bassa frequenza delle sorgenti extragalattiche fu l'argomento della tesi di dottorato di Marco Bondi (Bondi *et al.* 1994).

Su suggerimento di R. Fanti, fu iniziato uno studio delle proprietà radio delle galassie spirali. Nel 1980 fu pubblicato un articolo che presentava le osservazioni a 408 MHz di un campione ottico di queste galassie (Gioia e Gregorini 1980), che poi permise di studiarne le diverse proprietà quali la funzione di luminosità e la dipendenza dell'emissione radio da vari parametri ottici. Per proseguire lo studio del campione era necessario osservarlo a frequenze più alte. Fu merito di Chris Salter, che suggerì la possibilità di osservare queste galassie con il radiotelescopio di Effelsberg (Bonn, Germania), se si aprì una collaborazione molto lunga e proficua con i colleghi tedeschi. Per accedere al radiotelescopio era richiesto avere un collaboratore interno. C. Salter mise in contatto Isabella Gioia e Loretta Gregorini con Uli Klein, allora studente dell'Università di Bonn. Furono osservate le galassie a spirale a 4.8 GHz e 10.7 GHz determinando l'indice spettrale tra 408 MHz e 10.7 GHz (Gioia, Gregorini e Klein 1982). Questo risultato ebbe un buon successo nella letteratura internazionale. Il progetto permise, inoltre, di aprire una collaborazione con i colleghi tedeschi che proseguì per molti anni su diversi argomenti.

Furono anche osservati con la Croce del Nord alcuni ammassi di galassie vicini: per questo argomento si rimanda al paragrafo 4.2.

Appena disponibile il catalogo B3, iniziò il lavoro di selezione di un campione di radiogalassie e di quasar deboli seguendo la traccia dei lavori svolti con il catalogo B2. I colleghi del NRAO (USA) invitarono G. Grueff e M. Vigotti a osservare col VLA a 1.4 GHz, con la risoluzione di 15", un campione di 1049 radiosorgenti per identificazioni ottiche profonde e cosmologia. Venne così prodotto il catalogo

B3-VLA (Vigotti *et al.* 1989, 1990). Successivamente M. Vigotti e L. Gregorini, in collaborazione con Uli Klein e Karl-Heinz Mack del Radioastronomisches Institut der Universität di Bonn (Germania), osservarono con il radiotelescopio di Effelsberg tutte le sorgenti del B3-VLA a sei frequenze, tra 151 MHz e 10.6 GHz. Per molto tempo questo rimase il miglior catalogo multifrequenze esistente (Vigotti *et al.* 1999; Murgia *et al.* 1999).

Inoltre, per queste sorgenti vennero effettuate le identificazioni ottiche sulle lastre del 48" di Palomar. Da una prima selezione di circa 1000 candidati (Vigotti *et al.* 1989, 1990; Lahulla *et al.* 1991) fu poi ottenuto un campione finale di 125 quasar con flusso limite a 408 MHz di 100 mJy (Vigotti *et al.* 1997), che diventò oggetto di studi successivi nell'ottico, infrarosso e a diverse frequenze radio con il VLA. Per tutti i quasar più brillanti della magnitudine 20 si ottenne la determinazione del redshift ai telescopi di 2.2 e 3.6 metri di Calar Alto in Spagna (Vigotti *et al.* 1999).

La potenzialità della Croce del Nord per gli studi di radiosorgenti estese era stata dimostrata pubblicando un paio di lavori riguardanti l'osservazione del resto di supernova IC 443 (Colla *et al.* 1971a) e del Cygnus Loop (Colla *et al.* 1971b) in cui veniva messa in evidenza la eccezionale coincidenza tra la struttura filamentare radio e quella osservata nell'ottico.

Agli inizi degli anni Settanta studi preliminari avevano mostrato come la presenza di radiosorgenti estese nel catalogo B2 si concentrasse nella regione del piano galattico. In collaborazione con Marcello Felli e Gianni Tofani dell'Osservatorio Astrofisico di Arcetri

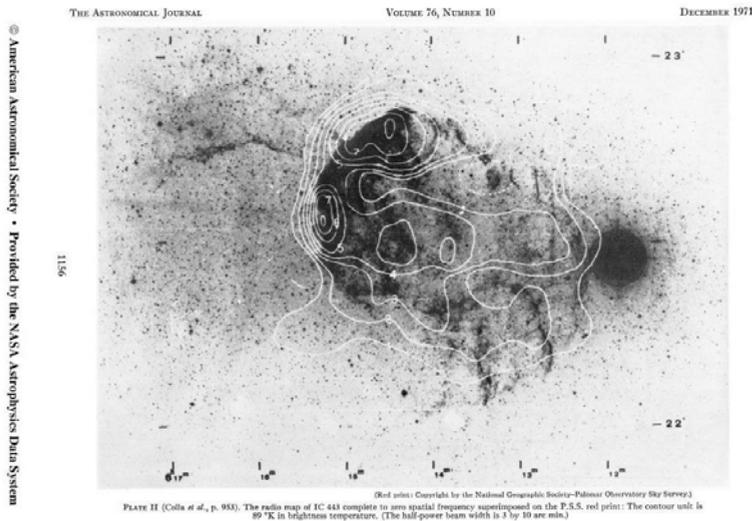


Figura 3.2 Mappa radio (contorni) del resto di supernova IC433 osservato a 408MHz con la Croce del Nord sovrapposto all'immagine ottica del Print della Palomar Sky Survey. © AAS. Riprodotta con permesso

e con Chris Salter, borsista dell'European Programme della Royal Society, fu avviato un programma osservativo con il ramo EW di una regione intorno al piano galattico, con lo scopo di ottenere le coordinate delle sorgenti puntiformi, misurare accuratamente le densità di flusso e determinare la struttura delle sorgenti estese. Fu pubblicato il catalogo BG (Bologna Galactic) con una lista di 586 oggetti con densità di flusso maggiore di 1.2 Jy (Fanti C. *et al.* 1974b). Lo studio della loro distribuzione in funzione della latitudine galattica mostrò che le sorgenti puntiformi avevano una distribuzione uniforme rispetto al piano galattico, e quindi erano nella maggior parte dei casi extragalattiche, mentre quelle estese si addensavano intorno al piano galattico ed erano perciò prevalentemente galattiche. Questo lavoro fu seguito da una analisi per stabilire la natura delle sorgenti puntiformi (Fanti C. *et al.* 1975c) e da un secondo lavoro che si concentrava sulle sorgenti estese (Felli *et al.* 1977). Una volta catalogate e misurate le loro caratteristiche, queste sorgenti vennero confrontate con quelle riportate nei cataloghi allora disponibili in letteratura. Ulteriori osservazioni portarono alla scoperta di 6 nuovi resti di supernova (Bonsignori-Facondi e Tomasi 1979) incrementando del 40% il numero di questi oggetti nella zona di longitudine galattica compresa tra i 15 e i 245 gradi.

Vennero poi programmate osservazioni con il radiotelescopio olandese WSRT e con la parabola di 100 m di Effelsberg per migliorare la conoscenza delle sorgenti estese del catalogo BG. Occorreva verificare se fossero oggetti galattici o extragalattici e, per le sorgenti galattiche, poter poi discriminare tra regioni HII e resti di supernova. Occorrevano informazioni più dettagliate sulla loro struttura e misure dell'emissione radio a frequenze più alte. Nuove sorgenti galattiche furono individuate grazie a osservazioni a 1.4 GHz con WSRT (Fanti C., Mantovani e Tomasi 1981). Dalle osservazioni di sorgenti tratte dal catalogo BG e realizzate col 100 m di Effelsberg a diverse frequenze furono poi pubblicati diversi lavori (Mantovani *et al.* 1982a, 1982b, 1985). Aumentarono di conseguenza i rapporti di collaborazione tra i ricercatori di WSRT e del Max-Planck-Institut für Radioastronomie di Bonn con i ricercatori dell'IRA, rapporti che si sarebbero in seguito consolidati grazie al progetto VLBI iniziato all'IRA in quegli anni.

Durante i primi anni Ottanta, caratterizzati dalla presenza del cantiere per la costruzione della nuova stazione di Medicina, S. Montebugnoli e R. Barbieri parteciparono alle osservazioni giornaliere, sabato e domenica compresi, della radiosorgente galattica SS433 di cui era responsabile S.R. Bonsignori-Facondi. SS433 è un sistema stellare in cui la componente principale è un buco nero o una stella di neutroni ed è stata il primo microquasar scoperto. Per molti anni furono registrati su carta i dati riguardanti le variazioni di flusso di questa sorgente, poi pubblicati in Bonsignori-Facondi *et al.* (1986).

All'inizio degli anni Novanta fu disegnato e poi installato, principalmente sul ramo EW, un sistema dedicato all'osservazione delle millisecond e submillisecond pulsar (D'Amico *et al.* 1996). Ciò permise di osservare un campione di pulsar radio coordinate con la missione Compton Gamma Ray Observatory tra il 1991 e il 1995. Dall'analisi dei profili degli impulsi furono ottenuti i valori del periodo, della derivata del periodo e della posizione di 55 pulsar.

4. Scienza con i moderni interferometri: il WSRT, il VLA e l'ATCA

Verso la metà degli anni Settanta, grazie ai grandi interferometri – WSRT prima, VLA in seguito e poi VLBI –, l'interesse generale si era spostato dalla catalogazione delle radiosorgenti allo studio della loro fisica e dei numerosi modelli interpretativi. L'alta risoluzione angolare dei nuovi strumenti permetteva di studiare la morfologia radio, che fornisce informazioni sul trasporto dell'energia e sull'interazione con l'ambiente. Lo studio multifrequenza consentiva di derivare lo spettro del continuo radio, dal quale è possibile valutare l'età della radiosorgente dall'eventuale irridimento ad alta frequenza e/o rivelare la presenza di strutture compatte dall'appiattimento a bassa frequenza. La polarizzazione, infine, dà informazioni sul campo magnetico nelle radiosorgenti e nel mezzo ambientale.

L'uso combinato dei dati prodotti da questi strumenti permetteva di definire la struttura delle radiosorgenti dalla grande alla piccola scala e ottenere informazioni astrofisiche per verificare i modelli teorici. Queste indagini risolvevano importanti problemi e al tempo stesso sollevavano nuovi interrogativi. Ci si chiedeva come l'energia prodotta nel nucleo della galassia venisse trasmessa alle componenti esterne, detti "lobi", se vi fosse interazione fra getto e ambiente nei casi in cui i lobi esterni non erano allineati con il nucleo e con i getti, e, inoltre, se i dati disponibili permettessero di spiegare l'evoluzione della radiosorgente. In questo settore di indagine a Bologna si avviarono diversi progetti, sfruttando anche la politica di apertura agli utenti esterni di WSRT e VLA.

4.1 Radiogalassie

In questo contesto scientifico si colloca lo studio del campione completo di 105 radiogalassie di bassa luminosità con $\text{Log } P(W/\text{Hz}) \leq 24$, e relativamente vicine con $z < 0.2$ e magnitudine visuale < 17 ottenuto identificando le radiosorgenti del catalogo B2 con galassie brillanti.

I redshift erano stati ottenuti grazie alla collaborazione con M.H. Demoulin-Ulrich del Kitt Peak e Mc Donald Observatory (USA).

È citato in letteratura come “The B2 sample of radio galaxies”. Le radiogalassie potenti, selezionate dal catalogo 3C, erano già state ampiamente studiate. Questo campione, costituito da radiogalassie più deboli di quelle del catalogo 3C, è stato studiato per molti anni con WSRT prima e col VLA poi, a varie frequenze e risoluzioni. Le persone coinvolte nella ricerca sono state tante, C. e R. Fanti, I. Gioia, C. Lari, R. Morganti, M. Murgia, P. Parma, H. de Ruiter e A. Capetti. Lo studio di questo campione è diventato uno dei filoni di ricerca più interessanti dell’istituto e ha coinvolto collaboratori italiani ed esteri. Molte tesi di laurea e due tesi di dottorato hanno utilizzato i dati ottenuti nel corso degli anni.

Le sorgenti furono osservate inizialmente con il WSRT con osservazioni brevi chiamate “short cuts”. La riduzione fu fatta a Bologna con programmi sviluppati da C. Fanti. Grazie alle informazioni ottenute, le radiosorgenti con la struttura più interessante furono oggetto di osservazioni di lunga durata con WSRT a 610, 1400, 5000 MHz. Per la riduzione e analisi dei dati di WSRT, P. Parma si recò a Groningen nell’ottobre del 1976 per 9 mesi, e lavorò in collaborazione con R. Ekers dell’Università di Groningen. Iniziò così una collaborazione che si protrasse per molti anni e coinvolse altri ricercatori dell’Istituto di Radioastronomia.

Fino al 1980 P. Parma trascorse tre mesi all’anno a Groningen per continuare il lavoro in collaborazione con gli olandesi. Nel 1980 entrò in funzione a Groningen il nuovo pacchetto per la riduzione dei dati radio GIPSY, una vera novità in questo campo! A GIPSY si ispirarono fortemente i programmatori dell’NRAO quando scrissero AIPS, l’insieme dei programmi per la riduzione dei dati VLA.

Le osservazioni con WSRT delle radiosorgenti deboli misero in risalto, per la prima volta, la presenza di due getti simmetrici rispetto al nucleo. Una prima discussione delle proprietà delle radiosorgenti deboli con dimensioni maggiori di 50 kpc fu presentata in Ekers *et al.* (1981). È con il WSRT che si scoprì per la prima volta una radiosorgente con forma a X (B2 0055 + 26) che fu poi studiata anche con il VLA (Ekers *et al.* 1978).

Con l’avvento del VLA si decise di osservare tutto il campione con tre diverse risoluzioni sia a 1.4 che a 5 GHz, il che permise uno studio dettagliato della struttura delle radiosorgenti deboli. Almeno il 50% di questi oggetti mostra presenza di getti, doppi e simmetrici, e i lobi sono sferoidali e caratterizzati dalla mancanza di “hot-spot”. In alcuni casi come la 3C 31, i getti si trasformano in lunghe code con brillantezza decrescente. La discussione completa sulle proprietà delle radiosorgenti deboli fu presentata in de Ruiter *et al.* (1990). Alcuni oggetti, ritenuti più interessanti, furono oggetto di osservazioni più lunghe per uno studio più dettagliato. Vedi per tutti B2 0055 + 26 (NGC 326) e B2 1637 + 29 (Ekers *et al.* 1978; Murgia *et al.* 2001).

I dati a 1.4 e 5 GHz permisero di determinare l’indice spettrale nei lobi e di conseguenza la vita media degli elettroni responsabili dell’emissione radio. Ne risultò che le radiosorgenti deboli tendono a essere più vecchie delle radiosorgenti più potenti (Parma *et al.* 1999). La collaborazione con gli astrofisici teorici G. Bicknell e R. Laing fornì

importanti informazioni sui meccanismi di formazione dei getti e dei lobi (Bicknell *et al.* 1990; Laing *et al.* 1999).

In seguito, furono effettuate anche osservazioni in banda X e con l'Hubble Space Telescope (HST) in collaborazione con l'Università e l'Osservatorio di Torino. Dalle osservazioni con HST risultò che la maggior parte delle galassie associate alle radiosorgenti B2 presentano dischi di polvere nucleare. Inoltre, si trovò che la brillantezza ottica delle galassie mostra una distribuzione piatta vicino al nucleo. Questo suggerisce che la presenza di una radiosorgente influisce sulla distribuzione delle stelle (Capetti *et al.* 2000).

Questo campione, assieme alle radiosorgenti potenti del catalogo 3C, costituisce la fonte principale di informazione sulle radiosorgenti dell'Universo locale.

Un importante strumento per studiare le proprietà fisiche ed evolutive delle radiogalassie è la Funzione di Luminosità (FdL), che esprime la probabilità di radioemissione in funzione della potenza radio in un campione completo di oggetti, cioè statisticamente rappresentativo, entro un volume unitario a una certa epoca cosmologica. In aggiunta, si introduce la FdL "bivariata", che rappresenta la probabilità di radioemissione in funzione non solo della potenza radio, ma anche della luminosità ottica. Gli studi condotti all'IRA, utilizzando il campione B2 e altri dati di letteratura, furono tra i primi pubblicati in questo campo di indagine. Permisero di dedurre che la probabilità per una galassia di diventare radiosorgente dipende fortemente dalla sua luminosità ottica (Colla *et al.* 1975; Auremma *et al.* 1977).

Un problema specifico in questo tipo di analisi era tuttavia causato dalla limitata sensibilità dei radiotelescopi, per cui le galassie più deboli non venivano rivelate e quindi esisteva per queste solo un limite superiore alla potenza radio. Inoltre, dovendo suddividere il campione totale in diversi intervalli di potenza radio e magnitudine ottica, il numero di oggetti presenti in ogni intervallo risultava essere molto piccolo, per cui era importante non trascurare l'informazione relativa ai limiti. Alla fine degli anni Settanta, R. Fanti sviluppò un metodo per calcolare la Funzione di Luminosità bivariata, tenendo

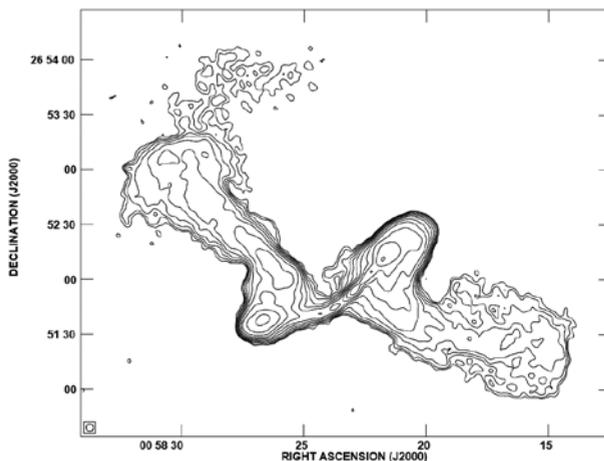


Figura 4.1 Immagine della radiosorgente B2 0055+26 (NGC 326), ottenuta con il VLA, combinando osservazioni a 1.4 GHz con due risoluzioni diverse (Array A e C) (Murgia *et al.* 2001). Riprodotta con il permesso © ESO.

conto anche dei limiti superiori radio, e quindi anticipando gli studi statistici relativi alla “Survival Analysis” applicata all’astrofisica. Il metodo introdotto da R. Fanti fu utilizzato diffusamente negli anni seguenti dai ricercatori dell’IRA e da colleghi stranieri, tra gli altri E. Hummel (Olanda) e E. Sadler (Australia).

4.2 Ammassi di galassie

Con la scoperta, avvenuta nella seconda metà degli anni Settanta, che gli ammassi di galassie sono costituiti non solo da galassie ma anche da gas intergalattico, fu evidenziata l’importanza dello studio dell’emissione radio delle galassie in ammassi per comprendere se l’interazione con il gas intergalattico influenzi la loro morfologia e/o la loro probabilità di diventare sorgenti radio.

Il primo studio di ammassi svolto da ricercatori dell’IRA fu intrapreso alla fine degli anni Settanta con il radiotelescopio WSRT da C. Lari e collaboratori, i quali osservarono le radiogalassie B2 appartenenti a 150 ammassi. Questi dati mostrarono per la prima volta che gli oggetti in ammasso hanno proprietà morfologiche e fisiche diverse dalle galassie isolate. I risultati preliminari furono presentati al congresso “The Large Scale Structure of the Universe”, organizzato a Tallin, Estonia, nel 1977 (Lari e Perola 1978).

Contemporaneamente furono riportate in letteratura osservazioni che mostravano l’esistenza di sorgenti diffuse di natura incerta in ammassi quali Coma e A2256. Queste

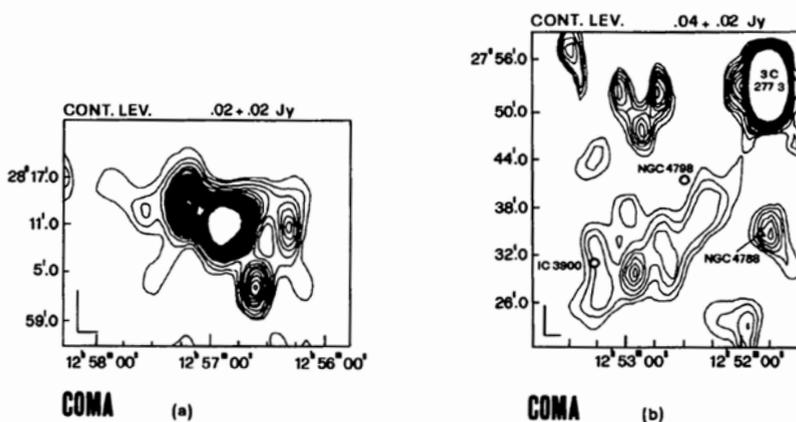


Figura 4.2. Immagini dell’ammasso di Coma ottenute con la Croce del Nord: a sinistra il centro dell’ammasso con l’emissione dalle radiogalassie e parte dell’emissione diffusa Coma C; a destra il relitto 1253 + 275 scoperto da queste osservazioni alla periferia dell’ammasso (Ballarati *et al.* 1981). Riprodotta con il permesso © ESO.

sorgenti furono dette “aloni” se rivelate al centro dell’ammasso e “relitti” se posizionate in regioni periferiche.

Ci si poneva un quesito: l’emissione diffusa negli ammassi viene originata dalle singole radiogalassie o dal gas intergalattico? Nacque quindi l’idea di osservare alcuni ammassi vicini a 408 MHz con la Croce del Nord, strumento particolarmente adatto a rivelare sorgenti estese e diffuse. Fu così confermata l’esistenza di aloni in Coma e A1367, e fu scoperto il relitto 1253 + 275 alla periferia di Coma (Ballarati *et al.* 1981). L’ammasso di Coma fu oggetto in seguito di numerosi studi che hanno coinvolto diversi ricercatori dell’IRA ed è tuttora argomento di studio sperimentale e dibattito teorico.

Nel novembre 1978 fu lanciato il satellite per osservazioni in banda X, HEAO-2, poi rinominato “Einstein Observatory”, primo satellite X in grado di produrre immagini. Da questo satellite ci si aspettava una vera e propria rivoluzione su quanto già si conosceva sugli ammassi di galassie. Questo stimolò Harry van der Laan, direttore scientifico dell’Osservatorio di Leiden in Olanda, a lanciare un progetto di osservazione con WSRT degli ammassi che erano nel programma osservativo dell’Einstein Observatory, con l’intento di studiare la relazione tra l’emissione radio e quella X. Il progetto fu denominato “RADEX” e furono invitati a collaborare i colleghi bolognesi, ai quali fu affidata l’osservazione degli ammassi del catalogo di Abell per i quali non erano disponibili dati radio. Nell’ottobre 1979 furono osservati con WSRT a 1.4 GHz sessantatre ammassi, e furono rivelate un centinaio di deboli radiosorgenti associate a galassie dell’ammasso. Purtroppo, la parte “EX” di RADEX non funzionò. Infatti, i dati in banda X furono utilizzati dai colleghi americani per la prima classificazione morfologica degli ammassi e le prime ipotesi sulla loro evoluzione, tralasciando il confronto con l’emissione radio.

I lavori pubblicati dalla survey di WSRT (Fanti C. *et al.* 1982, 1983a, 1983b) comprendono come autori la grande maggioranza dei componenti dell’IRA del tempo, C. e R. Fanti, L. Feretti, A. Ficarra, I. Gioia, G. Giovannini, L. Gregorini, F. Mantovani, L. Padrielli, P. Parma, P. Tomasi, G. Vettolani. Alle osservazioni radio furono affiancate, per gli ammassi più vicini, immagini profonde e dati spettroscopici ottenuti da B. Marano e V. Zitelli col telescopio di Loiano. Fu quindi possibile identificare le controparti ottiche delle radiosorgenti e determinarne le proprietà. Il campione di radiogalassie prodotto risultò sufficientemente completo da permettere considerazioni statistiche. Fu messo in evidenza che esiste una grande differenza nella morfologia delle radiogalassie dentro e fuori da un ammasso. Le prime contengono una larga percentuale di radiosorgenti a coda, in cui i getti e lobi non sono allineati con la galassia che li origina ma appaiono come “due code” lasciate indietro dal moto della galassia. Le code “aperte”, Wide Angle Tail (WAT), sono preferibilmente associate alle galassie ellittiche più brillanti che si trovano al centro degli ammassi. Le code “strette”, Narrow Angle Tail (NAT), dette anche testa-coda, Head Tail (HT), sono orientate a caso nell’ammasso. Le WAT risultano muoversi verso l’esterno a una velocità minore delle HT. Si trovò anche che la Funzione di Luminosità radio per le galassie in ammasso non differisce significativamente da quella delle galassie isolate o in piccoli gruppi. Dato che la densità di galassie negli ammassi

di Abell è almeno 10 volte maggiore di quella delle galassie isolate o in piccoli gruppi, si concluse che la densità di galassie in una certa regione non influisce sulla probabilità di una galassia di diventare radiosorgente, ma l'elemento più importante per produrre la emissione radio è che sia una galassia ellittica gigante.

