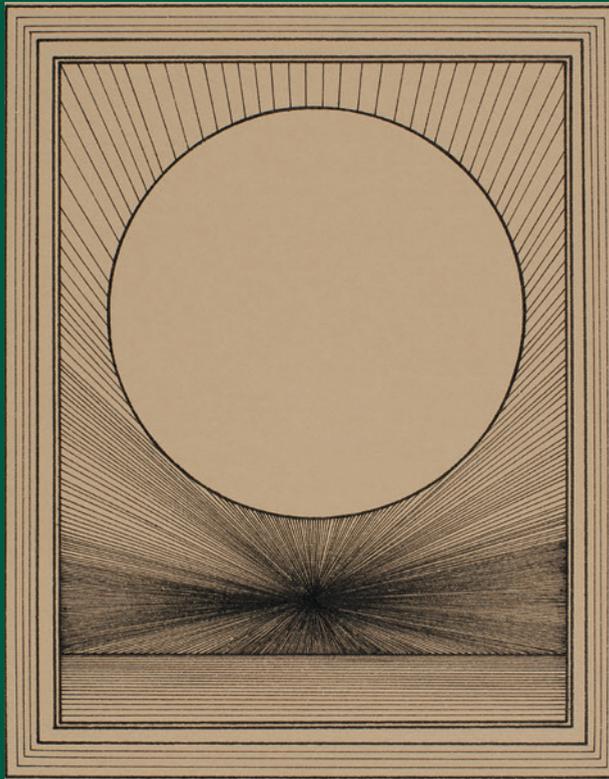




MENS AGITAT
— *Colloquia* —

Lo sviluppo dell'Astronomia a Bologna dal 1960 al 1990



a cura di Bruno Marano

Bononia
University Press



MENS AGITAT
— *Colloquia* —

Fondazione Bologna University Press
Via Saragozza 10 – 40123 Bologna
tel. (+39) 051 232 882

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

© 2020 Autori

Opera pubblicata con licenza CC BY-4.0

ISBN: 978-88-6923-499-6
ISBN online: 978-88-6923-861-1
DOI: 10.30682/9788869238611

In copertina: Lucio Saffaro, *Cerchio sospeso su raggiera. Tractatus Logicus Prospecticus*, 1966
(Fondazione Saffaro, Bologna)

Coordinamento editoriale: Angela Oleandri

Impaginazione: Design People, Bologna

Prima edizione: maggio 2020

Lo sviluppo dell'Astronomia a Bologna dal 1960 al 1990

Bologna, 15 maggio 2018

a cura di Bruno Marano

Bononia
University Press

Sommario

- 7 Premessa
Walter Tega
- 9 Prefazione
Bruno Marano
- 11 Un quadro della ricerca in Astrofisica
Giancarlo Setti
- 27 L'Astrofisica Spaziale a Bologna: i primi passi e il suo sviluppo
Filippo Frontera
- 61 La Radioastronomia a Bologna dalla nascita agli anni Novanta
Carla Fanti e Roberto Fanti
- 87 I quasar e la radiazione di fondo X (XRB) a Bologna
Gianni Zamorani
- 101 L'Astrofisica Stellare nella Torre dell'Osservatorio dal 1950 al 1990
Flavio Fusi Pecci
- 117 L'Astronomia a Bologna: 1960-1990. Astrofisica Teorica in Torre
Alvio Renzini

Premessa

Le storie generali di Bologna, anche le più recenti, hanno dedicato un modesto rilievo all'Università con il risultato di mettere in secondo piano uno degli elementi che le hanno conferito una dimensione e una fama internazionali. Gli studi dedicati in particolare al nostro ateneo hanno posto in evidenza la sua vita istituzionale, l'ingente presenza e la provenienza degli studenti da altre città e da altri paesi e l'eccellenza dei suoi maestri. Solo alcune indagini hanno sottolineato l'intensa attività scientifica che si è svolta per secoli nei suoi laboratori e nelle sue biblioteche. Per chi intende raccontare la vera storia della nostra università è decisivo intrattenersi a lungo e dettagliatamente su questo argomento. I pochi studi che vi si sono dedicati sono legati soprattutto alle numerose pubblicazioni che hanno accompagnato le celebrazioni del IX Centenario dell'Alma Mater, ma anch'esse si sono spinte raramente oltre la prima metà del ventesimo secolo. L'Accademia delle Scienze dell'Istituto non ha ritenuto di poter supplire a questa reticenza, o meglio, a questo timore della contemporaneità, ma non si è sottratta al compito di spronare i suoi dotti soci a riflettere su questo argomento e a promuovere piccoli colloqui dedicati esclusivamente alla ricostruzione dell'attività scientifica e alle sue connessioni con il contesto nazionale e internazionale senza per ciò trascurare i rapporti con le realtà istituzionali del territorio e le esigenze della vita quotidiana della nostra comunità.