Lo studio radio degli ammassi presso l'IRA si sviluppò negli anni successivi ricoprendo un ruolo sempre più importante, e diventando un argomento chiave che ha portato a risultati competitivi a livello internazionale. Numerosi studi riguardarono sia radiogalassie che ammassi individuali, utilizzando WSRT, Effelsberg e VLA. Di particolare rilievo fu lo studio dell'ammasso di Coma, delle galassie e delle sorgenti diffuse, condotto da G. Giovannini e L. Feretti e sul quale svolse la tesi di dottorato T. Venturi.

L'analisi dell'interazione delle radiogalassie con l'ambiente, che non era stato possibile realizzare nell'ambito del progetto RADEX, fu sviluppata in anni successivi utilizzando dati di letteratura. I ricercatori dell'IRA furono i primi a confrontare l'emissione radio delle galassie e l'emissione in banda X dovuta al mezzo ambientale (Morganti *et al.* 1988; Feretti *et al.* 1990). Gli studi proseguirono nella seconda metà degli anni Novanta, utilizzando dati in banda X del satellite ROSAT, grazie alla collaborazione di L. Feretti e G. Giovannini con H. Böhringer del Max-Planck-Institute for Extraterrestrial Physics (MPE) per gli ammassi, e di R. Fanti, L. Feretti, P. Parma con E. Trussoni dell'Osservatorio Astronomico di Torino, S. Massaglia dell'Università di Torino e W. Brinkmann del MPE per alcune radiogalassie del catalogo B2. Dal confronto tra la pressione interna alle zone radioemittenti e la pressione del mezzo ambientale ricavata dai dati X, risultò che la pressione minima interna alla radiosorgente appare inferiore alla pressione esterna del gas circostante. Questo sbilanciamento apparente permette di fare considerazioni sulle condizioni fisiche delle radiosorgenti, cioè, ad esempio, che la radiosorgente non si trova nello stato di energia minima, oppure che le assunzioni standard utilizzate per il calcolo, vale a dire campo magnetico presente in tutto il volume della radiosorgente, uguale energia in elettroni e protoni, assenza di elettroni di bassa energia, non sono valide (Feretti, Perola e Fanti 1992; Feretti *et al.* 1995a). Una ulteriore implicazione è che possa esistere all'interno del plasma radioemittente una significativa quantità di plasma termico, che contribuisce sensibilmente alla pressione interna. Osservazioni di diverse radiogalassie a coda effettuate con i radiotelescopi di Effelsberg e VLA, permisero di verificare che la loro struttura è dovuta alla pressione dinamica esercitata dal mezzo intergalattico sulle radiogalassie in moto. Si determinò che le condizioni di piegamento erano soddisfatte se le velocità dei getti erano dell'ordine di qualche migliaio di km/s. Studi di polarizzazione, inoltre, evidenziarono che le proprietà del mezzo intergalattico circostante sono consistenti con quanto rivelato da osservazioni in banda X (Giovannini, Feretti e Gregorini 1987; Mack *et al.* 1993). Sulle proprietà dei lobi delle radiogalassie tramite lo studio di emissione per Compton Inverso Gianfranco Brunetti discusse la sua tesi di dottorato.

In alcuni ammassi furono rivelate sorgenti radio estese e diffuse, classificate come "aloni" e "relitti", non associate a galassie dell'ammasso, e che quindi testimoniano l'esi-

stenza di elettroni relativistici e campo magnetico nel mezzo intergalattico. Il loro studio aprì un ampio campo di ricerca all'IRA, sia osservativo che teorico. Dopo lo studio di oggetti tipici come Coma C e 1253 + 275 nell'ammasso di Coma, furono studiati diversi ammassi con aloni e relitti, contribuendo notevolmente alla conoscenza di questa classe di oggetti sui quali le informazioni disponibili erano scarse e frammentarie. Nell'IAU Symposium 175 su "Extragalactic Radio Sources", tenutosi a Bologna nel 1995 per celebrare il centesimo anniversario del primo esperimento di Guglielmo Marconi di trasmissione radio oltreoceano, ci fu un'ampia discussione sui risultati ottenuti sulle radiosorgenti estese in ammasso. Furono poste le basi per gli studi futuri che hanno permesso di raggiungere risultati fondamentali come la correlazione tra le sorgenti diffuse e la storia evolutiva degli ammassi.

Una ricerca di sorgenti diffuse in ammasso nella "survey" radio di tutto il cielo del VLA a 1.4 GHz, NRAO VLA Sky Survey (NVSS), produsse il primo catalogo con circa 20 ammassi contenenti aloni e relitti (Giovannini, Tordi e Feretti 1999). Ulteriori osservazioni radio ad alta sensibilità con il VLA permisero di stabilire che gli ammassi contenenti sorgenti diffuse sono tutti caratterizzati da alta luminosità X e presentano diverse sottocondensazioni. Per la prima volta fu avanzata l'ipotesi che la formazione di sorgenti estese diffuse fosse legata all'esistenza di recenti processi di "merger", cioè i fenomeni di aggregazione attraverso i quali gli ammassi si formano ed evolvono. Agli studi osservativi si aggiunsero studi teorici che provarono il legame tra l'emissione radio e la riaccelerazione dei raggi cosmici responsabili dell'emissione radio, attraverso i moti turbolenti e gli "shocks" nel mezzo intergalattico degli ammassi in fase di "merger": studi portati avanti da G. Brunetti e G. Setti (Brunetti *et al.* 1999). Si iniziò, inoltre, un vivo dibattito scientifico sull'emissione X di alta energia rivelata con il satellite BeppoSAX e dovuta a effetto Compton Inverso (Fusco-Femiano *et al.* 1999). Lo studio delle proprietà statistiche degli ammassi, la loro struttura, la funzione di luminosità e la presenza di sorgenti diffuse fu esteso al cielo Sud osservando gli ammassi della "Shapley concentration" con i radiotelescopi australiani MOST e ATCA (Venturi *et al.* 1997a, 1997b, 1998).

I ricercatori dell'IRA ebbero il grande merito di affiancare allo studio radio degli ammassi con aloni gli studi in banda X per ricavare informazioni sulla relazione tra il plasma caldo e il plasma relativistico. Nell'aprile 1999 si tenne al castello di Ringberg, Germania, un workshop intitolato "Diffuse Thermal and Relativistic Plasma in Clusters", organizzato da H. Böhringer e P. Schücker per la parte X, e L. Feretti per la parte radio, al quale parteciparono diversi ricercatori dell'IRA. Fu il primo congresso internazionale centrato sul confronto tra componenti termiche e non termiche degli ammassi.

Poiché l'emissione radio diffusa in ammassi è dovuta a elettroni relativistici e campi magnetici, un ovvio sviluppo delle ricerche descritte sopra fu quello di studiare i campi magnetici negli ammassi con metodi indipendenti, in particolare l'analisi della Rotazione di Faraday. Il primo studio fu relativo al campo magnetico di Coma (Feretti *et al.* 1995b), al quale seguirono A119 (tesi di laurea di Federica Govoni) e numerosi altri, e fu sviluppato un metodo numerico per l'interpretazione dei dati osservativi. Da questi

lavori è risultato che l'esistenza di campi magnetici su scale di alcuni Mpc è piuttosto comune. Sulle proprietà dei campi magnetici Federica Govoni svolse la sua tesi di dottorato. Rimane il problema di capire come questi campi magnetici cosmici si originano, come evolvono e quale ruolo svolgono nella formazione ed evoluzione della struttura a grande scala. Sono domande ancora aperte oggi, un campo questo in cui l'IRA ha raggiunto una leadership internazionale.

4.3 Survey di radiosorgenti deboli

Alla fine del 1993 durante una visita di R. Ekers, direttore del nuovo radiotelescopio australiano Australian Telescope Compact Array (ATCA), venne discussa la possibilità di effettuare osservazioni radio sulla zona di cielo coperta dalla survey di redshift ESO Slice Project (ESP) (vedi cap. 9). Nacque così la survey di radiosorgenti deboli ATESP a cui parteciparono, oltre a colleghi australiani, L. Gregorini, P. Parma, H. de Ruiter e G. Vettolani e che fu oggetto della tesi di dottorato di I. Prandoni, sostenuta finanziaria-

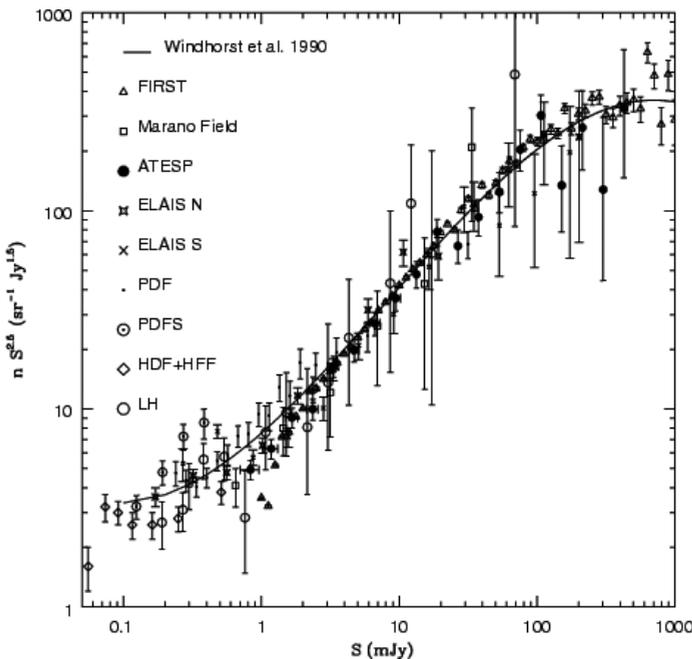


Figura 4.3 Conteggi ottenuti utilizzando le radiosorgenti deboli della survey ATESP a 1.4 GHz confrontati con quelli di diversi altri campioni. I conteggi mostrano il numero di radiosorgenti che hanno densità di flusso compresa in un intervallo definito (Prandoni *et al.* 2001a). Riprodotta con il permesso © ESO.

mente dall'accordo CNR-CSIRO. ATESP consiste di 16 regioni (mosaici) con sensibilità uniforme di 79 microJy che coprono un'area di 26 gradi quadrati a declinazione di -40 gradi osservati tra il 1994 e il 1995. All'epoca fu la survey più estesa a flussi deboli (Prandoni *et al.* 2000) con la miglior determinazione dei conteggi di radiosorgenti a flussi deboli ($0.7 < S < 2$ mJy; Prandoni *et al.* 2001a). Ulteriori studi delle proprietà ottiche, a cui partecipò anche A. Zanichelli, permisero di stabilire la composizione della popolazione radio debole, che cambia in modo molto evidente passando da flussi milliJy (mJy) a quelli sub-milliJy (sub-mJy). Le galassie "early-type" (quali galassie ellittiche e S0) dominano la popolazione mJy, mentre le galassie con un'estesa formazione stellare diventano importanti nel regime sub-mJy (Prandoni *et al.* 2001b). Negli anni seguenti la composizione della popolazione radio debole fu ampiamente discussa nella letteratura internazionale.

Altre survey di sorgenti radio deboli furono eseguite sull'area del Lockman Hole (de Ruiter *et al.* 1997) su cui è presente anche una survey X profonda, e sul Marano field dove è presente il catalogo di quasar radioquieti più deboli disponibile (Grupponi *et al.* 1997).

4.4 Resti di supernovae

Importanti, a cavallo degli anni Ottanta, furono i lavori teorici e osservativi sui resti di supernova portati avanti da N. Panagia, trasferitosi a IRA dallo IAS di Roma, e da Kurt Weiler, visiting scientist all'IRA. Weiler e Panagia (1978) introdussero il vocabolo "plerione" (plerion, pieno) per indicare la classe di resti di supernovae che non avevano la classica forma ad anello, ma mostravano una emissione diffusa causata da venti originanti dalla pulsar centrale, come la Nebulosa del Granchio. Venne mostrato anche che questo tipo di nebulose è anche emettitore ad alte energie (X e gamma). Vennero poi effettuati per la prima volta studi spettroscopici di supernovae nell'ultravioletto che dimostrarono che l'esplosione era avvenuta eiettando nello spazio circumstellare shell diverse a tempi diversi (SN1979c, Panagia *et al.* 1980) e venne pertanto definita per la prima volta la degenerazione della classificazione delle supernovae di tipo I individuando diverse classi di oggetti (SN Ib; Panagia 1984). Questo risultato ebbe una notevole rilevanza in quanto le supernovae di tipo Ia sono la candela campione cosmologica più importante e usata per determinare la scala delle distanze cosmologiche.

5. Il progetto Very Long Baseline Interferometry (VLBI)

Alla fine degli anni Sessanta un gruppo di radioastronomi canadesi (Brotten *et al.* 1967) e alcuni gruppi americani (Brown, Carr e Blok 1968; Bare *et al.* 1967; Moran *et al.* 1967) riuscirono a ottenere frange di interferenza combinando i segnali registrati da singole antenne non collegate fisicamente, separate tra loro dalle centinaia alle migliaia di chilometri. La nuova tecnica osservativa venne denominata “Very Long Baseline Interferometry” (VLBI).

I risultati raggiunti nello studio delle radiosorgenti e le potenziali implicazioni scientifiche derivanti da osservazioni a risoluzione maggiore di quella ottenibile con interferometri classici, stimolarono ulteriormente lo sviluppo di questa tecnica osservativa. Nel 1972 una osservazione effettuata usando i radiotelescopi di Westford, Massachusetts, e Simeiz in Crimea, a 22 GHz dimostrò la grande risoluzione angolare raggiungibile, in quel caso 0.2 millesimi di secondo d’arco, che permise di osservare le regioni compatte al centro di radiogalassie e quasar ed eventualmente di misurarne le variazioni strutturali. Nel 1971 Alan Whitney e collaboratori (Whitney *et al.* 1971) scoprirono i moti superluminali, moti di allontanamento tra due regioni centrali nei quasar apparentemente più veloci della luce. Vennero in seguito misurati i moti propri dei masers dell’acqua in sorgenti galattiche (Genzel *et al.* 1981). Venne presto intuito l’enorme potenziale della tecnica VLBI in applicazioni di astrometria e geodesia (Gold 1967; Whitney *et al.* 1976). La NASA e altre agenzie degli Stati Uniti iniziarono a stabilire collaborazioni per osservazioni di tipo geodetico sviluppando appositi sistemi di acquisizione dati e della loro correlazione.

Negli Stati Uniti dal 1975 era operativo l’US VLBI Network (NUG). Tale rete era in grado di gestire sei sessioni osservative all’anno coi radiotelescopi di Green Bank, OVRO, Haystack, Iowa, Fort Davis. Il National Radio Astronomy Observatory suggerì di costituire “An Intercontinental VLB Array” (1977) e introdusse il concetto di “absentee observing”. Non occorre avere un collaboratore a ogni telescopio come richiesto fino ad allora. Si istituiva un servizio che si faceva carico delle osservazioni. Nel 1979

Haystack (MIT) sviluppò un nuovo terminale di acquisizione dati VLBI per applicazioni geodinamiche denominato MKIII, capace di registrare con una ampiezza di banda di 28, 56, e 112 MHz fino a 224 Mbit al secondo. Rappresentò un notevole progresso tecnologico, che portò ad aumentare notevolmente la sensibilità delle osservazioni VLBI rispetto al precedente sistema MKII che registrava su una banda di 2 MHz utilizzando videocassette VHS.

Grandi progressi vennero realizzati anche nel software di analisi dei dati interferometrici. L'introduzione degli algoritmi di CLEAN (Högbom 1974), della “chiusura di fase” in ambito VLBI (Rogers *et al.* 1974) e del suo uso nella produzione delle immagini di sintesi (Wilkinson *et al.* 1977) permisero di ottenere immagini radio con la risoluzione del millesimo di secondo d'arco.

Anche in Europa crebbe enormemente l'interesse per l'utilizzo della tecnica VLBI per osservare sorgenti radio che erano risultate puntiformi con gli interferometri classici. Tra i radioastronomi è ricordata come leggendaria la discussione nella mensa del MPIfR tra alcuni direttori di osservatori radioastronomici europei, Ivan Pauliny-Toth, Eugen Preuss, Roy Booth, George Miley, avvenuta il 7 aprile 1975, sulla possibilità di costituire una rete VLBI europea, in quanto alcuni radiotelescopi europei prendevano già parte alle osservazioni della rete americana.

Il primo esperimento VLBI tutto europeo fu effettuato nel 1976. Due anni dopo entrò in funzione al MPIfR di Bonn, Germania, il correlatore MkII a tre stazioni per correlare dati registrati su videocassette VHS. Al primo esperimento correlato a Bonn avevano preso parte i radiotelescopi di Jodrell Bank, Onsala, Dwingeloo ed Effelsberg. Tra gli oggetti osservati alla lunghezza d'onda di 18 cm la radiosorgente 3C309.1, la cui immagine venne pubblicata tempo dopo (Kus *et al.* 1981): una scoraggiante indicazione dei lunghi tempi che intercorrevano tra la preparazione di un progetto osservativo VLBI e l'eventuale pubblicazione del risultato finale. Nel 1978 si tenne una “International VLBI Conference” a Heidelberg, Germania, di cui non esistono purtroppo gli atti e a cui partecipò per l'IRA G. Grueff.

5.1 L'inizio

Negli anni Settanta a Bologna si prese a ragionare su come migliorare le potenzialità osservative e tecnologiche in banda radio progettando uno strumento flessibile e di interesse internazionale, indirizzato su frequenze più alte dei 408 MHz della Croce del Nord. Inizialmente si pensò a un grande interferometro, ma esisteva già WSRT e stava divenendo operativo il VLA. Inoltre, non si disponeva né della forza lavoro né di quella finanziaria per affrontare un progetto di quella portata. Esisteva però l'interessante opzione di entrare nell'impresa VLBI di cui si parlava da un decennio, ma che era operante ancora a livello pionieristico.

Nel 1978 si concretizzò, nel Laboratorio di Radioastronomia, l'idea che un possibile sviluppo della infrastruttura radioastronomica italiana potesse realizzarsi costruendo un radiotelescopio parabolico orientabile, che permettesse di partecipare a osservazioni interferometriche a lunga base in rete con altri radiotelescopi.

L'idea originale proposta al CNR nel 1978 era di realizzare tre radiotelescopi gemelli in grado di lavorare fino a 20-30 GHz, da collocare il primo presso la stazione radioastronomica di Medicina, il secondo nella punta sud della Sicilia e il terzo in Sardegna. La scelta fu discussa con i centri radioastronomici europei al fine di estendere in modo ottimale la rete VLBI per studi sia astronomici che geodetici. A tale scopo furono utilizzati i diagrammi che forniscono le prestazioni di una rete in base alla distribuzione dei vari radiotelescopi (copertura del piano u-v), realizzati da Carla Fanti. A causa dell'insufficienza di fondi, si dovette limitare il progetto a 2 sole antenne. La nuova infrastruttura venne illustrata da G. Setti al workshop internazionale di Strasburgo "Terrestrial and Space Techniques in Earthquake Prediction Research" (Setti 1979). L'intenzione era di costruire due antenne paraboliche orientabili di 25 metri di diametro, capaci di osservare fino a lunghezze d'onda del centimetro, circa 22 GHz: una da installare a Medicina, stazione radioastronomica con personale competente, la seconda in Sardegna o nel Sud Italia. Le due antenne avrebbero lavorato in collegamento con le reti VLBI europea e americana. Si riportava che esistevano buone possibilità che il progetto partisse entro il 1979, che fosse terminato in cinque anni e che la prima antenna a Medicina divenisse operativa nel giro di tre anni.

Nel concretizzarsi del Progetto VLBI in Italia, si decise di realizzare le due antenne di 25 m di diametro, adattando il disegno delle antenne del VLA di Socorro, New Mexico del NRAO. Iniziò un carteggio tra G. Setti e gli ingegneri del NRAO riguardo l'antenna parabolica, replicata 27 volte, adottata per costruire il fantastico interferometro americano. Ottenuti i disegni della parabola VLA, si cercò di capire quale potesse essere il suo costo adottando una movimentazione in Azimuth su rotaia fissata su un basamento. Una delle ditte coinvolte fu la SAFIT di Milano. Un'altra la "DB macchine SPA" che a settembre del 1979 inviò un preventivo. Per una antenna il costo previsto era 655 milioni di lire (equivalenti a circa 2 M di euro attuali secondo l'ISTAT). Ordinandone due il costo totale diventava 1 miliardo e 250 milioni di lire. La consegna poteva avvenire in dodici-quattordici mesi dall'ordine. Successivamente, "DB macchine SPA" informò l'IRA che una delle società con cui operava nel campo delle antenne per telecomunicazioni, la TIW SYSTEMS INC., era a sua volta interessata. Installate e funzionanti, le due antenne progettate da TIW sarebbero costate complessivamente 1 miliardo e 70 milioni di lire escluse le fondazioni.

Per l'analisi del terreno su dove collocare il radiotelescopio venne incaricato lo Studio Tecnico dell'ing. Giorgio Conti sito in Bologna. Ad agosto, la giunta amministrativa del CNR aveva intanto deliberato il finanziamento dell'"apparecchiatura" VLBI a carico del cap. 412193 – Spese del Bilancio di previsione per l'esercizio finanziario 1979 – per un importo di 1 miliardo e 200 milioni di lire.

Nel dicembre 1979 venne redatta dall'IRA una proposta di acquisto di un'antenna di grande diametro, "circa" 25 m, e di un sistema di acquisizione dati interferometrici per astronomia e geofisica MarkIII prodotto dal NEROC Haystack Observatory. Colpisce che la proposta, indirizzata al CNR, contenesse un'incertezza nel diametro dell'antenna da acquistare, in un documento che riportava in dettaglio le specifiche richieste per la parabola. Questa genericità sul diametro fa supporre che fossero in corso trattative con la TIW. Infatti, il 16 ottobre 1980 G. Setti informò il CNR che la preferenza andava al paraboloide di 32 m della ditta TIW. Oltre ad avere una superficie quasi doppia di quella da 25 m, il progetto prevedeva i locali per l'alloggiamento delle apparecchiature e del personale nel plinto di fondazione. Il costo di due parabole ordinate assieme divenne di 1.111.145 dollari USA (circa 2,8 M di euro attuali). A seguito della trattativa intercorsa, la ditta SAE venne incaricata di costruire la struttura dell'antenna e la "DB macchine SPA" della produzione dei pannelli per l'antenna.

Il presidente del CNR Ernesto Quagliariello ne dispose l'acquisto il 31 dicembre 1980. La spesa rappresentava parte di un impegno pluriennale pianificato sui 4 anni a carico del Capitolo Grandi Apparecchiature di Interesse Scientifico Generale.

La progettazione delle fondazioni di supporto dell'antenna doveva tener conto di specifiche che richiedevano deformazioni elastiche inferiori a 0.1 mm. La costruzione del basamento venne affidata dal CNR alla ditta SAE nel giugno 1981 su progetto dell'ing. Conti. Una ventina di giorni dopo, la commissione incaricata spedì al CNR il



Figura 5.1 Montatori al lavoro nel 1982 per completare la struttura di supporto dello specchio primario dell'antenna parabolica di 32 m di diametro presso la stazione radioastronomica di Medicina. Crediti: INAF-IRA.

testo di accettazione in fabbrica della prima antenna VLBI prodotta. Membri della commissione erano G. Setti, presidente, A. Bombonati, G. Grueff per l'IRA, G. Curioni, M. Catarzi, N. Speroni, G. Tofani per l'Osservatorio Astrofisico di Arcetri coinvolto nel progetto, B. Hooghoudt come consulente esterno per il CNR.

5.2 Nascita dell'European VLBI Network (EVN)

Nel 1984 l'IRA fu tra gli Istituti fondatori del "Consortium of European Radio Astronomy Institutes for Very Long Baseline Interferometry" costituitosi il 24 luglio. Il Consorzio elaborò uno statuto sottoscritto da R. Booth direttore dell'Onsala Space Observatory, da W. Brouw direttore del The Netherlands Foundation for Radio Astronomy – Westerbork, da P. Metzger, direttore del Max-Planck-Institut für Radioastronomie, da F. Graham Smith direttore dei Nuffield Radio Astronomy Laboratories – Jodrell Bank, e da G. Setti direttore dell'Istituto di Radioastronomia. G. Setti venne nominato chairman del board del Consorzio EVN. In tale veste, sollecitò a dicembre il presidente del CNR L. Rossi Bernardi affinché il Consorzio potesse ottenere un riconoscimento ufficiale presso la European Science Foundation.

Dalle prime osservazioni iniziate nel 1980, anche l'EVN operò con una politica "open skies". Le proposte di osservazione potevano cioè venire sottomesse da qualunque ricercatore membro di una istituzione di ricerca. L'EVN garantiva i dati registrati da ogni antenna a qualunque radioastronomo anche se non era membro degli istituti



Figura 5.2 Il primo meeting dell'EVN Consortium nel 1985. Nel lato corto del tavolo a sinistra G. Setti chairman del board.

della rete VLBI. L'EVN Programme Committee (EVNPC) incaricato di esaminare le proposte, comprendeva inizialmente cinque rappresentanti degli osservatori fondatori del Consorzio (Effelsberg, Westerbork, Jodrell Bank, Onsala e Bologna) e tre membri "non-VLBI". R. Fanti fu il primo ricercatore a essere nominato membro dell'EVNPC in rappresentanza dell'IRA. L'EVNPC si riuniva tre volte l'anno per esaminare i progetti presentati in risposta alle "Calls for Proposals" pubblicate al primo di febbraio, di giugno e di ottobre di ogni anno. I quattro telescopi EVN erano in grado di osservare a 1.4, 1.6 e 5.0 GHz. Nel 1983 venne aggiunta la frequenza di 610 MHz.

5.3 Sviluppo tecnologico

Parallelamente ai lavori di costruzione della parabola, il settore tecnologico dell'IRA doveva prepararsi ad affrontare le nuove problematiche connesse all'acquisizione dei dati con ricevitori e terminali in grado di effettuare osservazioni con la tecnica VLBI.

Già nel maggio 1979, IRA informò il Ministero delle Poste e Telecomunicazioni che intendeva richiedere l'iscrizione all'International Frequency Registration Board (dal 1992 Radio Regulation Board) delle frequenze di osservazione nella banda che andava da 600 MHz a 24 GHz. Segnalava che il sistema di ricezione avrebbe iniziato i primi test a metà del 1981 e sarebbe divenuto operativo nel gennaio 1983 con la prima antenna posta a Fiorentina, frazione di Medicina, in provincia di Bologna, mentre una seconda antenna sarebbe stata costruita nell'Italia meridionale o insulare. Si accennava anche alla possibile costruzione di un paraboloide mobile di 8 m di diametro completamente orientabile, che avrebbe potuto operare in qualunque punto del territorio nazionale. Le antenne, si aggiungeva, avrebbero osservato 24 ore al giorno senza soluzione di continuità, con ricevitori che operavano dalla frequenza di 600 MHz alla frequenza di 23 GHz con una larghezza di banda che variava da 8 MHz a 400 MHz a seconda della frequenza di osservazione.

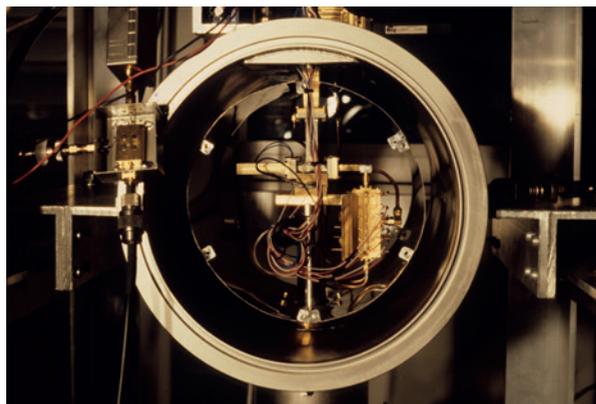


Figura 5.3 Immagine del primo ricevitore raffreddato progettato dal laboratorio microonde IRA. È ripreso l'interno del DEWAR, contenitore criogenico per azoto liquido. Mantenere il ricevitore a temperature dell'ordine dei 10 °K permette di limitare il forte rumore bianco, in parte causato dal ricevitore stesso, che si sovrappone al debole segnale radioastronomico. Crediti: INAF-IRA.

Nel progettare e costruire ricevitori di nuova concezione da montare sulle parabole tornava ora utile ai tecnologi del laboratorio a microonde dell'IRA l'esperienza acquisita nella costruzione dei ricevitori per la Croce del Nord. Il gruppo Radio Frequenze dell'IRA fu impegnato a progettare e costruire apparati a microonde che si rifacevano alle esperienze maturate negli anni Sessanta. La richiesta dei radioastronomi era di poter disporre di "front-end" a microonde a bassissima temperatura di rumore unitamente ad accessori come mixer, oscillatori locali e altro, allora non disponibili sul mercato.

Verso il 1982 furono immessi in commercio gli High Electron Mobility Transistor (HEMT) che appartenevano alla classe dei transistori a effetto di campo (FET), ampiamente usati a Medicina nei correlatori progettati da G. Sinigaglia. I costruttori garantivano per gli HEMT temperature di rumore dell'ordine di 150 °K nella banda dei 10 GHz con guadagni di potenza superiori ai 6 dB. Fonti attendibili americane sostenevano che tali dispositivi avrebbero potuto funzionare anche a temperature criogeniche di 15 °K. L'ambizione era di realizzare un prototipo capace di migliorare le specifiche dichiarate dal costruttore. Negli USA e in Europa si stavano sperimentando soluzioni tipo circuito stampato con modesti risultati. La soluzione fu proposta da G. Tomassetti e sperimentata con successo nei laboratori dell'IRA a Medicina. Il ricevitore, denominato "scatolino", raffreddato a 10 °K era in grado di garantire un guadagno nella banda attorno ai 10 GHz di poco inferiore ai 10 dB e una temperatura di rumore di circa 50 °K. Considerato una "bomba" per quel tempo, il disegno del ricevitore ebbe ampia risonanza in ambito radioastronomico a livello mondiale.

Fu poi progettato e costruito un ricevitore a due canali per osservazioni a 22.3 GHz. I due "front-end" e i mixer a HEMT erano alloggiati all'interno della camera a vuoto a 15 °K di temperatura fisica. Il moltiplicatore di frequenza fu anch'esso prodotto all'IRA. Era in grado di lavorare a una Temperatura di Sistema di soli 50 °K. La parabola di Medicina divenne uno dei pochi radiotelescopi dell'EVN in grado di osservare a questa frequenza e non solo con la tecnica VLBI (maggiori dettagli nel capitolo 7). Grazie quindi a G. Tomassetti e al contributo di R. Ambrosini, A. Orfei e G. Tuccari (a Noto), l'IRA divenne un punto di riferimento internazionale in questo campo.

Nella elaborazione del progetto VLBI e nel suo successivo sviluppo l'IRA si avvale della collaborazione col "Centro per l'Astronomia infrarossa e lo studio del mezzo interstellare" (CAISMI) ospitato presso l'Osservatorio Astrofisico di Arcetri di Firenze. Il CAISMI era un centro del CNR dedicato allo sviluppo di tecnologie in banda radio e infrarossa e a studi sulla fisica degli oggetti extragalattici e sulla formazione stellare. Negli anni Ottanta progettò TIRGO, un telescopio infrarosso da 1.5 metri situato sul Gornegrat nelle Alpi svizzere (Salinari 1982), che da allora gestiva.

La competenza dei tecnologi del CAISMI risultò molto utile nell'applicazione di tecniche criogeniche sviluppate per ottenere ricevitori con bassa temperatura di rumore per le nuove parabole. Importanti furono anche le analisi elettromagnetiche che furono in grado di effettuare sul comportamento delle antenne (Bolli *et al.* 2000). La maggior collaborazione tra IRA e CAISMI si ebbe nel disegnare sistemi riceventi ad alta fre-

quenza, 22 e 43 GHz, che compresero “feed horn” corrugati, accoppiatori direzionali e polarizzatori (per esempio Gentili 2002). Nelle antenne paraboliche il “feed horn” è una piccola antenna a tromba utilizzata per trasmettere onde radio tra il ricevitore e il riflettore parabolico.

Per i “feed horn” corrugati furono sviluppati potenti pacchetti software per le simulazioni e le sintesi, con particolare attenzione per le nuove tecniche collegate agli aspetti elettromagnetici nel disegno e analisi dei “feed”.

5.4 Iniziano le osservazioni VLBI

G. Setti alle 09:58 del 3 aprile 1984, inviò un telex al presidente del CNR Ernesto Quagliariello:

Caro Presidente,

è con grande soddisfazione, mia e del personale tutto che desidero informarti che il primo esperimento di collegamento VLBI, avvenuto lunedì scorso (26 marzo 1984) fra il nuovo radiotelescopio di Medicina e quello di Effelsberg (Bonn), è perfettamente riuscito. Le frange di interferenza relative alla radiosorgente osservata sono in chiara evidenza e hanno anche permesso di determinare con grande precisione la posizione della nostra antenna.

Ciò corona con pieno successo l’attivazione del radiotelescopio che d’ora in poi entrerà nella rete europea e mondiale.

Cordiali saluti.

Giancarlo Setti

Questo primo test, come molte delle osservazioni effettuate in seguito, utilizzava un terminale di acquisizione dati denominato MarkII che registrava i segnali radio ricevuti dall’antenna su nastri magnetici VHS, allora in uso per la registrazione su videocassette. Il sistema MarkII fu costruito nel laboratorio digitale di Medicina (Comoretto e Gallerani 1985), assieme alla modifica delle testine dei registratori VHS per adattare il formato di registrazione allo standard VLBI.

Nel 1985 G. Grueff sottopose al CNR il memorandum “Prospettive di sviluppo del Progetto VLBI in relazione a possibili finanziamenti per l’incentivazione della Ricerca Scientifica nel Mezzogiorno”. Alcune parti del memorandum rivestivano particolare interesse. Si suggeriva di dotare il Paese di un correlatore standard MKIII a quattro stazioni attraverso un investimento di 1.600 milioni di lire (circa 2.1 M di euro attuali secondo l’ISTAT), per fornire un servizio qualificato alla comunità scientifica europea sia astronomica che geofisica. Alla geodinamica e al tracking di sonde spaziali era inte-

ressata anche l’Agenzia Spaziale Italiana che aveva costruito un radiotelescopio nei pressi di Matera. Il valore scientifico del progetto VLBI italiano avrebbe potuto aumentare con la realizzazione di strutture locali di “data processing” dedicato, vale a dire di un correlatore.

Il CNR si rese disponibile a finanziare l’acquisto del terminale MarkIII e di un registratore a nastro magnetico. Il nastro da 1 pollice, avvolto in una bobina di 14 pollici di diametro, era lungo 2.7 km. Su ogni nastro si potevano registrare 10 Gbit di dati su 28 tracce. Erano possibili diversi modi di registrazione a differenti bit-rates. Ogni traccia poteva registrare fino ad 8 Mbit/s. Il bit-rate massimo era di 224 Mbit/s. Rispetto al sistema MKII permetteva di aumentare la sensibilità dell’osservazione di un fattore sette. Il terminale disponeva di quattordici “Base Band Converter” (BBC) indipendenti per la conversione della frequenza di cielo alla media frequenza, che lo rendeva particolarmente indicato per osservazioni di geodinamica. Nel 1982 era già entrato in funzione il primo correlatore europeo di dati VLBI registrati col terminale MKIII presso il MPIfR di Bonn.

Quando il terminale MarkIII venne consegnato a Medicina, risultò che questo complesso sistema era stato danneggiato nel trasporto. Una volta riparato e installato, venne subito predisposta una osservazione di prova tra Effelsberg e Medicina. Ottenere frange di interferenza avrebbe validato il sistema di acquisizione dati. Spedito il nastro al correlatore di Bonn tutto lo staff attese il responso. Negativo, niente frange.

Potrebbe dipendere anche da un malfunzionamento del MKIII di Effelsberg, pensarono i ricercatori di Medicina, dopo una verifica accurata del MarkIII locale, per attenuare la loro frustrazione. Sembrava infatti che fosse tutto a posto. Poi si scoprì che il connettore



Figura 5.4 Il terminale VLBI MKIII della stazione di Medicina. A sinistra i dispositivi per la conversione della frequenza di osservazione alla media frequenza, i 14 Base Band Converters, e l’apparato che predispose il segnale prima di essere inviato al registratore a nastro magnetico sulla destra. Crediti: INAF-IRA.

del cavo che portava i segnali dai BBC al registratore era disconnesso, una disconnessione sfuggita al controllo dato che il connettore appariva inserito nella sua sede. Un urto involontario nel muoversi attorno al terminale poteva avere causato la disconnessione. Confidando che quella fosse la ragione del malfunzionamento venne organizzato un nuovo test con Effelsberg il 6 dicembre 1984. I due telescopi osservarono la potente radiosorgente BL Lacertae. Il nastro registrato venne spedito al correlatore e iniziò l'attesa spasmodica dell'intero staff IRA. Questa volta magnifiche frange di interferenza apparvero sullo schermo di controllo del correlatore. E l'11 dicembre del 1984 G. Grueff poté comunicare a S. Martellucci, presidente del Comitato Nazionale Fisica del CNR, che l'esperimento col terminale MarkIII era stato un successo. L'esperimento, scriveva Grueff, ha permesso di verificare le prestazioni di tre importanti componenti del radiotelescopio di Medicina: un ricevitore a basso rumore, 100 °K, a larga banda, 500 MHz, e doppia polarizzazione circolare, operante a 10.7 GHz interamente sviluppato all'IRA; la seconda unità Standard di Frequenza a Maser di Idrogeno destinata alla futura Stazione di Noto (SR); e infine il terminale di acquisizione dati a larga banda MKIII per VLBI.

G. Grueff allegò alla lettera copia del telegramma di congratulazioni inviato dal responsabile del correlatore del MPIfR e una seconda lettera del Centro di Correlazione del Caltech con giudizi positivi sulla qualità dei dati registrati forniti fino ad allora dall'antenna di Medicina. Grueff concludeva la lettera sottolineando che il Progetto VLBI procedeva in modo positivo nonostante difficoltà e ritardi relativi alla costruzione della seconda antenna per la Stazione di Noto (SR).

Il Consiglio Scientifico di IRA composto da G.C Perola, G. Grueff, L. Padrielli, M. Vigotti, S. Montebugnoli, C. Barbieri e F. Pacini, nella riunione del 26 giugno 1984 ascoltò una relazione del direttore facente funzioni G. Grueff sullo stato del progetto VLBI. La situazione della stazione di Medicina veniva ritenuta molto soddisfacente. L'antenna rispettava le specifiche richieste per accuratezza di puntamento, efficienza della superficie dello specchio, stabilità del campione di frequenza, ecc. Di lì a pochi giorni la Commissione per l'Accettazione Finale del Radiotelescopio Paraboloidale VLBI Stazione di Medicina, composta da G. Setti, G. Tofani, G. Grueff e A. Bombonati, si sarebbe espressa all'unanimità a favore della sua accettazione definitiva.

Il progetto iniziale dell'antenna di Medicina era stato modificato rispetto al disegno originale. Un'imprevista risposta del terreno alle sollecitazioni statiche aveva richiesto un aumento della palificazione e, simultaneamente, una diminuzione dei carichi statici gravanti sulla stessa. Si era decisa allora la costruzione di un edificio separato per alloggiare le apparecchiature, anziché collocarle, come originariamente previsto, all'interno della fondazione. Il risultato fu una fondazione dotata di ottima rigidità e stabilità e una sistemazione più razionale per ospitare tecnici e ricercatori e collocare la strumentazione.



a)



b)

Figura 5.5 Inaugurazione della parabola di 32 m di Medicina il 18 ottobre 1983. a) Iole e Giancarlo Setti lanciano la tradizionale bottiglia di spumante. G. Grueff, in una rara immagine in giacca e cravatta, è l'ultimo a destra. b) La Croce del Nord e la parabola. Crediti: INAF-IRA.

5.5 Una seconda antenna: Noto

La collocazione dell'antenna a Noto, in provincia di Siracusa, fu stabilita in una riunione del novembre 1981 tra rappresentanti IRA: R. Ambrosini, G. Grueff, e G. Tofani, e rappresentanti del Progetto Finalizzato Geodinamica del CNR: P. Scandone dell'Istituto di Geologia di Pisa, e L. Vezzani dell'Istituto di Geologia di Torino. La comunità geofisica era interessata a misure di tipo geodinamico con la tecnica VLBI.

Dal punto di vista astrofisico non esistevano pregiudiziali sul luogo dove collocare la seconda antenna. Dall'IRA veniva preferita una collocazione molto a sud per accrescere la risoluzione angolare dell'EVN in direzione nord-sud. Le zone del territorio italiano che più si prestavano alla misura dei movimenti regolari, quindi interpretabili, della crosta terrestre erano la Sardegna, il triangolo Augusta, Comiso, Pachino nella punta meridionale della Sicilia, e la Puglia esclusa la zona del Gargano. La collocazione in Sardegna venne considerata non prioritaria essendo l'isola solidale con la zolla dell'Europa centrale dove già operavano antenne VLBI. Tra le altre due zone indicate dai geofisici venne preferita la Sicilia meridionale. La località venne in seguito definita con la consulenza di L. Vezzani e F. Ghisetti, per evitare che si venisse a trovare in prossimità di fratture o zone di instabilità geologica. La scelta cadde su "Case di Mezzo" in contrada Renna Bassa nei pressi di Noto.

Nel gennaio 1982 il presidente del CNR scrisse al sindaco di Noto comunicando le intenzioni dell'IRA e quali fossero i supporti logistici necessari per l'installazione del radiotelescopio. L'Amministrazione comunale di Noto assicurò il massimo sostegno al progetto. Per la stazione radioastronomica occorrevano circa 1.5 ettari di terreno e informazioni relative alla sua stratificazione prima che si procedesse alla scelta del lotto.

Venne coinvolta la Regione Sicilia. G. Setti inviò nel gennaio 1983 al presidente on. Calogero Lo Giudice un promemoria per la definizione del progetto che prevedeva opere di urbanizzazione e fabbricati per una spesa stimata di 1.950 milioni di lire (equivalenti a 3,2 M di euro attuali secondo l'ISTAT). Nel frattempo, venne sollecitato il Servizio Patrimonio del CNR perché procedesse al più presto all'acquisto del terreno necessario, mentre il Consiglio comunale di Noto fece richiesta alla Regione di procedere al finanziamento del progetto VLBI. In luglio l'Assemblea regionale siciliana approvò il disegno di legge presentato dal presidente Lo Giudice per la "Costruzione di una stazione radioastronomica nel comune di Noto" per una spesa prevista di 1.800 milioni di lire. L'anno successivo venne affidata alla ditta SAE la progettazione e realizzazione della fondazione di supporto, degli impianti di alimentazione e dei locali di servizio del radiotelescopio. La struttura metallica dell'antenna era disponibile da tempo.

Ci si preoccupò anche di reperire il personale necessario per la gestione della Stazione. G. Setti scrisse al presidente CNR L. Rossi Bernardi, al direttore generale M. Moretti e al presidente del Comitato Scienze Fisiche S. Martellucci, sull'urgente richiesta di un minimo di dieci unità di personale. Scriveva: «Si ritiene essenziale che detto personale, almeno in parte, possa ricevere un addestramento adeguato presso la Stazione Radioastronomica

di Medicina prima di iniziare l'attività nella Stazione Radioastronomica di Noto». Si prevedeva che la stazione fosse completata entro il 1986 dalla ditta SAE adottando il sistema "chiavi in mano".

La reazione del CNR non fu immediata. Ancora nel maggio 1986 l'iter burocratico per arrivare all'affidamento della concessione per la costruzione della Stazione non si era concluso. Occorrerà attendere la fine del 1986 perché si arrivi alla concessione edilizia alla SAE. I lavori, secondo il contratto, dovevano terminare il 17 ottobre 1988. Per seguire l'andamento dei lavori la Giunta amministrativa del CNR nominò il gruppo di lavoro nelle persone di G. Tofani, N. Speroni, P. Tomasi, M. Morsiani, A. Bombonati, come supporto alla "Commissione di Collaudo in corso d'opera e finale" composta da V. Aliberti, A. Caruso, A. Fasulo e da D. Carrara.

Nel 1986 scade il mandato di G. Grueff come direttore facente funzione dell'IRA. Nuovo facente funzione venne nominata L. Padrielli. G. Grueff poté dedicare più tempo a seguire la costruzione dell'antenna di Noto. Il CNR intanto non aveva ancora provveduto, nonostante innumerevoli solleciti, ad assumere il personale richiesto per la stazione.

La costruzione dell'antenna comunque procedette. Si manifestarono perplessità sulla qualità del calcestruzzo usato per il basamento e si temette per la stabilità della Fondazione. Dopo verifiche e consulenze l'antenna venne finalmente terminata e nel novembre 1988 venne comunicato al CNR dalla Commissione incaricata (L. Padrielli, G. Grueff, A. Bombonati) che le prove di accettazione erano state effettuate e che la parabola rispondeva alle specifiche richieste.

La Stazione di Noto venne inaugurata il 28 ottobre 1988.

Il Consiglio di Presidenza del CNR, nella riunione del 18 maggio 1989 approvò l'istituzione di una Sezione distaccata di Noto dell'IRA con in organico quattro collaboratori tecnico-professionali, sei assistenti tecnico-professionali, due operatori e un assistente amministrativo.

Si aveva fretta che la stazione diventasse operativa. L. Padrielli scrisse al Servizio Patrimonio CNR una lettera nel novembre 1989 in cui si richiedeva «la consegna anticipata della stazione radioastronomica di Noto». Con numerosi sopralluoghi il personale IRA aveva verificato che le opere previste nel contratto erano state eseguite correttamente.

La stazione di Noto fu quindi dotata del personale necessario per il suo funzionamento e presero servizio Salvo Buttaccio, Corrado Contavalle, Carmelo Nicotra, Leonardo Nicotra, Carlo Nocita e Luigi Papaleo.

Nel 1989 la Public Broadcasting Service, network televisivo statunitense, girò un filmato sulla tecnica VLBI visitando le stazioni americane ed europee, fra cui Noto, che erano coinvolte nell'osservazione di NGC 1275. Il filmato, inserito nella serie TV "The Astronomers", ebbe un grande successo di pubblico.

Alla fine del 1988, l'Italia disponeva quindi di tre antenne per osservazioni VLBI: la parabola di Medicina inaugurata nel 1983, quella di Noto nel 1988 e l'antenna parabolica di 20 m di diametro di Matera dell'Agenzia Spaziale Italiana inaugurata 17 dicembre 1983.



Figura 5.6 L'antenna di 32 m di diametro inaugurata il 28 ottobre 1988 nei pressi di Noto (SR). A sinistra della antenna gli edifici della Stazione radioastronomica. Crediti: INAF-IRA.

Le antenne di Medicina e Noto fecero parte dell'European VLBI Network dal momento della loro entrata in funzione. L'antenna di Matera, dedicata a osservazioni di geodinamica VLBI, si assocerà all'EVN nel 1995 partecipando su richiesta unicamente a osservazioni in banda S/X.

L'interesse suscitato nella comunità scientifica italiana e negli ambienti politici, l'ammontare degli investimenti e l'impatto che il progetto VLBI avrebbe avuto negli studi radioastronomici e astrofisici vennero apprezzati a livello internazionale. L'Unione Astronomica Internazionale (IAU) approvò la proposta dell'IRA di organizzare il Simposio No. 110 dal titolo "VLBI and Compact Radio Sources" (vedi par. 5.7).

Per accrescere il coinvolgimento delle antenne dell'IRA nelle attività osservative della rete VLBI americana fu richiesto di divenire membri associati dell'US VLBI Network Consortium che si era costituito nel novembre 1981. Ne facevano parte il Caltech, l'Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, il Massachusetts Institute of Technology, la University of California at Berkeley e la University of Iowa. Il "Memorandum of Agreement among Member Institutions" venne sottoscritto dal direttore dell'IRA G. Setti e dal direttore facente funzioni G. Grueff il 22 febbraio 1986. In Europa unicamente il MPIfR era associato alla rete VLBI americana, mentre lo erano due altre istituzioni americane, il Jet Propulsion Laboratory e il Naval Research Laboratory. In aprile G. Grueff partecipò alla riunione del VLBI Consortium Committee americano, in cui la richiesta dell'IRA di associarsi al Consorzio venne approvata all'unanimità e Grueff salutato come nuovo membro del Consortium Committee. L'istituto si trovò a far parte di una qualificata compagnia.