Sono nati da questa esigenza e da questa disponibilità una serie di colloquia disciplinari che hanno ricapitolato esperienze, scuole e preziosi insegnamenti di maestri restituendo così l'ampia rete di connessioni e di relazioni che si sono sviluppate nel secondo dopoguerra e che hanno collocato l'ateneo bolognese tra i protagonisti della ricerca internazionale rendendo i suoi ricercatori portatori, non sempre consapevoli, di innovazioni delle quali oggi cogliamo ancora l'originalità e la fecondità.

I risultati di questi colloqui che hanno interessato la fisica, l'astronomia, la medicina, la biologia, la chimica, la geologia, l'economia e la statistica, l'ampia area delle discipline umanistiche e che proseguiranno con l'ingegneria, il diritto e le scienze politiche e sociali, saranno proposti al pubblico dei lettori in agili volumi che non intendono fornire una storia completa dello sviluppo della ricerca scientifica a Bologna quanto piuttosto mettere a disposizione materiali preziosi, vicende di maestri e dispiegarsi di scuole, memorie di imprese e di innovazioni sottratte all'oblio, indispensabili per chi vorrà cimentarsi nell'impresa più ampia di ricostruire la lunga sequenza di ricerche che ha dato una rilevanza planetaria all'Alma Mater Studiorum e della quale si avverte la mancanza.

Walter Tega

Presidente dell'Accademia delle Scienze dell'Istituto di Bologna

Prefazione

Negli anni Cinquanta e Sessanta ebbe luogo una formidabile trasformazione dell'Astronomia mondiale. Per millenni l'unico canale di conoscenza, pure importantissimo, fu la luce visibile. In due decenni la Radioastronomia e l'Astronomia X, rese possibili da nuove tecnologie, aprirono l'Astronomia all'intero spettro della radiazione elettromagnetica e misero in evidenza fenomeni fisici sconosciuti e inaspettati.

Le novità e potenzialità di questa evoluzione furono colte, fin dal suo primo manifestarsi, da Giampietro Puppi, direttore dell'Istituto di Fisica dell'Università di Bologna. Egli trovò nuove risorse e incoraggiò colleghi (Marcello Ceccarelli tra diversi altri) e giovani laureati a investire le proprie capacità nell'Astrofisica e nella Cosmologia. Nacquero così il progetto del Radiotelescopio "Croce del Nord" e la prima produzione di rivelatori dei raggi X cosmici, destinati a "volare" su palloni, razzi, satelliti.

Negli stessi anni l'Astronomia "classica", coltivata nella Torre della Specola, evolveva verso lo studio avanzato dell'evoluzione stellare. Il telescopio "Cassini" di Loiano, attivo dal 1976, consentì ricerche osservative avanzate e costituì, al tempo stesso, una "scuola" che in breve consentì ai più giovani di accedere ai grandi telescopi attivi a livello internazionale.

Esito di questa evoluzione è ora l'esistenza, a Bologna, di una grande comunità di astrofisici, in cui sono uniti Università e Istituto Nazionale di Astrofisica e che opera su molti fronti avanzati della ricerca in Astrofisica e Cosmologia.

Il convegno tenutosi in Accademia il 15 maggio 2018 ha dato l'opportunità che questo percorso dell'Astronomia bolognese fosse descritto da alcuni dei suoi protagonisti "storici". È merito dell'Accademia delle Scienze e del suo Presidente avere sollecitato i relatori a raccogliere in questo volume le loro memorie, lasciandone un ricordo, forse una vera e propria storia.

Desidero infine ringraziare Angela Oleandri per la sua esperta ed accurata revisione dei testi.

Bruno Marano

Un quadro della ricerca in Astrofisica

Giancarlo Setti*

1. La crescita dell'Astronomia bolognese e il ruolo di Giampietro Puppi (1917-2006)

Lo sviluppo della ricerca astronomica bolognese ha avuto inizio alla fine degli anni Cinquanta ed è radicata nell'opera innovativa e lungimirante del Prof. Giampietro "Gianni" Puppi, cattedra di Fisica Superiore e direttore dell'Istituto di Fisica "A. Righi". Puppi si era anche preso l'incarico dell'insegnamento di Fisica Generale del primo anno perché, come soleva dire, voleva conoscere i nuovi studenti di Fisica fin dal loro ingresso nel Corso di Laurea. Per noi studenti fu una grande opportunità perché le sue lezioni, accuratamente preparate, erano magistrali e affascinanti, e un passo dopo l'altro t'introducevano nell'ampio panorama della ricerca delle leggi che governano il mondo fisico, e tu ne uscivi contento della scelta fatta e conscio che questo era certamente ciò a cui ti saresti dedicato. Noi nutrivamo grande rispetto e ammirazione per questo giovane e sempre disponibile professore, e anche un certo timore quando ben presto apprendemmo ch'era un fisico di fama internazionale e quindi il suo giudizio avrebbe probabilmente influito sul nostro futuro (Fig. 1).