Il capitolo finale del memorandum “Prospettive di sviluppo del Progetto VLBI in relazione a possibili finanziamenti per l’incentivazione della Ricerca Scientifica nel Mezzogiorno” propugnava la costruzione di un’ulteriore Stazione VLBI, per dare seguito all’originale Progetto VLBI che indicava le regioni Sicilia, Puglia, e Sardegna interessanti dal punto di vista geofisico. La Sardegna sarebbe stata particolarmente indicata per ospitare una terza antenna per la costruzione della quale era previsto un costo di 5 miliardi di lire. A quel punto l’Italia, si sosteneva, sarebbe diventato il partner più importante delle reti VLBI europea e americana.

5.6 Verso una terza antenna: il progetto Sardinia Radio Telescope (SRT)

Il progetto VLBI originario, come si è detto nel paragrafo 5.1, prevedeva la costruzione di tre antenne paraboliche. Mentre iniziava la costruzione della Stazione di Noto venne proposta la realizzazione di una terza Stazione in Sardegna dotata di una antenna parabolica del diametro “minimo” di 32 metri.

Il documento elaborato da G. Setti è del 21 febbraio 1987 e aveva per titolo: “Proposta di un’iniziativa di ricerca sul finanziamento straordinario della Cassa del Mezzogiorno”.

Le motivazioni scientifiche riguardavano Geodinamica e Radioastronomia. Il progetto Finalizzato Geodinamica aveva a suo tempo indicato come prioritaria la installazione di un’antenna nella punta meridionale della Sicilia. Altri siti fondamentali erano la Puglia e la Sardegna. In Basilicata, prossima alla regione pugliese, vi era l’antenna dell’ASI. Per gli scopi geodinamici risultava utile collocare una terza antenna in Sardegna. Per gli interessi astronomici si sarebbe in questo modo costituito un sistema di antenne VLBI italiano complementare per risoluzione angolare con altri sistemi interferometrici come il MERLIN inglese e lo stesso EVN, contribuendo proficuamente agli studi sull’astrofisica delle radiosorgenti.

L’idea di costruire un radiotelescopio in Sardegna prese corpo nel 1990 durante un incontro tra Luciano Guerriero, allora presidente dell’Agenzia Spaziale Italiana (ASI) e G. Setti, direttore dell’IRA. Un grande radiotelescopio in Sardegna si riteneva capace di aprire nuove interessanti prospettive per lo sviluppo della ricerca radioastronomica in Italia e per i programmi ASI collegati con il Deep Space Network (DSN) per esperimenti di Radio Scienza. Del colloquio vennero informati L. Padrielli, direttore facente funzione dell’IRA, e G. Grueff. Si pensò che una grande parabola del diametro di 60-70 m, in grado di operare con buona efficienza fino a frequenze attorno a 100 GHz, avrebbe rappresentato una eccellente opportunità per la ricerca radioastronomica e un notevole contributo all’EVN.

Alla fine del 1990 ASI invitò IRA a sottoporre una proposta per lo studio di fattibilità di un’antenna di almeno 64 m di diametro. Doveva contenere una stima dei costi e una valutazione delle sue potenzialità scientifiche e di applicazioni spaziali nello scenario internazionale. Il progetto IRA fu approvato da ASI nel 1992 e venne dotato

di un fondo di 230.000 euro. Al progetto era associato il CAISMI e G. Grueff sarebbe stato il responsabile del progetto.

Il bando internazionale per lo studio di fattibilità fu vinto nel 1993 dalla TIW Systems Inc. di Santa Clara, USA, uno dei cinque partecipanti. Nel marzo di due anni dopo il progetto per un'antenna di 64 m di diametro, in grado di osservare a frequenze fino a 100 GHz, venne presentato da IRA nella sede dell'ASI. Il suo costo, tasse escluse, era stimato in 36 milioni di euro.

Con la collaborazione dell'Osservatorio di Cagliari vennero stabiliti contatti con la regione Sardegna per la collocazione dell'antenna. Fu intrapresa una campagna per la selezione del sito tenendo conto delle condizioni atmosferiche e delle interferenze elettromagnetiche. Il luogo prescelto, nel comune di San Basilio in provincia di Cagliari, fu approvato dalla regione Sardegna nel maggio del 1998.

Rimaneva il non semplice problema di reperire i fondi necessari alla sua costruzione. Dal 1994 ASI doveva confrontarsi con cambiamenti a livello gestionale e di risorse finanziarie. Anche il CNR era riluttante a impegnarsi in un progetto che richiedeva cospicui finanziamenti. Il Ministero della Università e Ricerca Scientifica e Tecnologica (MURST) rimase invece interessato al progetto in linea con la sua politica di espansione delle attività di ricerca in Sardegna, in questo sostenuto dal parere positivo espresso dal Consiglio per le Ricerche Astronomiche (CRA). Un forte supporto al progetto venne dal Jet Propulsion Laboratory in previsione dell'esperimento di Radio Scienza programmato per la missione robotica interplanetaria congiunta NASA/ESA/ASI Cassini-Huygens, il cui lancio era previsto per il 15 ottobre 1997 con il compito di studiare il sistema di Saturno, comprese le sue lune e i suoi anelli. ASI era anche interessata al possibile coinvolgimento del radiotelescopio sardo in future missioni nello spazio profondo come elemento del Deep Space Network NASA.



a)



b)

Figura 5.7 Uno dei pannelli dell'antenna di Noto (SR) sostenuto da un attuttore (a sinistra); misurazioni sulla superficie parabolica eseguite la notte per rendere minimi gli effetti termici sulla struttura dello specchio (a destra).
Crediti: INAF-IRA.

Basandosi sulla richiesta ufficiale e documentata di IRA, il MURST verificò la possibilità di finanziare SRT con fondi EU per lo sviluppo della ricerca in aree disagiate del sud-Europa. Nel frattempo, il Ministro Luigi Berlinguer decise di applicare la legge (L.D. 488/92) per la promozione della ricerca in Sud Italia assegnando allo scopo uno stanziamento considerevole. IRA risottomise il progetto SRT al MURST nel luglio 1996, proponendo inoltre di finanziare il miglioramento delle prestazioni dell'antenna di Noto. Montando sotto i pannelli dello specchio degli attuatori, ci si proponeva di conservare la sua forma parabolica correggendo gli effetti quali gravità, vento, variazione di temperatura. Il radiotelescopio avrebbe potuto operare con una migliore efficienza specie a onde millimetriche. Questo passo era considerato utile per acquisire l'esperienza necessaria in previsione della costruzione di un'antenna di grande diametro (SRT).

Nel settembre 1997 il MURST approvò un finanziamento di 31 milioni di euro per il "Radioastronomy Cluster", di cui il 2% doveva servire al miglioramento delle prestazioni dell'antenna di Noto. La responsabilità della esecuzione del progetto SRT fu assegnata al CNR, di fatto all'IRA. Veniva riconosciuta inoltre l'importanza della partecipazione di ASI e Regione Sardegna.

Lo stanziamento previsto era inferiore alle stime dello studio di fattibilità, ma fu considerato sufficiente per costruire la struttura principale di SRT. Il MURST, verso la fine del 1997, richiese il progetto esecutivo all'IRA. Vi furono indicati i responsabili del procedimento nelle persone di L. Padrielli, divenuta direttrice di IRA, G. Grueff, manager del progetto, e G. Setti, responsabile scientifico. Il progetto fu approvato dal MURST solo nel maggio 1999. Intanto CNR, ASI e Regione Sardegna sottoscrissero un accordo che definiva impegni e forme di collaborazione. Per accelerare la costruzione di SRT, nel marzo 1999 ASI assegnò alla Vertex RSI, società che aveva incorporato TIW Inc., un contratto per la stesura del progetto esecutivo sotto la supervisione di G. Grueff, stesura portata a termine in due anni e resa disponibile ad ASI nel marzo 2001. Da parte sua, la Regione Sardegna attraverso l'Osservatorio di Cagliari finanziò la costruzione del basamento dell'antenna e delle infrastrutture per 5.2 milioni di euro.

Dopo il 2000 i lavori preseguirono non senza complicazioni che ritardarono l'inaugurazione di SRT fino al 30 settembre 2013. Maggiori dettagli sul progetto SRT sono disponibili nel contributo di G. Setti (2006) *Synthetic history of the SRT project*.

5.7 Sviluppi scientifici del VLBI

Parallelamente allo sviluppo tecnologico per la costruzione delle antenne VLBI il personale scientifico dell'IRA iniziava ad approfondire gli aspetti astrofisici collegati alla nuova tecnica. Il massimo interesse per la radioastronomia era, lo è tutt'ora, rivolto alle alte frequenze e alla alta risoluzione angolare.

Agli inizi del 1980 cominciò lo studio di sorgenti compatte a 18 cm con numerosi collaboratori internazionali come N. Bartel, K. Weiler, J. Romney, Nan Rendong, L.B. Baath, L. Kogan, L. Matveenko, I.G. Moiseev, G. Nicolson. Fu anche elaborato localmente un software adeguato a ridurre i dati VLBI, che rimase in uso a lungo, sostituito gradualmente dal software “Difmap” sviluppato al Caltech e da AIPS scritto per ridurre i dati VLA e adattato anche al VLBI.

Come accennato in precedenza, a partire dal 1975 un gruppo di ricercatori dell’IRA coordinato da C. e R. Fanti e da L. Padrielli era interessato a comprendere natura e proprietà delle radiosorgenti variabili a bassa frequenza (LFV), osservate periodicamente con la Croce del Nord. La comprensione del fenomeno della variabilità richiedeva la conoscenza della loro struttura su scale angolari dell’ordine del millesimo di secondo d’arco. Non sorprende che le prime osservazioni VLBI proposte dai ricercatori dell’IRA riguardassero i nuclei di queste sorgenti. Nel 1980-81 L. Padrielli e A. Ficarra si recarono a Bonn al MPIfR per la correlazione delle osservazioni Mark II a 18 cm di 25 LFV la cui struttura non era conosciuta e di quattro sorgenti di struttura nota usate come calibratori. Le osservazioni con la partecipazione di sette radiotelescopi europei e americani erano durate quarantotto ore. Le mappe, dette “ibride” perché prodotte utilizzando le “chiusure di fase”, furono analizzate indipendentemente a IRA, MPIfR e MIT. I risultati preliminari ottenuti per due sorgenti furono presentati da L.I. Matveyenko *et al.* (1982), mentre i risultati sull’intero campione comparvero in J. Romney *et al.* (1984).

Nel 1981 F. Mantovani si recò per un anno al MPIfR per lavorare col gruppo VLBI e fare esperienza sulla tecnica, oltre che per produrre mappe VLBI delle LFV. A ottobre 1981, L. Padrielli, A. Ficarra e F. Mantovani, assieme ad altri sette ricercatori del MPIfR, furono invitati in URSS in visita scientifica ufficiale da L.I. Matveyenko. Visitarono l’Accademia delle Scienze a Mosca e Leningrado e la stazione VLBI di Simeiz in Crimea. In riunioni di lavoro furono presentati i risultati ottenuti con le osservazioni con il ramo Est-Ovest della Croce del Nord sulle LFV e le mappe preliminari ricavate dai dati VLBI.



Figura 5.8 I membri della delegazione dell’Istituto di Radioastronomia e del Max-Planck-Institut für Radioastronomie in visita in URSS nel 1981 su invito dell’Accademia delle Scienze. Lucia Padrielli è visibile in prima fila al centro dell’immagine; Tonino Ficarra è il quarto da destra. Crediti: Franco Mantovani.

Alla prima seguì una seconda epoca di osservazioni VLBI delle LFV. Tutte le mappe ibride di questa seconda serie furono prodotte all'IRA sul VAX 11/780 del Centro Calcolo utilizzando AIPS (Padielli *et al.* 1986).

Le osservazioni VLBI mostrarono che solo le sorgenti la cui variabilità si manifestava dalle basse alle alte frequenze con continuità, indice che la variabilità era intrinseca alla radiosorgente, mostravano cambiamenti strutturali. Per le altre si doveva imputare la variabilità alla scintillazione del segnale provocata dal mezzo interstellare, variabilità chiamata estrinseca (Padielli *et al.* 1991). Queste interpretazioni del fenomeno della variabilità vennero presentate preliminarmente allo IAU Symposium del 1987 "The Impact of VLBI on Astrophysics and Geophysics" a Cambridge, USA e alla General Assembly dello IAU nel 1988 a Baltimore, USA. Esiste una terza epoca di osservazioni VLBI delle LFV realizzata nel 1987 utilizzando dodici stazioni. I dati furono correlati col correlatore Block 2 a dieci stazioni del Caltech da F. Mantovani. Il confronto tra le tre epoche apparve in M. Bondi *et al.* (1996b).

Il numero di antenne che partecipavano alle osservazioni VLBI Globali con il coinvolgimento di antenne americane ed europee continuava a crescere rendendo lunga la fase di correlazione per i correlatori esistenti capaci di combinare i dati di poche stazioni per

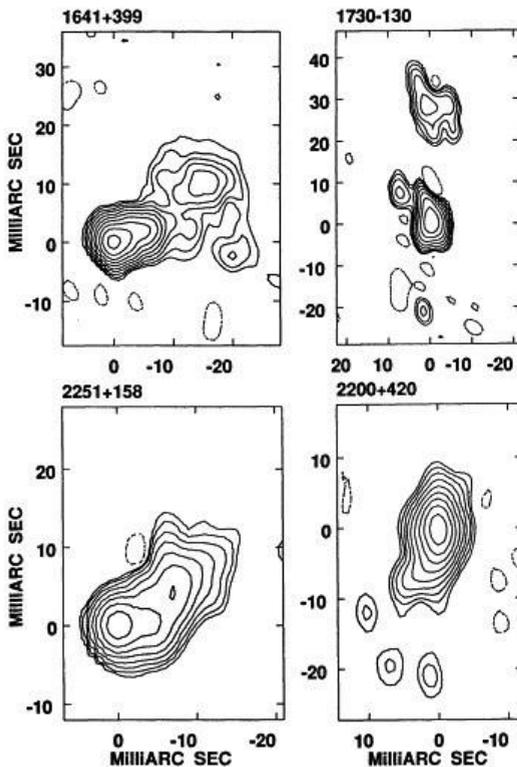


Figura 5.9 Immagini di 4 delle 20 sorgenti variabili a bassa frequenza osservate a 1.67 GHz con la tecnica VLBI da un insieme di 11 radiotelescopi: Effelsberg (Germania), Jodrell Bank (GB), Medicina (Italia), Simeiz (Crimea), Hartebeesthoek (Sudafrica), Green Bank (USA), Haystack (USA), Maryland Point (USA), North Liberty (USA), Fort Davis (USA) e Owens Valley (USA) (Bondi *et al.* 1996b). Riprodotta con il permesso © ESO.

volta. Al Caltech il correlatore Block 2 aveva sostituito il Block 0 a 5 stazioni destinato a essere smantellato. IRA propose al JPL e al Caltech, proprietario e gestore del correlatore, di prendere in carico il Block 0 per rimontarlo alla Stazione di Medicina. Presto in Italia sarebbero entrate nella fase osservativa tre antenne, Medicina, Noto e Matera, e si progettava di costruirne una nuova. Disporre di un correlatore avrebbe permesso alla rete italiana una notevole autonomia gestionale per osservazioni VLBI ad hoc. La proposta venne accolta e Giuseppe Maccaferri e Franco Mantovani partirono per Pasadena, sede del Caltech, per fare l'inventario della documentazione relativa al Block 0, prelevare una copia del software di gestione e verificare lo stato dell'hardware. La spedizione del correlatore fu organizzata nel giugno del 1987 e i tecnici di Medicina si misero subito al lavoro per riportarlo alla piena funzionalità (Gallerani *et al.* 1989, 1991). L'operazione permise al personale di acquisire esperienza sulla importante fase di correlazione e ai ricercatori di gestire i dati degli esperimenti senza ricorrere ai correlatori di MPIfR e Caltech.

Il Block 0 rimase classificato per lungo tempo come "materiale sensibile" dagli americani e il suo trasferimento in Paesi non allineati interdetto. Ogni anno, dopo il suo trasferimento, un addetto militare si presentava alla Stazione di Medicina per verificare che il correlatore fosse ancora presente. La verifica continuò anche quando il Block 0, divenuto nel frattempo obsoleto per l'introduzione del sistema di registrazione VLBI Mark III, fu spostato al Centro Visite della Stazione di Medicina.

Grazie all'esperienza acquisita nell'uso della tecnica VLBI, F. Mantovani fu nominato "VLBI Friend" per la Stazione di Medicina. Questa figura aveva il compito di seguire localmente le osservazioni VLBI per conto dell'EVN. In seguito, T. Venturi, dopo aver trascorso più di un anno al Caltech, svolse questo ruolo per circa un decennio.

Lo studio con la tecnica VLBI di sorgenti rivelate a 408 MHz con la Croce del Nord non si limitò alla classe delle LFV, ma iniziarono anche osservazioni dettagliate di radio galassie del campione B2, come NGC4278 (Schilizzi *et al.* 1983). Dal 27 giugno al primo luglio 1983 Bologna fu la sede del IAU Symposium 110 "VLBI and Compact Radio Sources", una delle conferenze di maggior successo nel ricordo di molti dei partecipanti. Il congresso, organizzato da R. Fanti, K.I. Kellerman e G. Setti, mise in rilievo l'importanza degli studi tramite osservazioni VLBI e il rilevante contributo nel contesto internazionale della ricerca radioastronomica a Bologna. Fecero parte del Comitato Scientifico i più noti radioastronomi a livello internazionale. Il convegno vide una larghissima partecipazione di ricercatori provenienti da tutto il mondo. I numerosi interventi degli oltre 150 partecipanti dimostrarono l'importanza scientifica di questi studi. La credibilità della Radioastronomia bolognese crebbe notevolmente ai loro occhi per competenza nel settore, capacità organizzativa e influenza scientifica.

In quegli anni l'attenzione dei radioastronomi e in particolare dei ricercatori dell'IRA si concentrò sulle sorgenti potenti e compatte che mostravano uno spettro radio ripido, caratteristica ritenuta anomala. Le sorgenti compatte, infatti, mostravano staticamente spettri piatti, cioè flussi radio molto simili alle diverse frequenze di osservazione, mentre le sorgenti a spettro ripido generalmente presentavano una struttura radio

di dimensioni dell'ordine del secondo d'arco. Le sorgenti compatte con spettro ripido vennero classificate come Compact Steep Spectrum Radio Sources (CSS) e la loro importanza scientifica divenne sempre più evidente (Fanti C. *et al.* 1984, 1985). Su questo argomento Daniele Dallacasa svolse la sua tesi di dottorato.

Analogamente, venne identificata una classe di oggetti caratterizzati da spettri convessi con picco attorno a 1 GHz, che furono denominate GHz-Peaked Spectrum Radio sources (GPS) e furono anche argomento della tesi di dottorato di Carlo Stanghellini (Stanghellini *et al.* 1998).

Per spiegare le caratteristiche di queste radiosorgenti furono proposti due modelli: uno che imputava il piccolo diametro di queste sorgenti al confinamento dovuto al mezzo esterno, come suggerito da van Breugel *et al.* (1988). L'altro, come sostenuto dai radioastronomi bolognesi, implicava che fossero sorgenti piccole in quanto giovani. I due modelli furono discussi in vari congressi, tra gli altri il workshop "Compact Steep-Spectrum & GHz-Peaked Spectrum Radio sources" organizzato a Dwingeloo in Olanda (C. Fanti, R. Fanti *et al.* 1990), e in diversi articoli sulle riviste internazionali.

Dopo alcuni anni di discussione e con una quantità di dati sempre maggiore, Roberto e Carla Fanti costruirono un modello in cui le GPS/CSS erano identificate con la fase iniziale delle radiosorgenti di grandi dimensioni. Usarono modelli evolutivi classici (Scheuer 1974; Baldwin 1982) e modelli del mezzo interstellare e intergalattico disponibili a quel tempo. Inoltre, considerarono un rifornimento continuo dei lobi da parte del nucleo e perdite di energia dovuta all'espansione dei lobi. Nel loro modello inizialmente prevale il processo di rifornimento e quindi la luminosità P cresce, i lobi si espandono e le perdite di energia cominciano a contrastare l'aumento di P . Infine, le perdite di energia dominano e la luminosità diminuisce definitivamente. È perciò plausibile che le radiosorgenti nascano come HFP/GPS (High Frequency Peakers), evolvano in CSS e infine diventino le radiosorgenti di grandi dimensioni (Fanti R. *et al.* 1990; Fanti C. *et al.* 1995).

Osservazioni a 230 GHz di un campione di CSS/GPS (Murgia *et al.* 1999) mostrano che il loro spettro si irripidisce ulteriormente ad alta frequenza, il che comporta un'età almeno cento volte inferiore all'età delle radiosorgenti estese. Le GPS poi risultavano essere più giovani delle CSS. Matteo Murgia svolse la sua tesi di dottorato sul problema della stima dell'età delle radiosorgenti.

Le immagini VLBI ad alta risoluzione angolare mostrarono inoltre casi interessanti di forte interazione della emissione radio con il mezzo interstellare circostante. La conoscenza delle proprietà delle regioni nucleari delle sorgenti radio andava così ampliandosi. Esempi da segnalare sono lo studio del quasar 3C119 (Nan Ren-Dong *et al.* 1991) e lo studio VLBI della polarizzazione di 3C138 che rilevò la distribuzione del campo magnetico nella regione centrale della radiosorgente (Dallacasa *et al.* 1995).

Parallelamente, in quegli stessi anni, ci si interrogava sulla possibile differenza tra quasar, BL Lac e le potenti radio galassie classificate morfologicamente come FR II da Fanaroff e Riley (1974) e le più deboli radio galassie di tipo FR I, dominanti nei cataloghi B2. Osservazioni VLBI di sorgenti potenti avevano dimostrato l'esistenza di nuclei

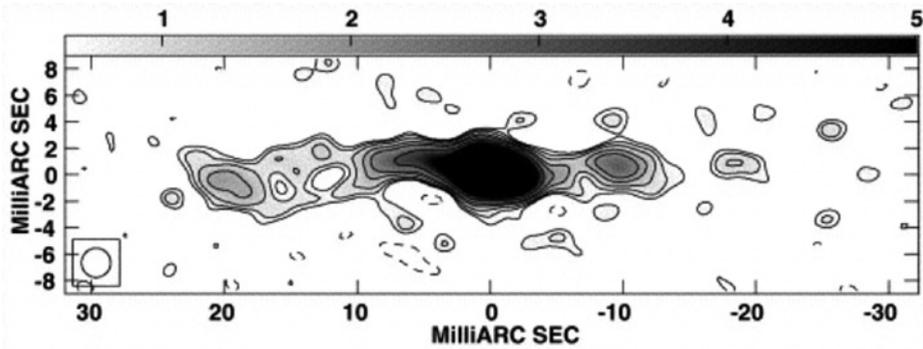


Figura 5.10 Mappa VLBI della radiogalassia 3C338 caratterizzata dalla presenza di 2 getti simmetrici. La risoluzione angolare è di 2.2 mas (Feretti *et al.* 1993). © AAS. Riprodotta con il permesso.

compatti e di getti sulla scala del millesimo di secondo d'arco e spesso la presenza di moti relativistici interni alla struttura. In alcuni casi furono rivelate variazioni strutturali con moti apparentemente superluminali tra le componenti. Velocità superiori alla velocità della luce vennero interpretate come un effetto geometrico, il prodotto dell'osservazione di getti relativistici orientati ad angoli piccoli rispetto alla linea di vista dell'osservatore.

Ben diversa era la situazione delle più deboli radiogalassie FRI. Non si disponeva di osservazioni VLBI con la sensibilità necessaria per osservare i loro deboli nuclei. La simmetria rispetto al nucleo e le caratteristiche dei getti delle FRI nella scala del secondo d'arco unita alla debole luminosità dei nuclei suggerivano che i getti di queste sorgenti avessero caratteristiche diverse e in particolare non possedessero velocità relativistiche. Non era chiaro se e come le differenze morfologiche presenti su grande scala tra le FRI ed FRII fossero il riflesso delle loro proprietà nucleari.

L'ingresso della nuova stazione di Medicina nell'EVN fu importante per aumentarne la sensibilità. Nel 1985 e 1986 fu effettuato un primo esperimento VLBI registrando i dati con il terminale MK III e le antenne di Onsala, WSRT, Effelsberg, Jodrell-Bank, Medicina e Haystack. Furono osservate sedici sorgenti di bassa potenza per poi effettuare uno studio statistico delle proprietà nucleari su un campione completo di ventisette radiogalassie sia di alta che di bassa potenza. A questo primo progetto seguirono osservazioni dettagliate di radiogalassie di tipo FRI come NGC315, B2 0836+29, 3C465 e in particolare 3C338, prima radiogalassia a mostrare la presenza di due getti simmetrici (Feretti *et al.* 1993) e 1144+35 una delle poche sorgenti di bassa potenza oltre M87 con un moto proprio superluminale (Giovannini *et al.* 1999).

Questi studi stabilirono che anche le FRI mostrano nuclei compatti e getti con moti relativistici. Mentre nelle sorgenti potenti i getti presentano velocità relativistiche dalle regioni nucleari ai lobi (fino alle "hot-spots"), nelle sorgenti deboli i getti rallentano entro pochi kpc dal nucleo.

La presenza di getti relativistici nelle regioni nucleari sia delle FR II che delle FR I trovò conferma nella correlazione trovata tra potenza nucleare e potenza totale delle radiosorgenti (Feretti *et al.* 1984; Giovannini *et al.* 1988) che è valida sia per radiogalassie potenti che deboli, per quasar e oggetti tipo BL Lac.

Nel 2001 venne pubblicato un articolo che riassume tutti i risultati VLBI sull'argomento dal 1990 al 2000 confermando la validità dei modelli unificati per le sorgenti di alta e bassa potenza (Giovannini *et al.* 2001).

Nel 1988, a dimostrazione del crescente interesse da parte della comunità scientifica per le osservazioni ad alta risoluzione angolare ottenibili con la tecnica VLBI fu organizzata nei pressi di Bologna la Scuola NATO "VLBI Technique and Applications" diretta da M. Felli dell'Osservatorio Astrofisico di Arcetri e R. Spencer dell'Università di Manchester, Jodrell Bank.

Nel febbraio del 1997 venne lanciato dall'Agenzia Spaziale Giapponese JAXA il satellite HALCA per il progetto VSOP (VLBI Space Observatory Programme) e iniziò quindi l'epoca del VLBI spaziale, dove grazie al collegamento tra le antenne VLBI da terra e quella in orbita nello spazio si aumentarono notevolmente le capacità osservative del VLBI.

L'IRA partecipò attivamente al progetto grazie alle antenne di Medicina e Noto. In particolare, l'antenna di Noto fu una delle antenne dedicate alle osservazioni per il progetto VSOP e per il progetto di survey che aveva lo scopo di osservare le 400 sorgenti compatte più brillanti a 5 GHz (Fomalont *et al.* 2000). Fra i vari programmi approvati vi era un Key project IRA (P.I. T. Venturi) che aveva lo scopo di osservare a 22 GHz un gruppo selezionato di sorgenti fortemente variabili a bassa frequenza. Purtroppo, le osservazioni a quella frequenza furono pregiudicate da un danno al ricevitore a bordo della sonda nella fase di lancio del satellite.

Ricercatori dell'IRA parteciparono a osservazioni di sorgenti singole come 3C 446 e Markarian 501. Le osservazioni di Markarian 501 portarono alla scoperta di un getto strutturato ("limb-brightened jet") nelle regioni centrali di questo BL Lac (Giovannini *et al.* 2000; tesi di laurea di M. Giroletti).



Figura 5.11 Lucia Padrielli assieme ai colleghi in un momento di relax al termine di una riunione EVN all'Onsala Space Observatory in Svezia. Da sinistra Ralf Spencer (Jodrell Bank), Ger de Bruyn (Westerbork), Richard Porcas (MPIfR), Peter Scheuer (Cambridge), Malcolm Walmsley (Arcetri), Andrzej Kus (Torun). Crediti: INAF-IRA.

5.8 VLBI e Geodesia

Gli studi VLBI per la geodesia ebbero inizio in USA alla fine degli anni Sessanta, con lo scopo di rivelare i cambiamenti di posizione del terreno nella regione della faglia di Sant'Andrea in California, dove la placca del Pacifico incontra la placca nordamericana. Anche per l'Italia, zona altamente sismica, gli studi di geodesia hanno sempre rivestito un ruolo di fondamentale importanza.

A fine 1986 il radiotelescopio di Medicina venne dotato di un ricevitore in banda S/X, 2.3/8.4 GHz, impiegato per osservazioni geodinamiche e l'IRA siglò un accordo con il National Oceanic and Atmospheric Administration degli USA entrando a far parte ufficialmente della rete Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS).

Il primo test IRA di osservazioni VLBI per scopi geodinamici avvenne con la partecipazione dell'antenna di Medicina al progetto SARG, una misura del moto dei poli realizzata con lunghe linee di base in direzione Nord-Sud, in programma dal 31 gennaio al 7 febbraio 1987. Si provò in quella occasione il nuovo ricevitore in banda S/X, non raffreddato, unico tra i ricevitori disponibili a essere collocato nel fuoco primario dell'antenna. Osservare col ricevitore nel fuoco primario comportava lo smontaggio del sub-riflettore, lo specchio secondario, operazione che richiedeva una giornata di lavoro con buone condizioni atmosferiche e qualche rischio per gli operatori. La qualità dei dati forniti, superiore a quella di altri osservatori coinvolti, ricevette le congratulazioni di James Campbell, membro della Commissione IRIS per la Germania e di S. Shapiro, chairman del board IRIS.

Nel dicembre dello stesso anno divenne disponibile il ricevitore in banda S/X raffreddato criogenicamente. La Temperatura di Sistema dell'antenna diminuì da 180 °K a 90 °K in banda S e da 210 °K a 100 °K in banda X. Sempre nel 1987 Medicina partecipò a diverse osservazioni del programma del Crustal Dynamics Project della NASA "International Radio Interferometric Surveying" programmato per la determinazione di UT1, il Tempo Universale di rotazione terrestre.

Nell'aprile del 1988 si tenne a Bologna il "6th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry" (Tomasi 1988) a riconoscimento, da parte della comunità geodinamica, dell'importanza dell'entrata in rete dell'antenna di Medicina e a breve scadenza di quella di Noto.

Erano in programma anche la costruzione alla Stazione di Medicina, col contributo del Piano Spaziale Nazionale, di una piattaforma per ospitare il telescopio del "Mobile Satellite Laser Ranging", e l'installazione di antenne del Global Positioning System, queste ultime frutto di una collaborazione con il gruppo di Geofisica del dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna. Medicina si avviava a diventare una delle "stazioni fondamentali" di geodinamica, disponendo di diverse tecniche osservative.

Sul calcolatore HP-1000 E-Series che guidava antenna e terminale di acquisizione dati MKIII vennero installati i programmi CALC/SOLVE usati per l'analisi dati VLBI geodinamici post-correlazione e SKED and DRUG per la pianificazione delle osserva-

zioni. Vennero così poste le basi per lo sviluppo nell'IRA degli studi di geodesia. Come ulteriore passo a conferma dell'intenzione IRA di investire in questo settore nel giugno 1987 era stato sottoscritto un accordo di cooperazione con il National Oceanic and Atmospheric Administration degli USA e col Crustal Dynamics Project della NASA.

Il numero di radiotelescopi europei coinvolti nella rete VLBI geodinamica intanto continuava a crescere. Vennero organizzati diversi progetti sotto l'egida dell'European VLBI for Geodesy and Astrometry (EVGA) che coinvolgevano Effelsberg e Wettzell



a)



b)

Figura 5.12 a) foto di gruppo al termine di un workshop di ricercatori europei di Geodesia e Astrometria organizzato dall'IRA presso la Stazione Radioastronomica di Noto nel 1991. Al centro Lucia Padrielli, direttrice dell'IRA. b) alcuni dei partecipanti al "10mo Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry" organizzato presso il Centro di Geodesia Spaziale "G. Colombo" di Matera il 24-25 maggio 1995 (da sinistra: Franco Mantovani (IRA), Richard Porcas (MPIfR), Paolo Tomasi (IRA e ITIS), Walter Alef (MPIfR), Alessandro Orfei (IRA). Sullo sfondo l'antenna VLBI di Matera). Crediti: INAF-IRA.

in Germania, Onsala in Svezia, Metsahovi in Finlandia, WSRT in Olanda, Robledo in Spagna e le due antenne italiane di Matera e Medicina.

EVGA presentò una richiesta di supporto finanziario alla Comunità Europea. Per il periodo 1993-1996 il progetto ricevette borse di studio nell'ambito del programma "Science". Per la fase due del progetto (1996-2000) il gruppo ricevette un supporto finanziario attraverso il programma "Training and Mobility of Research" (TMR). Titolo del progetto era "Measurement of Vertical Motion in Europe by VLBI". Il contributo comprendeva finanziamenti per cinque posizioni temporanee post-dottorato da assegnare a ricercatori visitatori. Le borse erano disponibili per gli istituti di quattro Paesi europei. Spagna, Svezia, e Germania ebbero assegnata una borsa ciascuno, l'Italia ebbe assegnate due borse da usufruire presso l'IRA (Campbell, 1996, 11th EVGA meeting, Onsala, SE).

Questa fu la prima partecipazione di IRA a un progetto finanziato dalla UE. Lo scopo era il trattamento della rifrazione troposferica che causa un eccesso nel ritardo del segnale durante le osservazioni. Un effetto simile lo si riscontra anche nelle osservazioni col GPS. Lo scopo era di ottimizzare l'analisi per migliorare la misura della componente verticale del moto dei siti dove sono collocate le antenne VLBI e GPS. Ci si proponeva di ottenere una stima attendibile della variazione della posizione verticale delle stazioni, un contributo utile per gli studi di geofisica sul sollevamento della crosta terrestre, dei fenomeni di subsidenza e sui cambiamenti del livello del mare.

In breve tempo l'IRA diventò un membro importante dell'International VLBI Service (IVS) geodinamico. Le sue due antenne parteciparono regolarmente alle osservazioni in rete coi radiotelescopi europei, americani, russi, giapponesi e sudafricani sotto la spinta in particolare di P. Tomasi nominato membro del directing board dell'IVS.

L'IRA diventò uno dei Centri di Analisi Dati dell'IVS. Il software necessario per analizzare i dati VLBI geodinamici venne implementato sui calcolatori del centro calcolo dell'IRA. Fu un lavoro che richiese la conoscenza dei programmi di analisi dati, una profonda competenza nel valutare i risultati ottenuti, una capacità critica nel lavoro di confronto tra i risultati ottenuti con le analisi locali e quelle fornite degli altri centri IVS.

Vennero realizzate le prime misure della separazione lineare tra le antenne di Noto e Medicina con una accuratezza inferiore al millimetro, dimostrando che questa diminuisce col tempo alla velocità di alcuni millimetri all'anno sotto la spinta della placca africana.

Scrisse L. Padrielli, facente funzioni dell'IRA, in una lettera al presidente del CNR L. Rossi Bernardi datata primo luglio 1991: «Alcuni giorni fa ho inviato informazioni relative a esperimenti VLBI di geodinamica con la Stazione di Noto, che hanno permesso di rilevare un trend di spostamento della zolla relativa alla Sicilia meridionale rispetto al Centro-Europa. Il risultato è in linea con le teorie, ma è comunque di eccezionale interesse scientifico, perché permette di migliorare notevolmente le conoscenze sulla dinamica dell'area mediterranea».

L'IRA stabilì collaborazioni dirette con il National Ocean and Atmospheric Administration degli Stati Uniti, interessato a ottenere misure del periodo di rotazio-

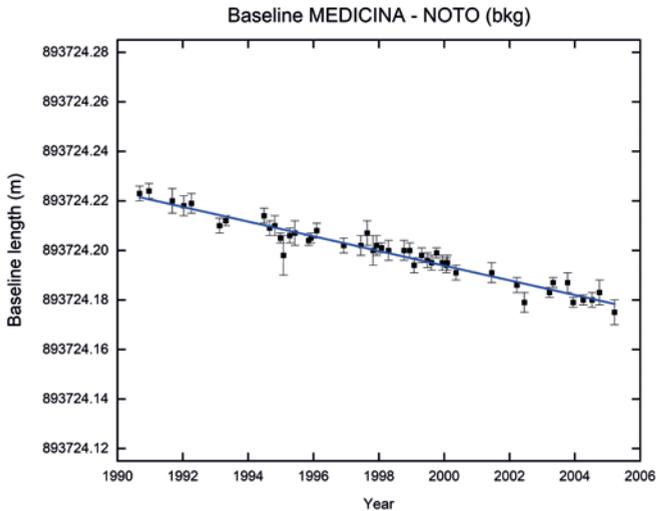


Figura 5.13 Tasso di variazione della lunghezza di base tra le antenne di Medicina e Noto ottenuto da dati VLBI. I dati fino al 2005 confermano il risultato del 1999 ottenuto da Tomasi, Rioja e Sarti (1999): la distanza tra Medicina e Noto si sta accorciando con una velocità pari a 3.1 ± 0.3 mm/anno.

ne della Terra con l'accuratezza di 0.1 millisecondi di tempo. In collaborazione con il Goddard Space Flight Centre venne osservato il Mars Pathfinder in rotazione attorno a Marte per determinare le effemeridi della sua orbita attorno al pianeta rosso, riducendo notevolmente l'incertezza di quelle fino ad allora disponibili.

Quando nel 1993 il CNR fondò l'Istituto di Tecnologia e Informatica Spaziale (ITIS) con sede presso il Centro di Geodesia Spaziale della Agenzia Spaziale Italiana, P. Tomasi venne nominato direttore e si trasferì a Matera, sede dell'ITIS. Diversi giovani che già collaboravano con lui a Bologna decisero di seguirlo. Crescendo i finanziamenti, si formò il primo gruppo italiano dedicato a studi di geodinamica VLBI, di osservazioni e analisi dati ottenuti coi satelliti del Global Positioning System e di telerilevamento con tecnica SAR, radar ad apertura sintetica. L'ITIS diventò in breve tempo un punto di riferimento a livello internazionale. Con il decreto legislativo del 30 gennaio 1999, n. 19 "Riordino del Consiglio nazionale delle ricerche", ITIS fu accorpato all'IRA e il gruppo di ricerca si trasferì da Matera a Bologna, nella nuova sede IRA di via P. Gobetti 101, presso l'Area della Ricerca CNR.

6. Attività alla stazione di Noto

Con l'inaugurazione dell'antenna di Noto, nel 1988, si chiuse un periodo di intenso impegno per la nuova stazione da parte di tutto il personale dell'IRA e si presentò la necessità di ottenere personale dedicato per l'operatività della stazione e per lo sviluppo di attività di ricerca. Nel 1989, nel quadro del riequilibrio della distribuzione di personale per la ricerca nel sud Italia, vennero assegnate alla stazione di Noto 8 unità di personale: 4 laureati e 4 tecnici. Gino Tuccari fu designato responsabile degli aspetti tecnici e tecnologici.

Noto partecipò per la prima volta nell'aprile 1989 alle osservazioni VLBI delle reti europea e americana unificate, con l'unico ricevitore allora disponibile, cioè quello a 10.7 GHz. Nello stesso anno, fece anche le prime osservazioni VLBI geodetiche utilizzando ricevitori e sistema di acquisizione presi in prestito, in sostituzione dell'antenna di Matera non ancora operativa.

L'attività tecnologica alla stazione riguardò nel corso degli anni l'implementazione di nuovi ricevitori e la realizzazione di diversi miglioramenti, sia hardware che software.

Dal punto di vista della ricerca scientifica, va ricordata una collaborazione italo-spagnola per la ricerca di sorgenti da utilizzare come calibratori di fase negli esperimenti VLBI per astrometria.

Oltre alle attività inerenti al VLBI, la ricerca presso la stazione di Noto riguardò principalmente lo studio di stelle. La scoperta che le stelle in un grande intervallo di masse e temperature presentano emissione radio risale agli inizi degli anni Settanta. Le radiosorgenti stellari comprendono corone sia termiche che non-termiche, regioni di transizione, cromosfere, venti stellari e sistemi binari interagenti. L'emissione radio brillante è termica di tipo "free-free", ha origine nei venti stellari ed è quindi legata a grande perdita di massa. L'emissione non termica è dovuta a giosincrotrone collegato a un forte campo magnetico, spesso variabile. L'emissione radio in stelle attive è caratterizzata da periodi cosiddetti "quiescenti", cioè emissione priva di fenomeni impulsivi e brillamenti, o "flares", con flusso dell'ordine di diverse decine di mJy e variabile lentamente, e da periodi attivi, cioè con forti emissioni fino al Jy.

I primi studi all'IRA furono intrapresi da Grazia Umama e Corrado Trigilio e riguardarono sistemi binari stretti RS CVn e sistemi binari Algol, caratterizzati da forte emissione radio e intensa variabilità. Una survey di sistemi binari di tipo Algol, effettuata con il VLA a 6 cm, permise di rivelare emissione radio da molti sistemi di questo tipo, con flusso variabile e flares. Emerse che l'emissione radio non è attribuibile all'emissione termica "free-free" della corona, ma è di natura non termica. Fu proposto un modello a due componenti, una compatta nucleare e una estesa, e furono rivelati forti campi magnetici, cioè circa 100 G nella componente compatta e circa 20 G nella componente estesa. Fu inoltre scoperto che i sistemi di tipo Algol mostrano correlazione tra l'emissione radio quiescente e l'emissione X, quindi sono molto simili in radio ai sistemi RS CVn (Umama, Catalano e Rodonò 1991; Umama *et al.* 1993; Umama, Trigilio e Catalano 1998).

Furono inoltre studiate con il VLA stelle chimicamente peculiari, cioè caratterizzate da sovrabbondanza di alcuni elementi chimici e da campi magnetici dell'ordine dei 1000 G, nelle quali ci si aspettava emissione radio termica "free-free" prodotta in presenza di forti e potenti venti stellari. Diversamente dalle previsioni, fu evidenziato che questi oggetti sono molto simili in radio alle stelle attive, con spettri tipicamente piatti, emissione quiescente caratterizzata da polarizzazione circolare, anche se modesta, e, in alcuni casi, anche flares, e quindi incompatibili con emissione termica. Si dedusse quindi che l'emissione radio avesse origine non termica e che fosse prodotta da elettroni accelerati negli shocks che si formano in un vento stellare disomogeneo. Fu infine suggerito che tale emissione fosse dovuta a modulazione rotazionale, probabilmente legata a un campo magnetico misallineato (Leone e Umama 1993; Leone, Trigilio e Umama 1994; Leone, Umama e Trigilio 1996).

In anni successivi fu portato avanti lo studio di stelle calde luminose di tipo OB, caratterizzate da emissione radio termica dovuta alla presenza di forti venti stellari. Emerse che questi oggetti mostrano anche evidenza di emissione non termica dovuta a elettroni accelerati nei venti stellari disomogenei, e si ottenne una stima della perdita di massa (dell'ordine di 10^{-6} - 10^{-5} masse solari/anno) correlata con la luminosità bolometrica (Scuderi *et al.* 1998).

Nel 1989 fu proposto un programma di monitoraggio con il radiotelescopio di Noto usato come "single-dish". Lo scopo era quello di analizzare la variabilità di sistemi stellari attivi, la statistica dei flares e la connessione tra periodi attivi e periodi di quiescenza. Si volevano inoltre ottenere informazioni indirette sulla morfologia delle regioni emittenti e studiare le possibili correlazioni con altre diagnostiche di attività. Le osservazioni con il paraboloide di Noto a 5 GHz si protrassero per diversi anni. Furono rivelati fenomeni di variabilità estrema, in contrasto con modelli evolutivi che interpretavano fase quiescente come fase finale di un flare (Trigilio *et al.* 1993; Trigilio, Leto e Umama 1998). Nella sorgente HR 1099 furono osservati diversi flares minori, la presenza di una struttura magnetosferica stabile e la correlazione tra il flusso radio e la frazione di fotosfera coperta da macchie (Umama *et al.* 1995).

Uno degli scopi del monitoraggio di oggetti con il radiotelescopio di Noto fu, inoltre, quello di selezionare oggetti per osservazioni VLBI mirate, aventi lo scopo di risol-

vere spazialmente l'emissione di flares, e seguirne l'evoluzione. Le osservazioni VLBI, portate avanti per diversi oggetti individuali di tipo diverso, confermarono il modello a due componenti e permisero di determinare che i flares avvengono nel nucleo, mentre l'emissione dell'alone esteso corrisponde a radiazione quiescente a livello più basso, con evidenza di espansione della sorgente radio quando il flare decresce (Trigilio, Umana e Migenes 1993).

Inoltre, le antenne di Noto e di Medicina dedicarono una frazione rilevante del loro tempo osservativo allo studio della variabilità di sorgenti extragalattiche. Tra questi programmi lo studio della variabilità dei Blazar ottenne un'alta visibilità. I Blazar, nuclei galattici attivi con un getto relativistico diretto verso l'osservatore, sono potenti sorgenti altamente variabili che emettono in tutto lo spettro elettromagnetico. Con l'idea di estendere il numero di Blazar, fino ad allora esiguo, che possedevano studi multifrequenza che permettessero di ottenere la distribuzione spettrale di energia dall'X al Gamma, fu iniziata una campagna di osservazioni mensili con l'antenna di 32 m di Medicina e di Noto di un campione di 23 sorgenti selezionate fra gli oggetti osservati dal satellite X BeppoSAX (Venturi *et al.* 2001). Le osservazioni durate 4 anni (1996-1999) furono fatte a 5 GHz e a 8.4 GHz, a cui si aggiunsero dati a 22 GHz per un periodo di un anno e mezzo. Tutte le sorgenti, eccetto una, mostrarono variabilità radio durante i quattro anni di osservazione. Un'analisi statistica suggerì caratteristiche diverse di variabilità, da flares chiaramente visibili a variabilità ricorrente a curve di luce complesse.

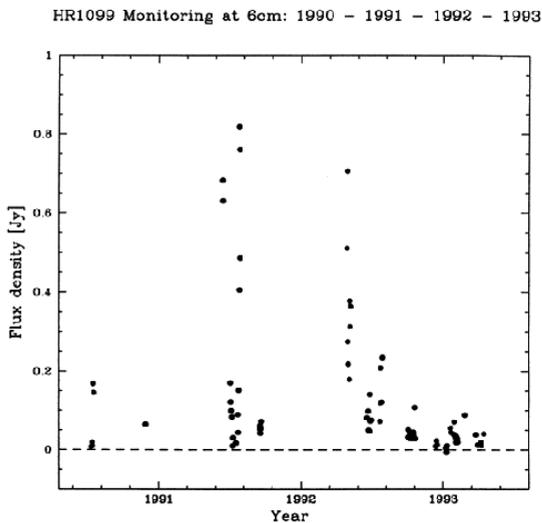


Figure 6.1 La radio stella HR1099 osservata a 5 GHz con la parabola di Noto dal 1990 al 1993. La densità di flusso è rappresentata in funzione del tempo. Sono evidenti i "flares" di questa stella attiva (Umana *et al.* 1995). Riprodotta con il permesso © ESO.

7. Utilizzo dell'antenna di Medicina come strumento singolo

7.1 Molecole nello spazio

Sebbene l'antenna di 32 m di Medicina fosse destinata a far parte della rete VLBI, presto i ricercatori iniziarono a esplorare la possibilità di utilizzare il telescopio come strumento "single-dish" per osservazioni spettroscopiche. Uno dei primi ricercatori a usare l'antenna di 32 m in questo modo fu Flavio Scappini, dell'Istituto di Spettroscopia Molecolare (CNR), che nel 1986 rivelò il cianodiacetilene (HC_5N) a 10.7 GHz (Comoretto *et al.* 1988) nel Taurus Molecular Cloud, usando come backend l'autocorrelatore sviluppato, tra gli altri, da Gianni Comoretto, allora all'IRA, sezione di Firenze.

Ad Arcetri il gruppo di Radioastronomia, guidato da Marcello Felli, iniziò a interessarsi all'utilizzo dell'antenna di Medicina per la spettroscopia radio, ravvisando la possibilità di acquisire competenze scientifiche e tecnologiche. Durante i test effettuati con l'autocorrelatore furono utilizzati vari ricevitori per osservare le linee di ricombinazione dell'idrogeno e HC_5N (10.7 GHz), H_2CO (5 GHz), OH (1.7 GHz) e H_2O (22 GHz). Alla ricerca di un campo di indagine in cui la strumentazione (antenna + ricevitore + backend) potesse essere competitiva, fu deciso di concentrarsi sullo studio dell'emissione di maser H_2O , con l'idea di fare un sondaggio per trovare nuove sorgenti e indagare la variabilità dell'emissione in modo sistematico. Citando Felli (1987):

Lo studio della variabilità dei maser H_2O , sebbene nota fin dalle prime osservazioni, è stato quasi completamente trascurato per l'impossibilità di disporre di tempo di telescopio per periodi prolungati e distribuiti in maniera uniforme su archi di tempo sufficientemente lunghi. È in questo campo che lo strumento potrebbe trovare una sua naturale collocazione.