Puppi era un fisico teorico delle particelle elementari e dei raggi cosmici, particelle cariche (protoni, elettroni e nuclei atomici) accelerati a energie elevate (relativistiche, cioè velocità prossime a quella della luce) che piovono sulla Terra da tutte le direzioni e dai prodotti delle loro collisioni con gli atomi dell'atmosfera. Nel campo delle particelle elementari aveva ben presto acquisito grande notorietà per via di una rappresentazione grafica sotto forma di triangolo equilatero dei processi di decadimento e cattura del mesone " μ " (una particella elementare scoperta molti anni prima nei raggi cosmici) e del decadimento " β " del neutrone, dove con l'uguaglianza dei lati Puppi avanzava l'ipotesi dell'uguaglianza numerica delle costanti d'interazione in questi tre

* Professore Emerito Università di Bologna. Associato INAF - Istituto di Radioastronomia



Figura 1. Primavera 1958, di fronte all'entrata dell'Istituto di Fisica "A. Righi" – Puppi e studenti del 3° anno del Corso di Laurea in Fisica. Da sinistra: Luigi Monari, Vittorio Prodi, Virginio Bortolani, Lalla ?, Attilio Forino, Puppi, Giorgio Casadei, Giancarlo Setti e Franco Casali (foto scattata dalla collega Alessandra Cavallini).

processi. Questo, che diverrà noto come il “triangolo di Puppi”, è stato alla base di un grande capitolo della fisica delle particelle elementari, l'universalità delle interazioni deboli. Nel campo dei raggi cosmici, Puppi è stato il primo a formularne un bilancio energetico, cioè i flussi di energia nelle varie componenti in arrivo sulla Terra. Proprio dallo studio dei raggi cosmici i fisici avevano cominciato a penetrare la struttura del mondo subnucleare prima dell'avvento delle grandi macchine acceleratrici (il CERN fu fondato nel 1954). Ma quello che aveva eccitato l'interesse di Puppi era l'origine dei raggi cosmici, poiché, a parte quella frazione chiaramente di origine solare, si sapeva che per la gran parte erano di origine galattica e presumibilmente extra-galattica per quelli di energia più alta (ref. [1]). E poi quali potevano essere i meccanismi di accelerazione tali da produrre energie così elevate che vanno anche ben oltre per ordini di grandezza a quella oggi raggiunta dal famoso acceleratore LHC del CERN. Ben noto in tale contesto il meccanismo di Fermi (1949) che ancor oggi, *mutatis mutandis*, mantiene la sua validità (Puppi soleva dire che Fermi non poteva essersi sbagliato perché aveva un filo diretto con l'Altissimo).

2. Fine anni '50-1970

2.1 La Radioastronomia

La scoperta delle onde radio di origine extra-solare risale agli anni Trenta, ma di fatto ha potuto essere perseguita solo dopo la fine del secondo e drammatico conflitto mondiale con la costruzione dei primi radiotelescopi adeguati a una ricerca sistematica. Così nel 1951 due gruppi olandesi e americani annunciano la scoperta della riga a 21 cm di lunghezza d'onda (1420 MHz) emessa dall'idrogeno neutro del gas interstellare, di gran lunga l'elemento più abbondante nella Galassia e anche nell'universo. Questa scoperta è stata fondamentale per lo studio della struttura e della dinamica della Galassia e successivamente anche per altre galassie. Ma la scoperta più importante per l'avvio della Radioastronomia bolognese è avvenuta nel 1954 con l'identificazione della radiosorgente Cygnus A, la terza più forte per intensità nel cielo radio (naturalmente escludendo il

Sistema Solare) con una debole galassia appena visibile nelle lastre del Monte Palomar e posta a una distanza di circa 750 milioni di anni luce (mln a.l.). Dal flusso radio osservato si deduceva una luminosità nella banda radio almeno 10 volte superiore a quella delle galassie spirali più luminose, tipo la nostra e Andromeda, emessa nella banda ottica da tutte le stelle componenti. Se ne deduceva la possibilità di utilizzare le radiogalassie per esplorare in profondità l'universo. Inoltre la forma dello spettro radio osservato era di tipo non termico, cioè non emessa da un gas caldo, ma da un'emissione cosiddetta di sincrotrone dovuta all'accelerazione di elettroni ultra-relativistici in campi magnetici – una fenomenologia che non poteva sfuggire ai fisici dei raggi cosmici come Puppi perché indice di meccanismi naturali estremamente efficienti in grado di trasferire quantità enormi di energia in particelle relativistiche.

Fu così che nel 1958 Puppi prese l'iniziativa per la realizzazione di un grande radiotelescopio richiedendo un cospicuo finanziamento al Ministero della Pubblica Istruzione e, in attesa di una risposta, ne affidò la eventuale realizzazione a Marcello Ceccarelli, un giovane (appena trentenne) e valente fisico sperimentale delle particelle da poco trasferitosi da Padova all'Istituto di Fisica "A. Righi". Ceccarelli e io, laureando con una tesi di Radioastronomia, eravamo a Varenna nel luglio 1959 per seguire un Corso internazionale su "Radioastronomia Solare" organizzato dalla SIF e diretto da Guglielmo Righini (direttore dell'Osservatorio Astrofisico di Arcetri) quando Marcello ricevette un telegramma da Puppi che gli annunciava l'impegno pluriennale del MPI a finanziare la costruzione di un grande radiotelescopio (ancora ricordo che Marcello saltando di gioia mi diceva di 800 milioni di lire, una cifra cospicua per l'epoca che rapportata a oggi corrisponde a circa 11 milioni di euro).

Ceccarelli e collaboratori, fra i quali desidero ricordare in particolare Gianfranco Sinigaglia, un ingegnere elettronico acquisito dall'industria e poi professore della nostra Università, e Alessandro Braccesi, allora ancora studente e poi titolare della cattedra di Astronomia, si misero alacremente all'opera acquisendo e raffinando le competenze radioastronomiche man mano che si procedeva nella costruzione di un radiotelescopio pilota. Assemblato nell'area del podere Ramanzini nella campagna medicinese, e pertanto familiarmente denominato "medicinoscopio", esso era formato da un riflettore cilindro-parabolico lungo $110 \text{ m} \times 7 \text{ m}$ di apertura, realizzato con sottili fili di acciaio (0.7 mm di diametro) separati di 3 cm, supportati da 11 centine e agganciati ai terminali estremi con molle atte a garantirne la tensione.

Il "medicinoscopio" viene inaugurato nel giugno 1960 alla presenza del Ministro della Pubblica Istruzione, sen. Giuseppe Medici, e del Sindaco di Bologna, Giuseppe Dozza, ben noto anche per il suo interesse al potenziamento della ricerca (Fig. 2; a,b). Questa cerimonia si può considerare come il battesimo non solo della Radioastronomia bolognese, ma più in generale di quella italiana.

Il Ministero, come anticipato, comincia a trasferire all'Università i fondi per il grande progetto. Il *team* di Ceccarelli via via si rafforza con l'acquisizione di ingegneri e tecnici qualificati per affrontare la complessità degli aspetti tecnologici. Dopo aver esplorato la

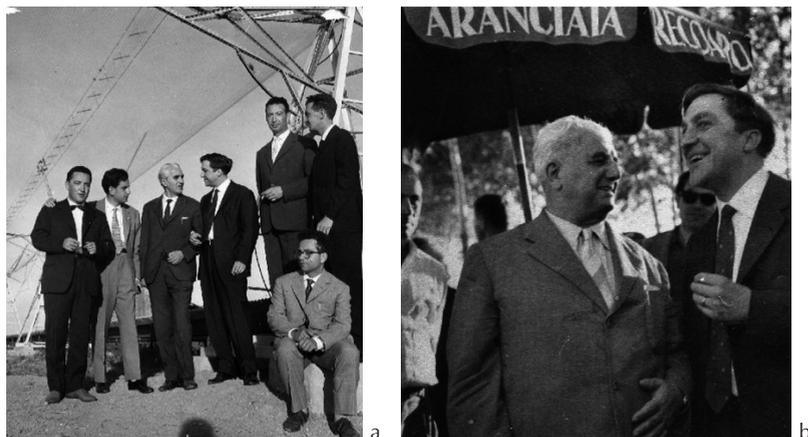


Figura 2. a) Da sinistra: G. Setti, G. Sinigaglia, G. Righini, G. Puppi, G. Mannino, M. Ceccarelli e A. Braccesi (seduto); b) Puppi si intrattiene con il Sindaco Dozza.

possibilità di collocare il grande radiotelescopio in siti dell'Italia centrale, ad esempio la Piana del Fucino, sufficientemente protetti da interferenze radio, si opta definitivamente per un ampio terreno di oltre 30 ettari di area (in località Fiorentina, nelle vicinanze del “medicoscopio”), anche in considerazione della praticità operativa per il gruppo insediato all'Istituto di Fisica e dopo aver ottenuto dal Comune di Medicina assicurazione scritta (delibera) che non sarebbero state date autorizzazioni all'insediamento di attività atte a recare disturbi elettromagnetici entro una distanza predefinita dal radiotelescopio (perfino ai ciclomotori allora in largo uso nella zona vennero applicati dei condensatori mitigatori delle scariche elettriche).

Il disegno concettuale della “Croce del Nord” venne pubblicato in due articoli successivi sulla rivista di fisica *Il Nuovo Cimento* (ref. [2,3]). La configurazione, a “croce di Mills”, prevedeva un braccio orientato in Est-Ovest di 1200 m diviso a metà per l'intersezione con il braccio orientato in Nord-Sud di pari lunghezza, entrambi costituiti da elementi riflettori cilindro-parabolici di dimensioni appropriate e orientabili in elevazione in modo sincrono. Purtroppo il supporto finanziario del MPI si esaurì e per conseguenza le lunghezze dei bracci ridotte a 580 m (una sola delle due parti previste in direzione Est-Ovest) e 320 m in direzione Nord-Sud, da cui la caratteristica forma a T maiuscola. (In seguito la mancanza di una documentazione amministrativa facilmente accessibile, ma certamente presente in qualche archivio dell'Università, non mi ha permesso di verificare il finanziamento globale pervenuto dal MPI, se di 800 milioni di lire, come inizialmente promesso, oppure 600 milioni di lire come ricordava Alessandro Braccesi).