Il gruppo di Firenze (Osservatorio di Arcetri e IRA-Sez. Firenze) iniziò così un programma di osservazioni di maser H_2O , prima ri-osservando tutti i maser conosciuti

nelle regioni di formazione stellare e negli involucri di stelle evolute con declinazione maggiore di -30° , e poi cercando nuovi maser in sorgenti simili. Fu creato un catalogo omogeneo (Brand *et al.* 1994), che divenne patrimonio per l'intera comunità scientifica e fu utilizzato per diversi progetti successivi.

Numerosi altri programmi di ricerca che hanno coinvolto osservazioni di maser d'acqua con il radiotelescopio di Medicina furono realizzati negli anni Novanta principalmente dal gruppo Arcetri e anche da Giorgio Palumbo (allora CNR- TESRE) e dai suoi studenti. La ricerca sui maser fu estesa anche all'IRA a Bologna quando Jan Brand, uno dei membri del gruppo radio di Arcetri, si trasferì a Bologna nel 1992. Lo studio dei maser stellari fu l'argomento della tesi di dottorato di Luca Moscadelli. Il gruppo di Firenze e Bologna iniziò un programma a lungo termine per monitorare la variabilità maser in 43 regioni di formazione stellare e 22 stelle evolute, che si è protratto ben oltre il 2000. Nonostante l'osservazione dei maser H_2O fosse rimasta la principale attività spettroscopica a "single-dish" del radiotelescopio di Medicina, utenti esterni osservarono con successo le righe di emissione di altre molecole, ad esempio i maser di metanolo (CH_3OH) a 6.7 GHz (Slysh *et al.* 1999). I risultati ottenuti con le osservazioni di Medicina stimolarono l'interesse locale e nazionale, come testimoniato dalle tre conferenze su "Molecole nello spazio e in laboratorio" tenute a Bologna (1989), Rovereto (1993) e Carloforte (1999). Lo

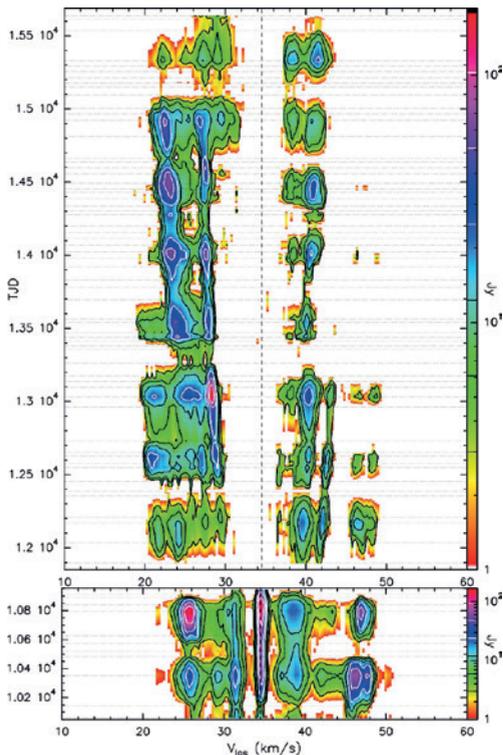


Figura 7.1 La figura mostra la densità di flusso rispetto alla velocità, in funzione del tempo, per l'emissione del maser d'acqua della variabile Mira, IK Tau. Ogni linea tratteggiata orizzontale indica un'osservazione. Il tempo è espresso in Julian Date troncato. Le osservazioni sono state fatte con la parabola di Medicina dal 12/12/1995 al 18/3/2011. L'emissione maser varia seguendo il periodo ottico di 461 giorni della stella ma con un ritardo di 51 giorni. Questi dati, rappresentati in modo leggermente diverso, sono apparsi in Brand *et al.* (2018).

studio del gas molecolare nella nostra e in altre galassie, specialmente alle frequenze più alte (lunghezze d'onda mm e sub-mm), è diventato un campo di ricerca attivo in Italia.

7.2 Search for Extra-Terrestrial Intelligence (SETI)

Nel giugno del 1990, con il supporto di G. Grueff e di G. Setti, S. Montebugnoli partecipò al congresso di Bioastronomia in Val Cenis sulle Alpi francesi, dove presentò in un poster la candidatura della stazione di Medicina ad entrare nel circuito osservativo SETI. In realtà, per potere fare questo mancava un analizzatore di spettro ad altissima risoluzione, attorno a 1 Hz.

Si partì con la costruzione di un mini-spettrometro SETI per la parabola di 32 m sfruttando i componenti disponibili in magazzino e la velocità di nuovi dispositivi in grado di calcolare la FFT (Fast Fourier Transform) sui dati ottenuti campionando direttamente la radio frequenza convertita in banda base. Al congresso di Bioastronomia a Santa Cruz (USA) nel 1993, alcuni ricercatori del Jet Propulsion Laboratory parlarono dell'impatto della cometa Shoemaker Levy 9 con l'alta atmosfera di Giove che sarebbe dovuto avvenire l'anno successivo. Quale migliore occasione per chiedere fondi per terminare lo spettrometro e osservare l'evento con una nuova macchina veloce e ad alta risoluzione frequenziale. A mancare era la parte di calcolo, la più costosa.

Con il fondamentale supporto di L. Padrielli, direttore dell'IRA, e un finanziamento ricevuto da A. Bombonati, direttore dell'Area CNR di Roma, fu possibile acquistare le unità di calcolo negli USA. Questo finanziamento si concretizzò con la collaborazione tra S. Montebugnoli e C. Cosmovici dell'IFSI dell'Area CNR di Roma. Fu una corsa contro il tempo perché a luglio sarebbe apparsa la cometa. Si costruì quindi lo spettrometro MSPEC 0, basato sul calcolo dello spettro di potenza sui dati ottenuti campionando direttamente la radio frequenza. Questo strumento, che forniva uno spettro di potenza ogni 5-10 secondi, permise di correggere lo spostamento Doppler molto rapido dovuto all'elevata velocità di rotazione di Giove. Dopo mesi di riduzione dati fatta a mano, in assenza del software di post-elaborazione, fu rivelata la riga di emissione a 22 GHz della molecola dell'acqua, proveniente dai frammenti della cometa durante il loro impatto con Giove. L'interpretazione scientifica fu affidata al gruppo composto da C. Cosmovici, P. Colom dell'Osservatorio di Paris-Meudon e S. Pogrebenko di Dwingeloo, Olanda. Questo risultato fu di grande importanza perché provò che le comete sono effettivamente in grado di depositare acqua e altre molecole nelle atmosfere planetarie. Dimostrò inoltre che un analizzatore ad alte prestazioni concepito per il SETI, poteva essere vantaggiosamente impiegato per altri tipi di osservazioni. S. Montebugnoli, C. Cosmovici e L. Padrielli presentarono il risultato delle osservazioni dell'impatto della cometa su Giove in una affollata conferenza stampa nella Sala Marconi, aula magna del CNR a Roma, nel luglio del 1995.

Nel 1996, con un finanziamento di 4 milioni di lire, fu possibile acquistare dall'Università di Berkeley un sistema SETI Serendip IV operante in "piggyback mode", cioè con osservazioni in parallelo a quelle scientifiche in corso senza perturbarle, e in grado di memorizzare i segnali sospetti su un disco rigido. Originariamente il sistema era costituito dal "main frame", il convertitore A/D e una scheda da 4 MHz di banda e 4 milioni di canali. Un'ulteriore scheda di ampliamento fu regalata dal SETI Institute e altre dall'Istituto IFSI di Roma. Con questo spettrometro da 0.7 Hz di risoluzione furono fatte osservazioni in "piggyback mode" per 10 anni da Stelio Montebugnoli e Jader Monari. Tanti segnali sospetti, ma nessuno purtroppo confermato.

8. Astronomia X e radiazione X di fondo

La densità di energia del cielo nei raggi X è dominata da una radiazione diffusa di origine cosmica: il fondo X, scoperto nel 1962 da Giacconi *et al.* (1962). Infatti, nei dati provenienti dalle osservazioni compiute con un razzo lanciato per studiare l'emissione X della Luna identificarono la prima sorgente X extrasolare (Sco-X1) e il fondo X. Quest'ultimo è un segnale completamente isotropo non proveniente da oggetti identificabili. Fu ipotizzato che una possibile sorgente potesse essere un plasma uniforme a una temperatura di 100 milioni di gradi (Bergamini, Londrillo e Setti 1967).

G. Setti e L. Woltjer (1973), dopo la rivelazione in banda X del quasar 3C273, suggerirono che i quasar, se avessero avuto la stessa luminosità X di 3C273, avrebbero potuto contribuire a gran parte della radiazione di fondo X osservata. Questa ipotesi fu ribadita qualche anno più tardi sulla base dell'emissione X di quattro quasar (Setti e Woltjer 1979).

Comunque, negli anni Ottanta l'origine del fondo X era ancora molto dibattuta. Vi erano alcuni ricercatori che sostenevano l'importanza del contributo di un gas termico che permeava tutto l'Universo, sulla base del fatto che a basse energie lo spettro assomigliava allo spettro di Bremsstrahlung.

In quegli anni si accumularono dati su centinaia di quasar ottenuti dal satellite per astronomia X Einstein che indicavano che una frazione molto consistente della radiazione X di fondo è costituita dall'emissione dei quasar. Agli studi sui quasar in banda X diedero un contributo fondamentale G. Zamorani e T. Maccacaro, ricercatori dell'IRA e visiting scientists al Center for Astrophysics (CfA) di Cambridge, Massachusetts in USA (Zamorani *et al.* 1981). Dopo che R. Giacconi e G. Zamorani (1987), sottraendo il contributo delle sorgenti note, calcolarono che lo spettro del fondo X non era più compatibile con quello di un gas caldo, G. Setti e L. Woltjer (1989) dimostrarono che l'unica possibile soluzione era che anche il fondo residuo provenisse dal contributo di sorgenti puntiformi. Queste sorgenti vennero poi individuate, confermando la loro tesi, dai satelliti X di "seconda generazione" come Chandra e XMM. Su questo argomento Andrea Comastri discusse la sua tesi di dottorato.

In quegli stessi anni, T. Maccacaro e I. Gioia, visiting scientists al CfA, portarono a compimento un lavoro basilare per l'astronomia X, la cosiddetta "Einstein Medium Sensitivity Survey" o EMSS, che comprendeva all'inizio 112 sorgenti, estratte come "serendipitous" da gran parte dei puntamenti del Satellite Einstein (Gioia *et al.* 1984). Una estensione della EMSS (Gioia *et al.* 1990a) fornì alla fine un campione di 835 sorgenti nella banda 0.3-3.5 keV. Tutte le sorgenti furono poi identificate nel corso di molti anni programmando campagne osservative ai vari telescopi ottici del mondo sia nell'emisfero Nord che in quello Sud. Furono anche effettuate osservazioni a 6 cm al VLA per le sorgenti extragalattiche, sia per essere certi della bontà dell'identificazione (l'errore di posizione di Einstein era di circa un minuto d'arco) sia per studiare le proprietà radio-X dei vari campioni. La EMSS ha catalogato diverse classi di oggetti dando un contributo fondamentale agli studi sui quasar, sugli ammassi di galassie, sulle galassie con formazione stellare e su altre tipologie di oggetti (incluse stelle attive e binarie). Ma le scoperte più interessanti vennero dallo studio degli ammassi di galassie. Oltre all'evoluzione della funzione di luminosità X (meno ammassi di alta luminosità X in passato, Gioia *et al.* 1990b) in accordo con una formazione dell'Universo a struttura gerarchica, furono

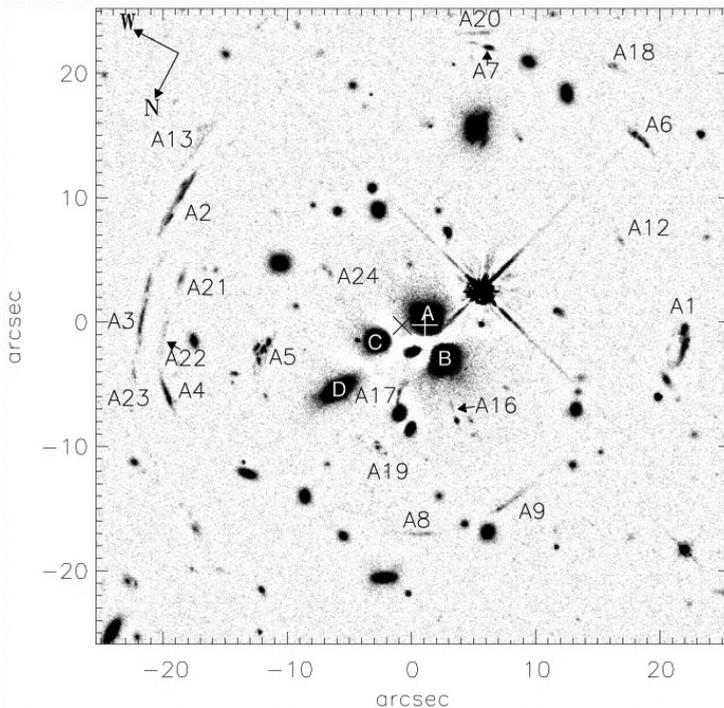


Figure 8.1 Immagine dello Hubble Space Telescope dell'ammasso di galassie MS0440+0204 selezionato in X dalla EMSS. I sistemi di archi gravitazionali presenti nell'immagine sono in realtà immagini amplificate di galassie lontane che si trovano dietro gli ammassi (Gioia *et al.* 1998). © AAS. Riprodotta con il permesso.

anche trovati un gran numero di archi o lenti gravitazionali negli ammassi selezionati in X (Gioia e Luppino 1994). Tutti gli ammassi furono in seguito osservati al VLA per costruire la Funzione di Luminosità bivariata relativa alla potenza radio e alla luminosità X e per studiare la relazione tra la luminosità X e la temperatura degli ammassi. Questi ultimi studi furono effettuati usando immagini di archivio del satellite Chandra e fecero parte in seguito della tesi di dottorato di Marica Branchesi. Inoltre, la EMSS mostrò che i nuclei attivi delle galassie costituiscono la parte dominante degli oggetti emittenti in banda X e che essi contribuiscono a circa l'80% dell'emissione del fondo X (Maccacaro, Gioia e Stocke 1984).

9. Struttura a grande scala

Negli anni Settanta diversi studi misero in luce il fatto che la distribuzione delle galassie nell'Universo vicino era tutt'altro che omogenea. Le galassie sembravano concentrate in superammassi, cioè in zone di cielo in cui si trovavano ammassi di galassie connessi da ponti e filamenti di galassie che delimitavano zone sottodense o addirittura vuote.

Con l'entrata in funzione del telescopio dell'Università di Bologna di 1.5 metri a Loiano si ebbe l'opportunità di compiere misure di velocità radiale di galassie fino alle magnitudini 14-15. Gli sforzi si concentrarono soprattutto nella regione del Superammasso di Perseo ottenendo una mappatura della regione che mostrava definitivamente l'esistenza di un filamento esteso almeno 100 Mpc nel polo galattico sud (Focardi, Marano e Vettolani 1984). Lo sforzo osservativo per raccogliere i redshift di galassie uno a uno era notevole ed era imperativo non sprecare tempo di osservazione. Per questo motivo, oltre all'ovvia motivazione scientifica di effettuare una mappatura della struttura del cielo a grande scala, G. Palumbo, G. Tanzella-Nitti e G. Vettolani (1983) compilarono, alla fine degli anni Settanta, un catalogo contenente tutti i redshift di galassie (8250) pubblicati fino al dicembre 1980.

Negli anni Ottanta la comunità scientifica aveva ormai accettato il nuovo paradigma che le galassie sono distribuite nell'Universo in ammassi e superammassi che circondano regioni vuote. Pertanto cominciarono ad apparire all'orizzonte nuovi campi di interesse collegati alla struttura a grande scala dell'Universo, ad esempio lo studio non solo della geometria, ma anche delle proprietà dinamiche e di clustering (funzioni di correlazione e loro evoluzione) e lo studio dell'evoluzione degli ammassi di galassie e delle galassie nei superammassi in funzione del tempo cosmico. Queste nuove tematiche richiedevano la misura di redshift di grandi campioni di galassie in vaste zone del cielo.

In questi nuovi ambiti di ricerca si colloca un catalogo "all-sky" di ammassi con redshift misurati e stimati dalle proprietà fotometriche. Fra i risultati principali ci furono la scoperta e lo studio delle caratteristiche fisiche della Shapley Concentration (Scaramella *et al.* 1989) e lo studio dei moti di grande scala nella direzione del Grande

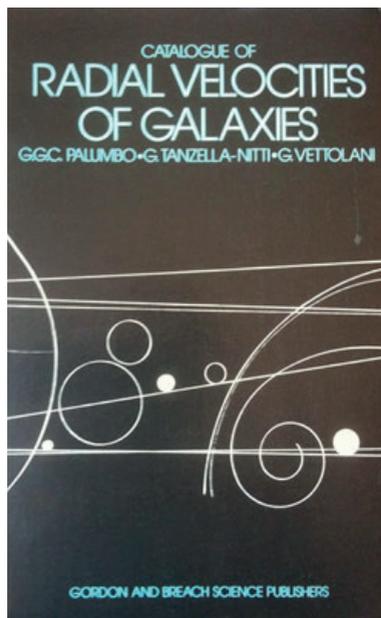


Figura 9.1 Copertina del catalogo contenente tutti i redshift di galassie (8250) pubblicati fino a dicembre 1980 (Gordon e Breach Science publishers).

Attrattore, la direzione verso cui l'Universo Locale si muove come rivelato dalle misure di anisotropia di dipolo del fondo cosmico.

Nel 1985 un gruppo che consisteva soprattutto di ricercatori dell'IRA e dell'Observatoire de Meudon in Francia propose la survey ESP (ESO Slice Project, P.I. Vettolani) come "long term program" che fu approvato nel 1991 garantendo quindi un congruo numero di notti per effettuare la survey. La survey ESP copre una regione di circa 23 gradi quadrati di cielo in una regione vicina al Polo Galattico Sud e misurò i redshift dell'85% delle galassie più brillanti della magnitudine $b = 19.4$ (che rappresentò un livello di completezza piuttosto alto per quel tempo) per un totale di circa 3400 galassie (Vettolani *et al.* 1997). Il risultato forse più importante di ESP fu la determinazione molto accurata della funzione di luminosità delle galassie (Zucca *et al.* 1997) che indicava la presenza di una sottodensità importante nel numero di galassie nell'Universo vicino.

Nella seconda metà degli anni Novanta, diventò sempre più chiaro che per affrontare il problema dell'evoluzione delle proprietà fisiche della distribuzione spaziale delle galassie e dell'evoluzione temporale delle loro popolazioni stellari occorreva estendere in area e profondità (magnitudine limite) le survey di redshift. Era cioè necessaria una nuova generazione di strumenti (spettrografi) di maggiore efficienza e capaci di compiere misure di molti oggetti in aree sufficientemente grandi (+ 30 primi di diametro) ovvero di alto "multiplex gain". Nell'ambito della nuova strumentazione per il Very Large Telescope (VLT) Delabre, D'Odorico e Vettolani (1994) proposero una camera e uno spettrografo multifenditura a bassa risoluzione nel visibile, specializzato per survey di redshift di galassie deboli (magnitudine 22 in banda I).



Figura 9.2 Lo spettrografo VIMOS montato sul fuoco Nasmyth del telescopio UT3 Melipal del VLT. Crediti per la foto European Southern Observatory ESO/G. Sciarretta.

Lo spettrografo VIMOS fu costruito sia per massimizzare il numero di galassie osservabili spettroscopicamente in una singola osservazione su 4 canali che coprono l'intero campo di vista del fuoco Nasmyth del VLT ($4 \times 7 \times 8$ minuti di arco), sia per ottenere immagini insieme agli spettri. I numeri in gioco per la spettroscopia vanno da 1000 oggetti per spettroscopia a bassa risoluzione (tipica per la misura dei redshift) fino a 400 oggetti per spettroscopia in media risoluzione (per ottenere anche qualche informazione dinamica). VIMOS fu proposto a ESO da un consorzio che comprendeva, oltre all'IRA, l'IFCTR CNR a Milano e gli Osservatori di Capodimonte, Bologna e Brera e alcuni istituti francesi guidati dal LAM di Marsiglia.

Il consorzio venne compensato da ESO con l'assegnazione di circa 100 notti di osservazione, utilizzate negli anni dopo il 2000 per la survey VIMOS che contribuì a cambiare il panorama della evoluzione delle galassie e delle strutture cosmiche con l'osservazione di un campione di circa 10000 galassie fino a grandi distanze, cioè fino a $z = 5$ (Le Fèvre *et al.* 2003).

10. Il Centro di Calcolo

Il primo calcolatore non meccanico dell'IRA fu un Olivetti Logos che permetteva con la sua elettronica calcoli con le quattro operazioni e alcune semplici funzioni matematiche. Era il 1972.

Per la lettura delle registrazioni della Croce del Nord e per i programmi di riduzione dati veniva utilizzato il centro calcolo del Comitato Nazionale Energia Nucleare (CNEN) che negli anni Sessanta disponeva del più grande calcolatore scientifico italiano. Il CNEN si trovava nei pressi di Porta Mazzini (Bologna). Con l'entrata del Laboratorio di Radioastronomia nel CNR nel 1970 non fu più possibile utilizzare questo centro calcolo e si dovette usare il calcolatore IBM 360 del CNR al Centro Nazionale Universitario di Calcolo Elettronico (CNUCE) di Pisa.

Quando si iniziarono a usare programmi software per la riduzione di dati interferometrici furono acquisiti tre terminali, di cui uno, molto richiesto, costituito da una telescrivente collegata telefonicamente col CNUCE che trasmetteva alla velocità di 300 caratteri al secondo (2.4 Kbit/s) e altri due che trasmettevano a una velocità di 110 caratteri al secondo. Agli operatori del centro calcolo di Pisa veniva richiesto di montare i nastri magnetici e di recuperare le stampe con i risultati dell'elaborazione. Non esisteva la rete internet. Per trasmettere schede, nastri e stampe tra Bologna e Pisa ci si serviva di corrieri che trasportavano avanti e indietro capaci cassette di legno contenenti il preziosissimo materiale. Veniva chiamata "trasmissione a banda larga". Si dovevano attendere tre giorni per conoscere il risultato dell'analisi dati.

Dopo qualche tempo, venne recuperata una stampante con annesso lettore di schede perforate che venne collegata col CNUCE. La stampante era enorme. Occupava un'intera stanza e permetteva di inviare i programmi scritti su schede perforate e di ottenere dopo qualche ora la stampa dei risultati. Con i terminali più veloci, 4.8 Kbit/s, si potevano ottenere le "stampe grafiche" composte da numeri che corrispondevano ai valori dei pixel dell'immagine permettendo di vedere i risultati... quasi subito. Sullo schermo del terminale appariva una porzione della mappa che poi poteva essere stampata, quindi



Figura 10.1 Le schede perforate venivano inviate con corriere da Bologna al Centro Nazionale Universitario di Calcolo Elettronico (CNUCE) di Pisa. I risultati dell’elaborazione percorrevano la strada inversa. Crediti: INAF-IRA.

un’altra porzione... e così via fino a ottenere l’immagine completa. Occorreva diverso tempo per completare la stampa della mappa della radiosorgente. A volte si interrompeva la connessione col calcolatore e bisognava ricominciare il processo di stampa. La trasmissione dei dati era piuttosto lenta e l’attesa davanti al terminale veramente noiosa. Per ovviare, i tecnici costruirono, su idea di A. Ficarra, un “dito meccanico” temporizzato che premeva il tasto di stampa sul terminale a intervalli corrispondenti al tempo impiegato dall’immagine, una sequenza di numeri, a formarsi sullo schermo del terminale. Per l’epoca un enorme progresso. Un aspetto curioso era che l’avanzamento dei fogli di stampa dell’enorme stampante veniva regolato da una strisciolina di carta perforata che si deteriorava di frequente e veniva sostituita da un’altra fatta a mano.