La “Croce del Nord” viene inaugurata il 24 ottobre 1964 dal Ministro della PI Luigi Gui, fanno gli onori di casa il Magnifico Rettore prof. Felice Battaglia e il prof. Ceccarelli (Fig. 3) illustra l'impianto a una nutrita schiera di rappresentanti delle autorità civili e



Figura 3. 24 ottobre 1964 – Inaugurazione della “Croce del Nord”. Marcello Ceccarelli descrive l’impianto strumentale e le sue potenzialità di ricerca scientifica (alla sua destra il Ministro Gui).

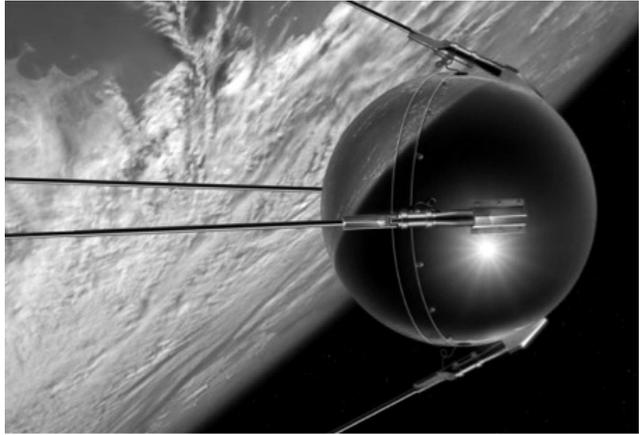


Figura 4. 4 ottobre 1957 – Lancio di Sputnik 1 e l’inizio dell’era spaziale.

religiose, militari, politiche e accademiche di Bologna e provincia e di altre parti d’Italia; giungono telegrammi di congratulazioni da centri di radioastronomia europei e di altri continenti e i media ne danno ampia comunicazione – la Radioastronomia dell’Università entra ufficialmente nel gruppo ristretto dei grandi centri radioastronomici internazionali. Il braccio Est-Ovest è completato ed entra subito in funzione alla frequenza prevista di 408 MHz (73 cm di lunghezza d’onda) mentre occorre attendere il 1967 per il completamento del braccio Nord-Sud, il che porta l’area complessiva di ricezione dei segnali cosmici a circa 30000 mq (3 campi di calcio), un ottimo limite di flusso per la rivelazione delle radiosorgenti e a un buon posizionamento delle stesse. Vengono prodotti in fasi successive i famosi cataloghi *B1*, *B2*, ecc..., dove *B* sta per Bologna. Questi e altri risultati scientifici ottenuti con la “Croce del Nord” sono illustrati più diffusamente nelle relazioni di Roberto Fanti e Carla Giovannini.

2.2 L’Astronomia dei raggi X e gamma e i raggi cosmici

Il 4 ottobre 1957 è una data storica. Viene lanciato il satellite russo Sputnik 1 (Fig. 4) che di fatto inaugura l’era spaziale. Il segnale venne captato dal grande radiotelescopio (ora Lovell) di Jodrell Bank (Manchester, UK) e fu un vero shock per l’Occidente. Gli Stati Uniti reagirono immediatamente istituendo la NASA (National Aeronautics & Space Administration), mentre nell’ Europa occidentale l’organizzazione per fronteggiare la nuova sfida prese più tempo.

I fisici dei raggi cosmici compresero immediatamente la grande potenzialità delle ricerche condotte al di sopra dell’atmosfera terrestre che da sempre aveva rappresentato il filtro delle radiazioni cosmiche, e per la verità protetto dalle stesse. Nel 1959 Puppi promosse la formazione presso l’Istituto di Fisica di un gruppo per lo studio della radiazione X e gamma di origine celeste – BoRiSpa (Bologna Ricerche Spaziali), responsabile Domenico Brini (Fig. 5); in parallelo anche un gruppo per lo studio delle variazioni



Figura 5. Domenico Brini (1923-2008).

rapide dei raggi cosmici da terra – OVRaRCo, responsabile Menotti Galli. Assieme ad analoghi gruppi sorti per iniziativa dei fisici in altre sedi nel 1962 formarono il GIFCO (Gruppo Italiano di Fisica Cosmica), organo del CNR.

Il BoRiSpa condusse vari esperimenti per la rivelazione di raggi X con strumenti a bordo di razzi e palloni di alta quota e mise a punto il “Solar X-ray Spectroheliograph” come parte del carico scientifico del satellite OSO 6 della NASA lanciato nel 1969, dove OSO è l’acronimo di Orbiting Solar Observatory, una serie di satelliti della NASA che vennero messi in orbita in rapida successione a partire dal 1962.

Le ricerche del gruppo BoRiSpa nel corso della sua evoluzione istituzionale saranno trattate più diffusamente nella relazione di Filippo Frontera.

2.3 La decade *mirabilis* della nuova Astrofisica

1962 – Con una batteria di rivelatori a bordo di un razzo i ricercatori Giacconi, Gursky, Paolini e Rossi (AS&E/MIT) scoprono un fondo cosmico di raggi X di origine sconosciuta nonché la prima sorgente extrasolare di raggi X, poi identificata con una stella nella costellazione dello Scorpione e denominata Sco X-1 dal satellite OSO-3 lanciato nel 1967, che inoltre rivela l’esistenza di un fondo diffuso di raggi gamma della Galassia. È l’inizio della grande Astronomia dei raggi X. Per il suo contributo Riccardo Giacconi riceverà il Premio Nobel per la Fisica 2002.

1963 – La forte radiosorgente 3C 273 viene identificata con un oggetto di immagine stellare in seguito alla posizione precisa ottenuta dal radioastronomo Cyril Hazard in occasione di un’occultazione lunare della radiosorgente, ma lo spettro ottico dell’oggetto è complicato e non riconducibile ai noti spettri stellari. Maarten Schmidt, astronomo del Monte Palomar, pubblica su *Nature* un articolo nel quale dimostra che lo spettro è facilmente identificabile con righe note se le relative lunghezze d’onda vengono aumen-

tate per la stessa quantità proporzionale, il che implica che si tratta di un oggetto extragalattico di natura ancora ignota che partecipa all'espansione dell'universo. Si inaugura così il grande capitolo dei *quasar* (acronimo per Quasi Stellar Radio Sources) che sono all'origine delle enormi quantità di energia rilasciate dai Nuclei Galattici Attivi. Per gli studi sui *quasar* Schmidt riceverà il Premio Kavli 2008.

È anche l'anno della scoperta della riga a 18 cm del radicale idrossile nel gas interstellare. Si apre così l'epoca del grande contributo della Radioastronomia alla scoperta della presenza di molecole nelle grandi nubi molecolari sedi della formazione stellare. Ne sono state identificate oltre 130, in prevalenza molecole organiche anche molto complesse fra cui in tempi recenti la glicina, il più semplice degli amminoacidi, con ovvia rilevanza per la discussione sull'origine della vita nell'universo.

1965 – Due ricercatori della Bell Telephone, A. Penzias e R. Wilson, mentre stanno accuratamente calibrando una grande antenna per le trasmissioni alla lunghezza d'onda di 7.35 cm rilevano l'esistenza di un segnale di fondo di origine sconosciuta che viene tentativamente identificato come residuo dell'esplosione iniziale dell'universo (Big Bang), come di fatto sarà verificato e consolidato da tutta una serie di ricerche che immediatamente seguirono l'annuncio fino al presente. Per questa scoperta riceveranno il Premio Nobel per la Fisica 1978.

1968 – La scoperta delle *pulsars* (Pulsating Radio Sources), la firma delle stelle di neutroni la cui esistenza era stata ipotizzata alcuni decenni prima. Per questa scoperta Antony Hewish riceverà il Premio Nobel per la Fisica 1974.

A fronte di questa serie di scoperte si erano immediatamente sviluppati progetti e iniziative a livello internazionale. L'Europa occidentale reagì creando due strutture nel 1964: ELDO (European Launch Development Organization) destinata allo sviluppo di piattaforme e veicoli spaziali, ESRO (European Space Research Organization) per lo sviluppo delle ricerche scientifiche nello spazio inclusive dei progetti dell'Astronomia. Queste organizzazioni poi confluiranno a costituire l'Agenzia Spaziale Europea (ESA) solo nel 1975. La situazione italiana appariva fluida e contrastata ed è solo nel 1970 che il CNR stabilisce il Servizio Attività Spaziali (SAS). Come già accennato in precedenza nel caso del BoRiSpa, le ricerche dei centri di Fisica Cosmica erano coordinate nell'ambito del GIFCO e finanziate dal CNR, il che comunque permetteva di aderire anche a missioni spaziali nell'ambito di accordi per la strumentazione progettata per le missioni.

Situazione diversa quella della Radioastronomia. Non si era ancora attuato alcun coordinamento a livello europeo e i singoli paesi, come l'Italia, portavano a compimento i grandi progetti già approvati. Così nel 1970 in Olanda veniva inaugurato il Westerbork Synthesis Radio Telescope (WSRT) e nel 1972 in Germania il radiotelescopio di Effelsberg del Max Planck Institut für Radioastronomie, dotato di un'antenna parabolica di 100 m di diametro, un record per lungo tempo rimasto imbattuto. Il gruppo della "Croce del Nord", composto da circa 30 unità di tecnici e ricercatori, era in gravi difficoltà sia economiche che di posizioni per il personale che per la gran parte era stipendiato a fattura (il precariato non è una situazione tipica dei tempi attuali, ma

evidentemente endemica al nostro sistema). Nel contempo l'Università per motivi economici e organizzativi non appariva più in grado di mantenere la gestione di un grande progetto strumentale quale la "Croce del Nord".