Il primo centro calcolo IRA prese forma nel 1981 con l’acquisto di un calcolatore VAX 11/780 della DIGITAL, un’azienda americana. La CPU disponeva di una capacità di calcolo di 1 MIPS, una memoria centrale RAM da 512 Kbyte e una di massa, cioè il disco, con capacità di 64 Mbyte che conteneva il sistema operativo, i programmi e i dati degli utenti. Al calcolatore erano collegati 5 terminali VT100 con velocità di 9.6 Kbit/s e una unità a nastro. Ogni nastro aveva una capacità di 20 Mbyte. Il centro calcolo era ospitato in via Irnerio 46, nelle cantine dell’Istituto di Fisica dell’Università di Bologna, e occupava una sala di circa 25 mq. Il costo di acquisto fu notevole, intorno ai 300 milioni di lire (circa 650000 euro attuali secondo l’ISTAT). In seguito, furono acquistati anche un paio di terminali grafici VT125.

La disponibilità di terminali portò a un notevole aumento dell’utenza che aveva in breve tempo imparato a usare il nuovo computer nettamente più semplice dell’IBM 360 di Pisa. Fu necessario decidere di prenotare l’uso del calcolatore compresa la notte e i giorni festivi. Particolarmente critica risultava la “memoria di massa” costituita dal disco removibile ospitato in un lettore delle dimensioni di una lavatrice. Per rimediare

alla scarsità di spazio ci si vide costretti a comprare un secondo disco su cui furono installati un altro sistema operativo e un nuovo programma portato dagli USA da C. e R. Fanti, AIPS. AIPS è l'acronimo di Astronomical Image Processing System, un pacchetto software sviluppato per ridurre e analizzare dati acquisiti con il Very Large Array. Sviluppato dal NRAO nel 1978, è stato utilizzato per diverse decine di anni in tutto il mondo per l'analisi dei dati interferometrici ed è tuttora in uso anche se nel 2011, con l'avvento di ALMA, il pacchetto denominato CASA (Common Astronomy Software Application) è diventato lo strumento ufficiale per la riduzione di questo tipo di dati.

Il disco con AIPS poteva essere sostituito al disco utenti nei fine settimana e di notte per permettere l'uso di questo nuovo software e poter quindi analizzare i dati ottenuti con il VLA, e successivamente anche con WSRT e con il VLBI.

L'acquisto di un secondo lettore di dischi permise di avere finalmente AIPS in linea anche nei giorni feriali. Ben presto ci si rese conto che l'elaborazione di immagini radio con AIPS richiedeva troppe ore di calcolo su un calcolatore che ora ospitava anche i colleghi di altri istituti del CNR e dell'Osservatorio Astronomico di Bologna. Si trovarono quindi le risorse, circa 110 M di lire, per acquistare un Array Processor, un coprocessore matematico vettoriale, che migliorò di circa 20-30 volte la velocità di calcolo di

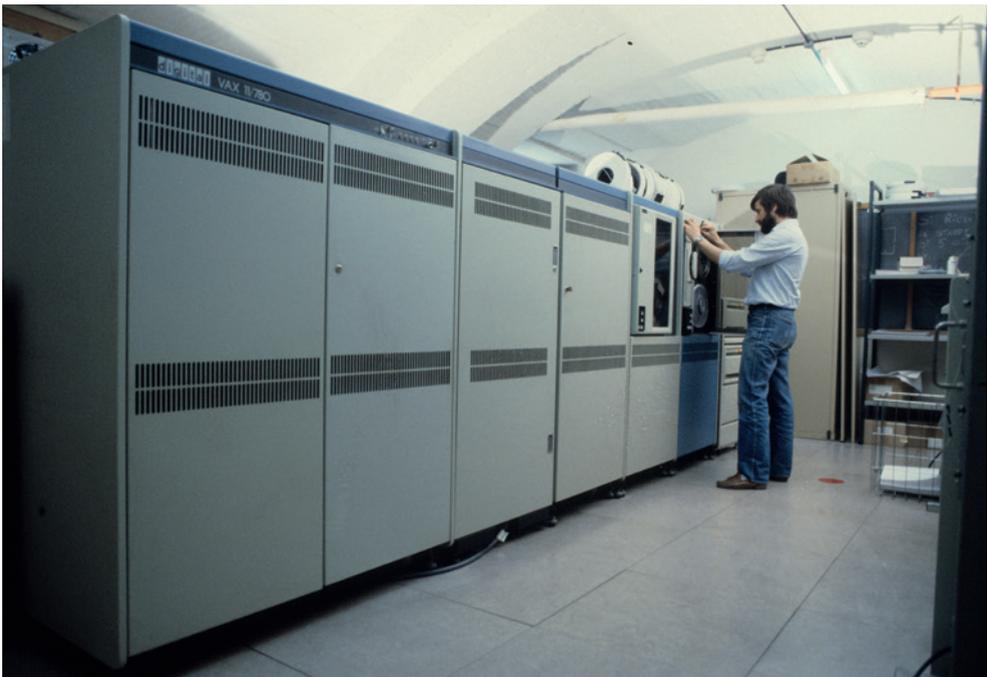


Figura 10.2 VAX 11/780 della Digital acquistato nel 1981. Fu il primo calcolatore del Centro Calcolo dell'IRA. Mauro Nanni mentre monta un nastro. Crediti: INAF-IRA.

AIPS. Venne anche acquistato il primo plotter elettrostatico Versatec che permetteva di stampare immagini in bianco e nero in sostituzione dei tabulati che rappresentavano le sorgenti radio come una griglia di numeri.

Il CNR incaricò l'IRA della gestione del centro calcolo, al quale facevano capo ricercatori di cinque istituti del CNR, dell'Istituto di Astronomia dell'Università di Bologna, dell'Osservatorio Astrofisico di Arcetri di Firenze e dell'Istituto di Fisica Nucleare (INFN). IRA mise a disposizione del centro calcolo una unità di personale laureato e un tecnico, nelle persone di A. Ficarra e M. Nanni. Si legge nel Rapporto Interno IRA 62/81 (Ficarra e Nanni 1981): «Lo scopo di chi gestisce il centro è di giungere gradualmente all'impiego dell'elaboratore nel pieno delle sue possibilità e cioè, non solo come puro esecutore di calcoli, ma anche come un sistema che acquisisca dati dagli strumenti, governi processi in tempo-reale, permetta l'elaborazione interattiva di immagini a colori ecc... La tendenza sarà quella di potenziare l'elaborazione con tutto il software che è possibile trasferire da altri centri, privilegiando ovviamente le applicazioni che riguardano il campo della astronomia ottica e radio, ma anche cercando di dotare il centro di tutto ciò che può essere utile alla comunità scientifica in generale».

Fu un vero balzo in avanti, un primo passo verso una gestione coordinata del calcolo che diede un forte impulso alla ricerca dell'IRA e rappresentò la base di uno sviluppo nel settore che qualificò in seguito l'IRA nella ricerca astronomica italiana.

Consci delle potenzialità del centro calcolo, venne chiesto al CNR di incrementare il personale addetto con due "collaboratori tecnico-professionali" per gestire il sistema operativo del VAX, due "assistenti tecnico-professionali" come operatori, un amministrativo per gestire conti, utenti, ordini e fatturazioni. Le speranze di poter dotare il centro del personale previsto si scontrarono contro il blocco delle assunzioni in atto al CNR in quegli anni. Diventò indispensabile che gli utenti si adeguassero a una forma di "autogestione" del sistema per il potenziamento delle librerie scientifiche e delle mansioni tecnico-burocratiche. Occorreva mantenere i contatti con altri centri di analisi di dati radioastronomici prevalentemente esteri, e provvedere all'installazione del software che veniva concesso in uso. Le difficoltà politiche e burocratiche della sede centrale del CNR per quanto riguardava l'assunzione del personale necessario e i ritardi negli acquisti vanificavano ogni tentativo di programmazione delle linee di sviluppo del centro calcolo IRA. Nonostante queste difficoltà si riuscì a ottenere il riconoscimento quale "centro erogatore di calcolo per il CNR dell'Emilia Romagna". Questo comportò l'introduzione di un tariffario per l'utilizzo delle risorse di calcolo e un significativo aumento dell'utenza costituita da ricercatori degli Istituti CNR della regione. A metà degli anni Ottanta il centro calcolo poteva contare circa 250 utenti fissi. Una delle ragioni che limitò l'investimento del CNR sul centro calcolo dell'IRA di Bologna era la vicinanza con CINECA, già allora considerato il maggior centro calcolo italiano, e a cui si rivolgeva parte dell'utenza CNR.

In quegli anni l'accesso alle risorse di calcolo poteva avvenire utilizzando i terminali locali oppure collegandosi via modem (4.8-9.6 Kbit/s). Diventando ufficialmente il centro calcolo IRA un "centro erogatore" venne inserito nella rete di cui il CNUCE di Pisa faceva

da centro stella, e con il progetto OSIRIDE (OSI su Rete Italiana Dati Eterogenea) si iniziarono a muovere i primi incerti passi alla scoperta delle reti di trasmissione dati.

Mentre proseguiva il trasferimento sul VAX/VMS di programmi radioastronomici che avevano girato su IBM al CNUCE (“Riduzione dei dati ottenuti con la Croce del Nord”: Nanni 1981; “Computer programs for reduction of VLBI data”: Fanti C. 1981), o provenienti da altri istituti radioastronomici (“Libreria NOD3 del MPIfR per ridurre dati osservativi del radiotelescopio di Effelsberg: Tomasi 1981; “Libreria di Westerbork per osservazioni brevi”: Feretti *et al.* 1981), vennero implementati programmi per interfacciare con AIPS dati VLBI, MERLIN e WSRT (Stirpe 1984). Crebbero anche le applicazioni che venivano portate sul VAX da colleghi dell’Università, dell’Osservatorio Astronomico e da altri istituti del CNR.

Nei primi anni Ottanta le tecniche di visualizzazione dei dati stavano muovendo i primi passi. I grafici dei terminali monocromatici erano un notevole progresso se paragonati ai grafici “a numeri e crocette” che si potevano produrre sui tabulati delle stampanti. Assieme al VAX era stato ordinato anche un “terminale pittorico Aydin 5216” che poteva rappresentare 256 colori su un monitor 1024 x 1024 pixel (un Megapixel) che costò 80.000 dollari. La realizzazione di un driver in assembler per far funzionare il monitor con



Figura 10.3 Carla Fanti mentre lavora al terminale pittorico IVAS, un importante strumento per l’analisi delle mappe radioastronomiche. Crediti: INAF-IRA.

il programma AIPS richiese molti mesi di lavoro, ma alla fine costituì il più importante strumento per l'analisi delle mappe radioastronomiche. In seguito, fu acquistato un IVAS, che aveva caratteristiche simili all'Aydin ma era decisamente più efficiente.

Con la realizzazione di nuovi e più potenti radiotelescopi cresceva il volume dei dati prodotti e con questo l'esigenza di strumenti più veloci per il calcolo delle FFT indispensabili per l'analisi e la sintesi delle immagini. A questo si andava ad aggiungere il generale aumento del numero degli utenti del centro calcolo e in particolare dei colleghi dell'Istituto di Geologia Marina che stavano sviluppando software per lo studio dei fondali basato su FFT. Un efficiente calcolo delle FFT era richiesto anche per l'analisi sismica necessaria per la ricerca dei siti petroliferi e in questo si era specializzata la CONVEX, una azienda del Texas che produceva computer dotati di processori vettoriali.

La concomitanza delle esigenze dell'IRA e dell'Istituto di Geologia Marina permisero di fare una richiesta congiunta ottenendo dal CNR un finanziamento di 1 miliardo di lire (corrispondenti a 1,1 M di euro attuali secondo l'ISTAT) con cui venne acquistato nel 1989 un calcolatore CONVEX C210, che era la prima macchina Unix del centro calcolo. Il CONVEX disponeva di una capacità di calcolo da 10 MIPS, di una memoria centrale da 128 Mbyte e di una di massa da 4 Gbyte. I due calcolatori, VAX e CONVEX, trovarono la loro collocazione negli angusti sotterranei dell'Istituto di Fisica dell'Università di Bologna.

Il centro calcolo svolgeva la funzione di "centro erogatore di servizi di calcolo specializzato nella elaborazione di segnali e immagini". Era frequentato anche da colleghi di altre discipline che potevano così valutare se e come le tecniche di elaborazione di immagini disponibili rispondevano alle loro esigenze.

Nei primi anni Ottanta, nell'ambito del Progetto Astronet promosso dal Gruppo Nazionale Astronomia del CNR, fu sviluppato all'IRA, dal gruppo "Data base e Documentazione", un software chiamato "Distributed Information Retrieval for Astronomical Files" (DIRA). Esso gestiva i cataloghi astronomici, estraeva informazioni, le rappresentava graficamente e costruiva una struttura data base di utente. Nuove esigenze sia di ricerca che di architettura di calcolo imposero la riscrittura del software. Nacque DIRA2 che nel 1995 gestiva un database di 270 cataloghi, per un totale di 27 milioni di record, accessibile attraverso il web. Il software DIRA2 fu adottato dalla comunità astronomica nazionale e internazionale e per molti anni costituì un importante strumento per la ricerca scientifica (Nanni e Tinarelli 1993).

A fine anni Ottanta, il CNR, assieme a INFN, ENEA e Università, stava realizzando la rete nazionale della ricerca GARR (Gruppo Armonizzazione Reti della Ricerca). Il centro calcolo dell'IRA, dopo l'esperienza del collegamento tra i centri erogatori che utilizzava una tecnologia proprietaria IBM (EARN/BITNET), aveva poi scelto per collegarsi al GARR una tecnologia proprietaria Digital (DECNET) utilizzata dall'INFN e da Astronet. Erano gli anni della "guerra dei protocolli" in cui si confrontavano EARN e DECNET, sostenute dalle rispettive aziende, ma anche ISO-X25, sostenuto dalla unione internazionale telecomunicazioni, e TCP/IP nata nei laboratori della difesa americana.

na (DARPA). La “guerra” rischiava di creare reti separate che avrebbero dialogato con grande difficoltà. Fu però nel corso di pochi anni che la versatilità del TCP/IP ebbe la meglio e internet è diventata “la rete” come ora la conosciamo.

Il centro calcolo dell’IRA partecipò allo sviluppo della rete del CNR a livello nazionale e locale. Promosse la costituzione della “Commissione informatica di Area” che avrebbe elaborato il progetto e gestito la rete informatica della nuova “Area della Ricerca di Bologna”, partecipando in seguito alla realizzazione della rete regionale Lepida e ottenendo nel 2003 un collegamento a 10 Gbit/s del radiotelescopio di Medicina.

Con il trasferimento dell’Istituto presso l’Area della Ricerca del CNR nel 1993, il centro calcolo ebbe a disposizione una sala macchina di circa 100 mq, un sistema di condizionamento adeguato e un impianto di alimentazione garantita da UPS e gruppi di continuità. Il trasferimento riguardò il CONVEX, un VAX-750 che aveva sostituito il VAX-780 e alcune work-station Unix.

Nel corso degli anni, il centro calcolo dell’IRA ha ospitato e gestito le macchine dei servizi di area, server Dec/Alpha e Silicon Graphic acquistati in compartecipazione con altri Istituti, oltre agli apparati della rete FDDI (100 Mbit/s) del campus e al router per il collegamento alla rete GARR (2 Mbit/s). Nel 1992 si era iniziato a sperimentare sui pc dell’Istituto un sistema operativo simile a Unix, facile da installare e da connettere sulla rete internet, creato per gioco da uno studente norvegese. Il sistema operativo Linux avrebbe avuto un ruolo importantissimo nello sviluppo del centro calcolo dell’IRA permettendo di realizzare potenti ed economici workstation e server usando le stesse architetture Intel su cui giravano i prodotti Microsoft.

Con il finanziamento del Comitato Tecnologie Informatiche del CNR, nel 1995 l’IRA acquistò la Digitized Sky Survey (DSS, NASA) su 102 CDROM che contenevano le immagini fotografiche di tutto il cielo. Queste immagini furono rese disponibili alla comunità via web utilizzando un Juke-box di CDROM per il quale fu scritto un software specifico, SKYEYE, una delle prime applicazioni in Italia in cui uno strumento hardware veniva pilotato via web. Quando i grandi Data Center (ESO, NASA, Strasbourg Astronomical Data Centre) resero disponibili alla comunità internazionale i servizi di accesso ai cataloghi e agli archivi di immagini attraverso il web e le reti veloci, L. Padrielli e M. Nanni si chiesero se fosse il caso di investire in questo settore per cercare di rimanere concorrenziali. La battaglia sarebbe stata impari e decisero di abbandonare DIRA2 e SKYEYE, che continuarono a essere utilizzati per un’altra decina d’anni.

Nel 2000, grazie allo sviluppo della rete, il centro calcolo si andava organizzando su una architettura client/server, dove le applicazioni software e i dati venivano messi a disposizione su dischi dei server centrali (30 Gby di spazio condiviso) mentre per l’analisi dei dati radioastronomici erano a disposizione 50 workstation Linux ognuna delle quali aveva una capacità (100 MIPS, 256MBy RAM, monitor da 1200 x 1024 pixel 4M colori) ben superiore al Convex acquistato a fine anni Ottanta.



Figura 10.4 Il Juke-box di CDROM che conteneva i 102 CDROOM della Digitized Sky Survey (DSS, NASA) con le immagini fotografiche di tutto il cielo. Queste immagini furono rese disponibili alla comunità via web utilizzando un software specifico, SKYEYE, una delle prime applicazioni in Italia in cui uno strumento hardware veniva pilotato via web (1995). Crediti: INAF-IRA.



Figura 10.5 La Sala Macchine del Centro Calcolo dell'IRA negli edifici dell'Area di Ricerca del CNR alla fine degli anni Novanta. Crediti: INAF-IRA.

Note conclusive

La nascita della Radioastronomia in Italia avvenne in ambito universitario. Persone lungimiranti e competenti intuirono le grandi potenzialità di questo settore della ricerca astronomica e vi si dedicarono con coinvolgente entusiasmo. Il gruppo universitario originario si andò via via allargando col crescere delle necessità nella gestione dell'infrastruttura e dei nuovi ambiti di ricerca scientifica. Nel 1970 ci fu un forte passaggio istituzionale quando il CNR istituì il Laboratorio di Radioastronomia, come centro dello sviluppo della Radioastronomia italiana, a cui fu poi affidata la gestione della Croce del Nord.

Nel nuovo Laboratorio, divenuto poi Istituto di Radioastronomia, il collegamento con l'Università continuò a essere strettissimo. I docenti ufficialmente associati all'Istituto usufruirono sempre di un ufficio nella sede dell'IRA e di tutti i servizi necessari per svolgere una ricerca scientifica di alto livello.

L'IRA diventò uno dei luoghi primari dove gli studenti lavoravano a tesi di carattere astronomico. Aggettivo quest'ultimo, usato per evidenziare un aspetto importante ed estremamente arricchente nel modo di intendere il fare ricerca all'interno dell'IRA, quello della interdisciplinarietà. Le competenze dei ricercatori dalla banda radio si allargarono all'ottico, alla banda X, all'infrarosso, in una contaminazione di interessi che apriva le menti e generava ricerche di più ampia visione astrofisica. Lo stesso dicasi per il settore tecnologico dove la progettazione nel calcolo, nelle microonde, nell'elettromeccanica, nelle misure tempo-frequenza progredì parallelamente.

I ricercatori all'interno dell'IRA lavoravano motivati da un grande interesse per la ricerca che faceva sopportare le carenze di personale e finanziarie e gli appesantimenti burocratici del loro lavoro. Nonostante le diverse visioni su quali ricerche privilegiare, che spesso generavano discussioni, lo scopo comune dei ricercatori dell'IRA è sempre stato quello di affermare l'Istituto a livello nazionale e internazionale. Il ruolo in campo scientifico e il progredire dell'Istituto venivano considerati prioritari.

È doveroso rilevare che l'attività scientifica e tecnologica fu in grado di svilupparsi grazie al supporto del personale amministrativo e alla qualificata collaborazione del personale tecnico sempre disponibile ed efficiente.

Questa storia si ferma al 2000 ma ovviamente la storia dell'Istituto di Radioastronomia continua. Negli anni i membri dell'IRA hanno ampliato gli ambiti di ricerca, le collaborazioni internazionali e la loro presenza in istituzioni internazionali e sono diventati punti di riferimento nella progettazione della futura strumentazione radioastronomica. Questa avventura iniziata a Medicina nella bassa padana all'inizio degli anni Sessanta continua con successo.

Lista degli acronimi

AIPS	Astronomical Image Processing System
ALMA	Atacama Large Millimeter Array (ESO-USA-Japan)
ASI	Agenzia Spaziale Italiana
ATCA	Australia Telescope Compact Array
ATESP	AT ESO Slice Project
BBC	Base Band Converter
B2	Bologna catalogo di radiosorgenti 2
B3	Bologna catalogo di radiosorgenti 3
CAISMI	Centro Astronomia Infrarossa e Studio Materia Interstellare
CASA	Common Astronomy Software Application
CfA	Center for Astrophysics, Cambridge (USA)
Caltech	California Institute of Technology (USA)
CERN	Conseil Europeen pour la Recherche Nucleaire
CNEN	Consiglio Nazionale Energia Nucleare poi ENEA
CNUCE	Centro Nazionale Universitario Calcolo Elettronico
CNR	Consiglio Nazionale delle Ricerche
CRA	Consiglio per le Ricerche Astronomiche
CSS	Compact Steep Spectrum Radio Sources
CSIRO	Commonwealth Organization Scientific Industrial Organization (Australia)
DIRA	Distributed Information Retrieval from Astronomical Files
ENEA	Ente Nazionale Energie Alternative

ESA	European Space Agency
ESO	European Southern Observatory
ESP	ESO Slice Project
EVGA	European VLBI for Geodesy and Astrometry
EVN	European VLBI Network
EVNPC	EVN Program Committee
EW	Est-Ovest
FET	Field Effect Transistor
FFT	Fast Fourier Transform
FRI	Radiogalassie di tipo I secondo Fanaroff & Riley (1974)
FRII	Radiogalassie di tipo II secondo Fanaroff & Riley (1974)
GIPSY	Groningen Imaging Processing System (Olanda)
GPS	GHz-Peaked Spectrum Radio Source
GPS	Global Positioning System
HALCA	Highly Advanced Laboratory for Communications and Astronomy
HEAO	High Energy Astronomical Observatory (USA)
HEMT	High Electron Mobility Transistor
HFP	High Frequency Peakers
HST	Hubble Space Telescope
IFSI	Istituto di Fisica dello Spazio Interplanetario
IAS	Istituto di Astrofisica Spaziale
IAU	International Astronomical Union
IFCTR	Istituto Fisica Cosmica e Tecnologie Relative (CNR)
INFN	Istituto Nazionale Fisica Nucleare
IRA	Istituto di RadioAstronomia
IRIS	Incorporated Research Institutions for Seismology
ITESRE	Istituto Tecnologie e Studio Radiazione Extraterrestre
ITIS	Istituto di Tecnologie Informatiche Spaziali
IVS	International VLBI Service
JAXA	Japan Aerospace eXploration Agency
LAM	Laboratoire Astronomique Marseille (Francia)
LFV	Low Frequency Variables
MERLIN	Multi-Element Radio Linked Interferometer Network (UK)
MIT	Massachusetts Institute of Tecnology (USA)

MOST	Molonglo Observatory Synthesis Telescope (Australia)
MPE	Max-Planck-Institute für Extraterretrische physik (Germania)
MPI	Ministero Pubblica Istruzione
MPIfR	Max-Planck-Institute für Radioastronomie (Germania)
MSS	Medium Sensitivity Survey
MURST	Ministero della Università e Ricerca Scientifica e Tecnologica
NASA	National Areonautics and Space Administration (USA)
NAT	Narrow Angle Tail
NRAO	National Radio Astronomy Observatory (USA)
NS	Nord-Sud
NVSS	NRAO VLA Sky Survey
OVRO	Owens Valley Radio Observatory (USA)
PSS	Palomar Sky Survey
QSO	Quasi Stellar Object
QSS	Quasi Stellar Source
ROSAT	ROentgenSATellit (Germania)
ROUB	Radio Osservatorio Università di Bologna
SAIT	Società Astronomica ITaliana
SIF	Società Italiana di Fisica
SETI	Search Extra-Terrestrial Intelligence
SN	Supernova
SRT	Sardinia Radio Telescope
TIRGO	Telescopio Infrarosso Gornergrat Observatory
UT	Universal Time
VIMOS	Visual Imager and Multi-Object Spectrometer (ESO)
VLA	Very Large Array (USA)
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
VLT	Very Large Telescope (ESO)
VSOP	VLBI Space Observatory Programme
WAT	Wide Angle Tail
WSRT	Westerbork Synthesis Radio Telescope (Olanda)
YERAC	Young European Radio Astronomers Conference
4C	Fourth Cambridge Catalogue

Riferimenti bibliografici

- Auriemma C., Perola G.C., Ekers R.D., Fanti R., Lari C., Jaffe W.J., Ulrich M.H., 1977, *A&A*, 57, 41.
- Baldwin J.E., 1982, in *Extragalactic radio sources*, Heeschen D.S. & Wade, C.M. Eds, Dordrecht, D. Reidel Publishing Co., p. 21.
- Ballarati B., Feretti L., Ficarra A., Giovannini G., Nanni M., Olori M.C., Gavazzi G., 1981, *A&A*, 100, 323.
- Bare C., Clark B.G., Kellermann K.I., Cohen M.H., Jauncey D.L., 1967, *Sci*, 157, 189.
- Bergamini R., Londrillo P., Setti G., 1967, *NCimB*, 52, 495.
- Bergamini R., Braccisi A., Colla G. *et al.*, 1973, *A&A*, 23, 195.
- Bicknell G.V., de Ruiter H.R., Fanti R., Morganti R., Parma P., 1990, *ApJ*, 354, 98.
- Bolli P., Natale V., Pelosi G., Tofani G., 2000, CAISMI Technical report.
- Bondi H., Gold T., 1948, *MNRAS*, 108, 252.
- Bondi M., Padrielli L., Gregorini L., Mantovani F., Shapirovskaya N., Spangler S.R., 1994, *A&A*, 287, 3.
- Bondi M., Padrielli L., Fanti R., Ficarra A., Gregorini L., Mantovani F., 1996a, *A&AS*, 120, 89.
- Bondi M., Padrielli L., Fanti R. *et al.*, 1996b, *A&A*, 308, 415.
- Bonsignori-Faondi S.R., Tomasi P., 1979, *A&A*, 77, 93.
- Bonsignori-Faondi S.R., Padrielli L., Montebugnoli S., Barbieri R., 1986, *A&A*, 166, 157.
- Braccisi A., Ceccarelli M., 1962, *NCim*, 23, 208.
- Braccisi A., Vespignani G., 1964, *NCim*, 31, 310.
- Braccisi A., Ceccarelli M., Fanti R. *et al.*, 1965, *NCimB*, 40, 267.
- Braccisi A., Fanti R., Giovannini C., Vespignani G., 1966a, *ApJ*, 143, 600.
- Braccisi A., Ceccarelli M., Fanti R., Giovannini G., Ficarra A., 1966b, *ApJ*, 144, 821.
- Braccisi A., Fanti-Giovannini C., Fanti R., Formiggini L., Vespignani G., 1967, *NCimB*, 52, 254.
- Braccisi A., Formiggini L., 1969, *A&A*, 3, 164.
- Braccisi A., Formiggini L., Gandolfi E., 1970, *A&A*, 5.
- Braccisi A., Ficarra A., Formiggini L. *et al.*, 1970, *A&A*, 6, 268.
- Braccisi A., Zitelli V., Bonoli F., Formiggini L., 1980, *A&A*, 85, 80.
- Brand J., Cesaroni R., Caselli P. *et al.*, 1994, *A&AS*, 103, 541.