2.4 La nuova Astrofisica e il ruolo del CNR

Per quanto sopra descritto appariva chiara la necessità di una strutturazione organica dei centri di ricerca che si erano avventurati nelle nuove discipline astronomiche (ref. [4]). Ancora una volta il ruolo di Puppi fu fondamentale. Eletto presidente del Comitato Nazionale per le Scienze Fisiche del CNR egli promosse la costituzione di una rete di 6 Laboratori (rinominati Istituti nel 1978) dei quali 2 a Bologna: **1968** Istituto di Tecnologie e Studio delle Radiazioni Extraterrestri (**ITESRE** - Dir. D. Brini), **1970** Istituto di Radioastronomia (**IRA** - Dir. G. Setti). Questi due istituti, assieme all'Istituto di Astronomia dell'Università e annesso Osservatorio Astronomico dei quali si dirà nel seguito, hanno rappresentato le strutture portanti dell'evoluzione della ricerca astronomica bolognese fino ai giorni nostri, la maggior concentrazione italiana per la vastità delle ricerche che vi sono perseguite. In particolare, l'istituzione dell'IRA fu una vera ancora di salvezza per la prosecuzione della ricerca radioastronomica: le posizioni messe a disposizione dal CNR permisero una graduale sistemazione del personale tecnico e di ricerca in condizioni di precariato, mentre la dotazione permetteva di continuare ed eventualmente potenziare l'attività di ricerca nell'ambito di una convenzione IRA-CNR/Università di Bologna (firmata dal Rettore Tito Carnacini) per la quale l'Università manteneva la proprietà della "Croce del Nord", ne veniva garantito l'utilizzo per ricerche al proprio personale e un contributo annuo per le spese di funzionamento, mentre l'IRA-CNR si impegnavano a garantirne la manutenzione ordinaria e fruibilità e ad assicurarne l'efficacia secondo lo stato dell'arte.

3. Anni 1970-1990

3.1 La Radioastronomia e la Stazione Radioastronomica di Medicina

Con un finanziamento ad hoc del CNR negli anni 1974-75 l'IRA ha effettuato un'importante ristrutturazione della "Croce del Nord" sia per quanto riguarda la struttura meccanica con il raddoppio della lunghezza del braccio Nord-Sud agli attuali 640 m (Fig. 6), simile a quella del braccio Est-Ovest, sia riprogettando tutta la filiera di acquisizione ed elaborazione dei segnali ricevuti. Questo ha consentito una maggior precisione e sensibilità nella posizione delle radiosorgenti successivamente catalogate e una maggiore definizione nello studio delle radiosorgenti estese.

Con il progredire degli studi sulla fisica delle radiosorgenti e delle loro controparti ottiche e in raggi X/gamma si rendeva necessario progettare radiotelescopi di grande risoluzione angolare e operanti su un ampio spettro di frequenze radio. Il Congresso degli Stati Uniti nel 1972 aveva approvato un progetto monstre: 29 radiotelescopi identici, dotati di uno specchio parabolico di 25 m diametro, collegati elettronicamente e mobili