- Brand J., Engels D., Winnberg A., 2018, in *Proceedings of IAU 336 "Astrophysical Masers: Unlocking the Mysteries of the Universe"* (eds. Tarchi, Reid, Castangia), p. 393.
- Brotten N.W., Locke J.L., Legg T.H., McLeish C.W., Richards R.S., 1967, *Nature*, 215, 38.
- Brown G.W., Carr T.D., Block W.F., 1968, *AJS*, 73, 6.
- Brunetti G., Feretti L., Giovannini G., Setti G., 1999, in *Diffuse thermal and relativistic plasma in galaxy clusters*, H. Böhringer, L. Feretti, P. Schücker Eds., MPE, Garching, Germany, p. 263.
- Callegari A., Gallerani A., Gandolfi E. *et al.*, 1978, Rapporto Interno IRA 25/78.
- Capetti A., de Ruiter H.R., Fanti R., Morganti R., Parma P., Ulrich M.-H., 2000, *A&A*, 362, 871.
- Ceccarelli M., 1976, *Viaggio Provvisorio*, Bologna, Zanichelli.
- Colla G., Fanti C., Ficarra A. *et al.*, 1970, *A&AS*, 1, 281.
- Colla G., Fanti C., Fanti R. *et al.*, 1971a, *AJ*, 76, 953.
- Colla G., Fanti C., Fanti R. *et al.*, 1971b, *AJ*, 76, 956.
- Colla G., Fanti C., Fanti R. *et al.*, 1972, *A&AS*, 7, 1.
- Colla G., Fanti C., Fanti R. *et al.*, 1973, *A&AS*, 11, 291.
- Colla G., Fanti C., Fanti R., Gioia I., Lari C., Lequeux J., Lucas R., Ulrich M.-H., 1975, *A&A*, 38, 209.
- Comoretto G., Gallerani A., 1985, Rapporto Interno IRA 81/85.
- Comoretto G., Rigotti C., Scappini F., 1988, Rapporto Interno IRA 115/88.
- Dallacasa D., Cotton W.D., Fanti C., Fanti R., Foley A.R., Schilizzi R.T., Spencer R.E., 1995, *A&A*, 299, 671.
- D'Amico N., Grueff G., Montebugnoli S. *et al.*, 1996, *ApJS*, 106, 611.
- Delabre B., D'Odorico S., Vettolani G., 1994, *SPIE* 2198, 414.
- De Ruiter H.R., Parma P., Fanti C., Fanti R., 1990, *A&A*, 227, 351.
- De Ruiter H.R. *et al.*, 1997, *A&A*, 319, 7.
- De Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A., 1964, *Reference catalogue of bright galaxies*, The University of Texas Press.
- Ekers R.D., Fanti R., Lari C., Parma P., 1978, *Nature*, 276, 588.
- Ekers R.D., Fanti R., Lari C., Parma P., 1981, *A&A*, 101, 194.
- Fanaroff B.L., Riley J.M., 1974, *MNRAS*, 167, P31.
- Fanti C., Fanti R., Londrillo P., Padrielli L., 1969, *A&A*, 2, 477.
- Fanti C., Fanti R., Ficarra A., Padrielli L., 1974a, *A&AS*, 18, 147.
- Fanti C., Felli M., Ficarra A., Salter C.J., Tofani G., Tomasi P., 1974b, *A&AS*, 16, 43.
- Fanti C., Fanti R., Ficarra A., Formiggini L., Giovannini G., Lari C., Padrielli L., 1975a, *A&AS*, 19, 143.
- Fanti C., Fanti R., Ficarra A., Formiggini L., Giovannini G., Lari C., Padrielli L., 1975b, *A&A*, 42, 365.
- Fanti C., Felli M., Panagia N., Tofani G., Tomasi P., 1975c, *A&A*, 45, 277.
- Fanti C., Fanti R., Formiggini L., Lari C., Padrielli L., 1977, *A&AS*, 28, 351.
- Fanti C., 1981, Rapporto Interno IRA 66/81.
- Fanti C., Mantovani F., Tomasi P., 1981, *A&AS*, 43, 1.
- Fanti C., Fanti R., Feretti L. *et al.*, 1982, *A&A*, 105, 200.
- Fanti C., Fanti R., Feretti L. *et al.*, 1983a, *A&AS*, 51, 179.
- Fanti C., Fanti R., Feretti L. *et al.*, 1983b, *A&AS*, 52, 411.
- Fanti C., Fanti R., Ficarra A. *et al.*, 1983c, *A&A*, 118, 171.
- Fanti C., Fanti R., Parma P., Schilizzi R.T., 1984, *IAUS*, 110, 57.

- Fanti C., Fanti R., Parma P., Schilizzi R.T., van Breugel W.J.M., 1985, *A&A*, 143, 292.
- Fanti C., Fanti R., O'Dea C.P., Schilizzi R.T. (editori), 1990, *Proceedings of the Dwingeloo Workshop on Compact Steep Spectrum and GHz Peaked Spectrum Radio Sources* (Istituto di Radioastronomia, Bologna), p. 215.
- Fanti C., Fanti R., Dallacasa D., Schilizzi R.T., Spencer R.E., Stanghellini C., 1995, *A&A*, 302, 317.
- Fanti R., Gioia I., Lari C., Lequeux J., Lucas R., 1973, *A&A*, 24, 69.
- Fanti R., Feretti L., Giovannini G., Padrielli L., 1979, *A&A*, 73, 40.
- Fanti R., Fanti C., Schilizzi R.T. *et al.*, 1990, *A&A*, 231, 333.
- Felli M., 1987, in *Uso multidisciplinare degli strumenti radioastronomici della stazione di Medicina*, Mantovani & Padrielli Eds., p. 45.
- Felli M., Tofani G., Fanti C., Tomasi P., 1977, *A&AS*, 27, 181.
- Feretti L. *et al.*, 1981, Rapporto Interno IRA 67/81.
- Feretti L., Giovannini G., Gregorini L., Parma P., Zamorani G., 1984, *A&A*, 139, 55.
- Feretti L., Spazzoli O., Gioia I.M., Giovannini G., Gregorini L., 1990, *A&A*, 233, 325.
- Feretti L., Perola G.C., Fanti R., 1992, *A&A*, 265, 9.
- Feretti L., Comoretto G., Giovannini G., Venturi T., Wehrle A.E., 1993, *ApJ*, 408, 446.
- Feretti L., Fanti R., Parma P., Massaglia S., Trussoni E., Brinkmann W., 1995a, *A&A*, 298, 699.
- Feretti L., Dallacasa D., Giovannini G., Tagliani A., 1995b, *A&A*, 302, 680.
- Ficarra A., Padrielli L., 1968, *NCimB*, 57, 478.
- Ficarra A., Gandolfi E., Perugini F., 1977, *Giornale di Astronomia*, 3, 115.
- Ficarra A., Nanni M., 1981, Rapporto Interno IRA 62/81.
- Ficarra A., Grueff G., Tomassetti G., 1985, *A&AS*, 59, 255.
- Focardi P., Marano B., Vettolani G., 1984, *A&A*, 36, 178.
- Fomalont E.B., Frey S., Paragi Z. *et al.*, 2000, *ApJS*, 131, 95.
- Formiggin L., Zitelli V., Bonoli F., Braccesi A., 1980, *A&AS*, 39, 129.
- Fusco-Femiano R., Dal Fiume D., Feretti L. *et al.*, 1999, *ApJ*, 513, L21.
- Gallerani A., Grueff G., Vigotti M., 1982, Rapporto Interno IRA 61bis/82.
- Gallerani A., Barbieri R., Maccaferri A., Tugnoli M., 1989, Rapporto Interno IRA 119/89.
- Gallerani A., Di Cesare S., Tugnoli M., 1991, Rapporto Interno IRA 151/91.
- Gentili G.G., 2002, in *SRT: the impact of large antennas on radioastronomy and space science*, SRT conference Proceedings, SIF Edizioni Scientifiche.
- Genzel R., Downes D., Schneps M.H. *et al.*, 1981, *ApJ*, 247, 1039.
- Giacconi R., Gursky H., Paolini F.R., Rossi B.B., 1962, *Phys.Rev.Lett.*, 9, 439.
- Giacconi R., Zamorani G., 1987, *ApJ*, 313, 20.
- Gioia I.M., Gregorini L., 1980, *A&AS*, 41, 329.
- Gioia I.M., Gregorini L., Klein U., 1982, *A&A*, 116, 164.
- Gioia I.M., Maccacaro T., Schild R.E. *et al.*, 1984, *ApJ*, 283, 495.
- Gioia I.M., Maccacaro T., Schild R.E. *et al.*, 1990a, *ApJS*, 72, 567.
- Gioia I.M., Henry J.P., Maccacaro T. *et al.*, 1990b, *ApJ*, 356, L35.
- Gioia I.M., Luppino G.A., 1994, *ApJS*, 94, 583.
- Gioia I.M., Shaya E.J., Le Fèvre O. *et al.*, 1998, *ApJ*, 497, 573.
- Giovannini G., Feretti L., Gregorini L., 1987, *A&AS*, 69, 171.
- Giovannini G., Feretti L., Gregorini L., Parma P., 1988, *A&A*, 199, 73.
- Giovannini G., Taylor G.B., Arbizzani E., Bondi M., Cotton W.D., Feretti L., Lara L., Venturi T., 1999, *ApJ*, 522, 101.

- Giovannini G., Tordi M., Feretti L., 1999, *NewA*, 4, 141.
- Giovannini G., Cotton W.D., Feretti L., Lara L., Venturi T., 2000, *Advances in Space Research*, 26, 693.
- Giovannini G., Cotton W.D., Feretti L., Lara L., Venturi T., 2001, *ApJ*, 552, 508.
- Gold T., 1967, *Sci*, 157, 302.
- Gower J.F.R., Scott P.F., Wills D., 1967, *MNARS*, 71, 49.
- Grueff G., Vigotti M., 1968, *ApL*, 2, 113.
- Gruppioni C., Zamorani G., de Ruiter H.R., 1997, *MNRAS*, 286, 470.
- Högbom, J.A., 1974, *A&AS*, 15, 417.
- Kus A.J., Wilkinson P.N., Booth R.S., 1981, *MNRAS*, 194, 527.
- Lahulla J.F., Merighi R., Vettolani G., Vigotti M., 1991, *A&AS*, 88, 525.
- Laing R.A., Parma P., de Ruiter H.R., Fanti R., 1999, *MNRAS*, 306, 513.
- Lari C., Perola G.C., 1978, in *The Large scale structure of the Universe*, M.S. Longair and J. Einasto Eds., Dordrecht, D. Reidel Publishing Co., p. 137.
- Le Fèvre O., Vettolani G., Maccagni D. *et al.*, 2003, *Messenger*, 111, 18.
- Leone F., Umata G., 1993, *A&A*, 268, 667.
- Leone F., Trigilio C., Umata G., 1994, *A&A*, 283, 908.
- Leone F., Umata G., Trigilio C., 1996, *A&A*, 310, 271.
- Maccacaro T., Gioia I.M., Stocke J.T., 1984, *ApJ*, 283, 486.
- Mack K.-H., Feretti L., Giovannini G., Klein U., 1993, *A&A*, 280, 63.
- Mantovani F., Nanni M., Salter C.J., Tomasi P., 1982a, *A&A*, 105, 176.
- Mantovani F., Nanni M., Tomasi P., Salter C.J., 1982b, *JApA*, 3, 335.
- Mantovani F., Reich W., Salter C.J., Tomasi P., 1985, *A&A*, 145, 50.
- Marano B. (a cura di), 2020, *Lo sviluppo dell'Astronomia a Bologna dal 1960 al 1990*, Bologna, Bononia University Press.
- Matveyenko L.I., Kostenko, V.I., Pauliny-Toth I.I.K. *et al.*, 1982, in *Very long baseline interferometry techniques*, Toulouse, Cepadues-Editions, p. 347.
- Moran J.M., Crowther P.P., Burke B.F. *et al.*, 1967, *Sci*, 157, 676.
- Morganti R., Fanti R., Gioia I.M., Harris D.E., Parma P., de Ruiter H., 1988, *A&A*, 189, 11.
- Murgia M., Fanti C., Fanti R., Gregorini L., Klein U., Mack K.-H., Vigotti M., 1999, *A&A*, 345, 769.
- Murgia M., Parma P., de Ruiter H.R., Bondi M., Ekers R.D., Fanti R., Fomalont E.B., 2001, *A&A*, 380, 102.
- Nanni M., 1981, *Rapporto Interno IRA 64/81*.
- Nanni M., Tinarelli F., 1993, *Mem. S.A.It.*, 64, 1053.
- Nan Ren-Dong, Schilizzi R.T., van Breugel W.J.M., Fanti C. *et al.*, 1991, *A&A*, 245, 449.
- Padrielli L., Romney J.D., Bartel N. *et al.*, 1986, *A&A*, 165, 53.
- Padrielli L., Eastman W., Gregorini L., Mantovani F., Spangler S., 1991, *A&A*, 249, 351.
- Palumbo G., Tazella-Nitti G., Vettolani G., 1983, *Catalogue of Radial Velocities of Galaxies*, Gordon & Breach, New York.
- Panagia N., Vettolani G., Boksenberg A. *et al.*, 1980, *MNRAS*, 192, 861.
- Panagia N., 1984, *ESA Fourth European IUE Conference*, ESASP, 218, p. 21.
- Parma P., Murgia M., Morganti R., Capetti A., de Ruiter H.R., Fanti R., 1999, *A&A*, 344, 7.
- Pilkington J.D.H., Scott P.F., 1965, *MNRAS*, 69, 183.
- Prandoni I., Gregorini L., Parma P. *et al.*, 2000, *A&AS*, 146, 31.
- Prandoni I., Gregorini L., Parma P. *et al.*, 2001a, *A&A*, 365, 392.

- Prandoni I., Gregorini L., Parma P. *et al.*, 2001b, *A&A*, 369, 787.
- Rogers A.E.E., Hinteregger H.F., Whitney A.R. *et al.*, 1974, *ApJ*, 193, 293.
- Romney J., Padrielli L., Bartel N., Weiler K., Ficarra A., Mantovani F. *et al.*, 1984, *A&A*, 135, 289.
- Salinari P., 1982, in *ESO Infrared Workshop*, Garching, European Southern Observatory, 1982, p. 45.
- Scaramella R., Baiesi Pillastrini G., Chincarini G., Vettolani G., Zamorani G., 1989, *Nature*, 338, 562.
- Scheuer P.A.G., 1974, *MNRAS*, 166, 513.
- Schilizzi R.T., Fanti C., Fanti R., Parma P., 1983, *A&A*, 126, 412.
- Scuderi S., Panagia N., Stanghellini C., Trigilio C., Umata G., 1998, *A&A*, 332, 251.
- Setti G., Woltjer L., 1973, in *IAU Symp. 55, X- and Gamma-Ray Astronomy*, H. Bradt & R. Giacconi Eds., Dordrecht: Reidel, p. 208.
- Setti G., 1979, in *Terrestrial and Space Techniques in Earthquake Prediction Research*, Ed. A. Vogel, Springer.
- Setti G., Woltjer L., 1979, *A&A*, 76, L1.
- Setti G., Woltjer L., 1989, *A&A*, 224, L21.
- Setti G., 2006, *MSAIS*, 10, 15.
- Sinigaglia G., 1966, *Nature*, 212, 601.
- Slysh V.I., Val'ts I.E., Migens V. *et al.*, 1999, *A&AS*, 134, 115.
- Spangler S., Fanti R., Gregorini L., Padrielli L., 1989, *A&A*, 209, 315.
- Stanghellini C., O'Dea C.P., Dallacasa D., Baum S.A., Fanti R., Fanti C., 1998, *A&A*, 131, 303.
- Stirpe M.G., 1984, *Rapporto Interno IRA 73/84*.
- Tomasi P., 1981, *Rapporto Interno IRA 65/81*.
- Tomasi P. 1988, in *Proceedings of the 6th Working Meeting*, Ed. P. Tomasi, Bologna: Istituto de Radioastronomia, 1988.
- Tomasi P., Rioja M.J., Sarti P., 1999, *New Astronomy Reviews*, 1999, 43, 603.
- Tomassetti G., 2016, *Rapporto Interno IRA 503-16*.
- Trigilio C., Umata G., Migens V., 1993, *MNRAS*, 260, 903.
- Trigilio C., Umata G., Catalano S., Rodonò M., Frasca A., 1993, *ASSL*, 183, 413.
- Trigilio C., Leto P., Umata G., 1998, *A&A*, 330, 1060.
- Umata G., Catalano S., Rodonò M., 1991, *A&A*, 249, 217.
- Umata G., Trigilio C., Hjellming R.M., Catalano S., Rodonò M., 1993, *A&A*, 267, 126.
- Umata G., Trigilio C., Tumino M., Catalano S., Rodonò M., 1995, *A&A*, 298, 143.
- Umata G., Trigilio C., Catalano S., 1998, *A&A*, 329, 1010.
- Van Breugel W., Nan R., Schilizzi R.T., Fanti C., Fanti R., 1988, *IAUS*, 129, 115.
- Van der Laan, H., 1966, *Nature*, 211, 1131.
- Venturi T., Bardelli S., Morganti R., Hunstead R.W., 1997a, *MNRAS*, 285, 898.
- Venturi T., Bardelli S., Morganti R., Hunstead R.W., 1997b, *ApL&C*, 36, 79.
- Venturi T., Bardelli S., Morganti R., Hunstead R.W., 1998, *MNRAS*, 298, 1113.
- Venturi T., Dallacasa D., Orfei A. *et al.*, 2001, *A&A*, 379, 755.
- Vettolani G., Zucca E., Zamorani G. *et al.*, 1997, *A&A*, 325, 954.
- Vigotti M., Grueff G., 1985, *Rapporto Interno IRA 76/85*.
- Vigotti M., Grueff G., Perley R., Clark B.G., Bridle A.H., 1989, *AJ*, 98, 419.
- Vigotti M., Merighi R., Vettolani G., La Hulla J.F., Lopez-Arroyo M., 1990, *A&AS*, 83, 205.
- Vigotti M., Vettolani G., Merighi R., Lahulla J.F., Pedani M., 1997, *A&AS*, 123, 219.

- Vigotti M., Gregorini L., Klein U., Mack K.-H., 1999, *A&AS*, 139, 359.
Weiler K.W., Panagia N., 1978, *A&A*, 70, 419.
Whitney A.R., Shapiro I.I., Rogers A.E.E. *et al.*, 1971, *Sci*, 173, 225.
Whitney A.R., Rogers A.E.E., Hinteregger H.F. *et al.*, 1976, *Radio Science*, 11, 421.
Wilkinson P.N., Readhead A.C.S., Purcell G.H., Anderson B., 1977, *Nature*, 269, 764.
Zamorani G., Henry J.P., Maccacaro, T. *et al.*, 1981, *ApJ*, 245, 357.
Zucca E., Zamorani G., Vettolani G. *et al.*, 1997, *A&A*, 326, 477.
Zwicky F., Herzog E., Wild P., 1963, *Catalogue of galaxies and clusters of galaxies*, vol. 2, Pasadena, California Institute of Technology.
Zwicky F., Herzog E., Wild P., 1966, *Catalogue of galaxies and clusters of galaxies*, vol. 3, Pasadena, California Institute of Technology.

Bibliografia “storica”

Alcuni suggerimenti di lavori che aiutano a inquadrare il panorama delineato in queste pagine secondo un riferimento più ampio di carattere generale sia locale che nazionale:

- Bergia S., Capiluppi P., Focardi S., Giacomelli, G. (a cura di), *In Memoria di Giampietro Puppi*, Il Nuovo Saggiatore, Nuova Serie anno XXIII, N. 5-6, 2007.
Brini D., “*il BORISPA*” *nascita e sviluppo dell’astronomia sperimentale in raggi X duri a Bologna*, CNR Area Ricerca Bologna 1995.
Ceccarelli M., *L’avventura di Vivere*, Bologna, Pendragon, 2004.
“Cento Anni di Astronomia in Italia 1860-1960”, Atti dei Convegni Lincei 217, Roma, Bardi Editore, 2005.
Cifarelli L. (a cura di), *60 years of Subnuclear Physics in Bologna*, Bologna, Bononia University Press, 2019.
Dessi P., *Settanta giorni. Storie di occupazione dell’Istituto di Fisica di Bologna*, in *Le istituzioni universitarie e il Sessantotto*, a cura di Alessandro Breccia, Bologna, CLUEB, 2013, pp. 267-277.
Dragoni G., “Puppi Giampietro” in *Dizionario Biografico Treccani*, vol. 85, 2016.
Focardi P., Palumbo G., *Da Bologna allo Spazio*, Bologna, Bononia University Press, 2011.
Giorgini B., *La Scienza del Sessantotto: I 70 giorni dell’Occupazione di Fisica Il MANIFESTO BOLOGNA*, 29 gennaio 2018.
Puppi in memoria di Marcello Ceccarelli (archivio IRA).
Tega W. (a cura di), *Lo Studio e la Città Bologna 1888 – 1988. IX Centenario dell’Università degli Studi di Bologna*, Nuova Alfa Editoriale, 1998.

Finito di stampare nel mese di maggio 2021
per i tipi di Bononia University Press