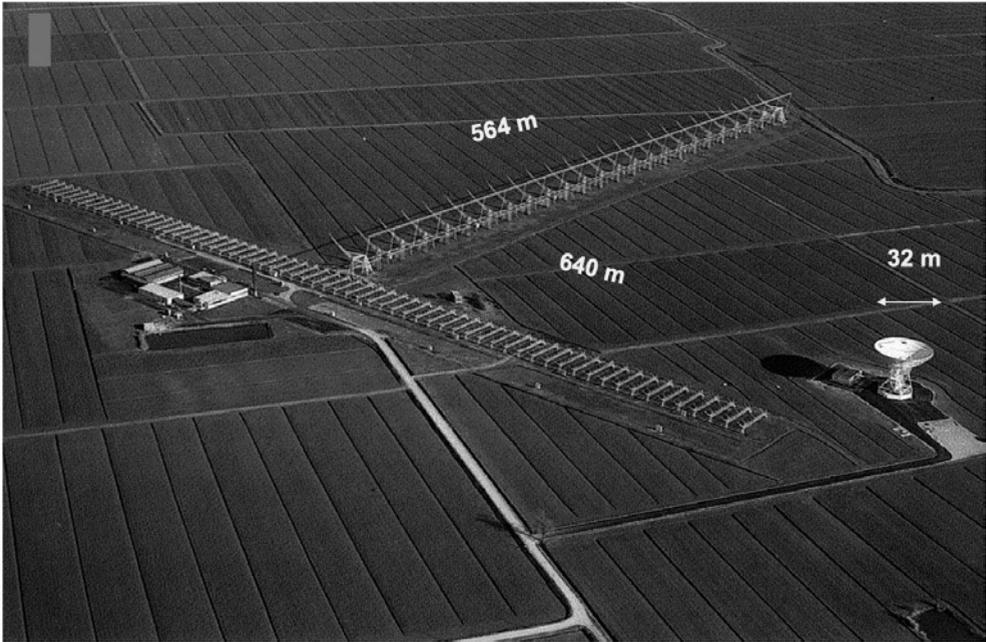


Figura 6. Vista aerea della Stazione Radioastronomica di Medicina con la “Croce del Nord” e il radiotelescopio VLBI.



Figura 7. Radiotelescopio VLA (Very Large Array) del National Radio Astronomy Observatory (NRAO) a Socorro (New Mexico-USA) in funzione dal 1980.

lungo tre bracci disposti in forma di una *ip*silon maiuscola (Y) – un interferometro multi-elementi. Nella configurazione più estesa avrebbe raggiunto una linea di base di 36 km e alle frequenze radio più elevate una risoluzione angolare di alcuni centesimi di secondo d’arco. Denominato VLA (Very Large Array) venne inaugurato nel 1980 per un costo totale di circa 80 milioni di dollari che all’epoca corrispondevano a circa 40 miliardi di lire (Fig. 7).

Naturalmente era insensato anche solo pensare a un simile progetto in Italia, e non solo per ragioni economiche, né esisteva allora un organismo europeo per la radioastronomia. Si poneva quindi il problema di progettare il futuro della ricerca radioastronomica sperimentale italiana man mano che si venivano esaurendo i programmi principali della “Croce”. Che fare? Fortunatamente era in fase di sviluppo sperimentale una nuova tecnologia interferometrica che avrebbe permesso di correlare fra loro i segnali di una radiosorgente registrati contemporaneamente da due o più radiotelescopi disposti a grandi distanze, anche di migliaia di chilometri, consentendo di studiarne la struttura



Figura 8. a) Radiotelescopio VLBI di Medicina e b) quello gemello di Noto (Sicilia).

con grandi risoluzioni angolari. Nota come VLBI (Very Long Baseline Interferometry) era stata sperimentata anche dalla NASA con antenne dislocabili per monitorare i movimenti crostali lungo la grande faglia di Sant'Andrea in California poiché puntando sorgenti radio estremamente distanti e praticamente puntiformi, come i quasar, era ed è tuttora possibile viceversa monitorare variazioni molto piccole nelle distanze relative dei radiotelescopi e quindi i movimenti della crosta.

Dopo ampia consultazione con i maggiori centri internazionali l'IRA mise a punto un progetto VLBI di valenza sia per la Radioastronomia che per la Geodinamica. Esso prevedeva la costruzione in tempi successivi di tre identici radiotelescopi completamente orientabili, dotati di un riflettore parabolico di 32 m di diametro e dislocati sul territorio nazionale presso la Stazione Radioastronomica di Medicina, nella punta sud della Sicilia e in Sardegna. Fu approvato dal CNR per il finanziamento nel 1979. Il radiotelescopio VLBI di Medicina fu inaugurato nel 1983 e quello di Noto nel 1988 (Fig. 8; a,b). Purtroppo la mancanza di fondi non permise di proseguire immediatamente con quello previsto in Sardegna, ma solo molti anni dopo (1998) con un finanziamento del MIUR nell'ambito di una legge per lo sviluppo della ricerca nell'Italia meridionale.

Il progetto VLBI italiano stimolò la creazione di una collaborazione più stretta fra le maggiori istituzioni radioastronomiche europee che si concretizzò nel 1980 con la fondazione dell'EVN (European VLBI Network) da parte di un consorzio di 5 istituti (MPIfR, Bonn-D; ASTRON, Dwingeloo-NL; OSO, Onsala-S; Jodrell Bank Observatory-UK; IRA, Bologna-I) con la prima presidenza assegnata all'IRA. Questa è stata la prima organizzazione europea per la Radioastronomia che ha anche aperto l'accesso alle risorse amministrative dalla Commissione UE per la ricerca.

La rete attuale dell'EVN, amministrata dal JIVE (Joint Institute for VLBI in Europe), è rappresentata (Fig. 9) sovrapposta alla distribuzione di istituti collaboranti in altri continenti. Si noti che per l'Italia è presente il Sardinia Radio Telescope (SRT) che, come sopra accennato, è stato progettato e realizzato dall'IRA nell'ambito di un accordo di programma CNR-IRA, ASI e Regione Sardegna sotto l'egida del MIUR e inaugurato nel 2013 (Fig. 10). Non più gemello dei radiotelescopi VLBI di Medicina e Noto, ma un'antenna parabolica di 64 m di diametro e in grado di lavorare fino a una lunghezza d'onda di 3 mm.

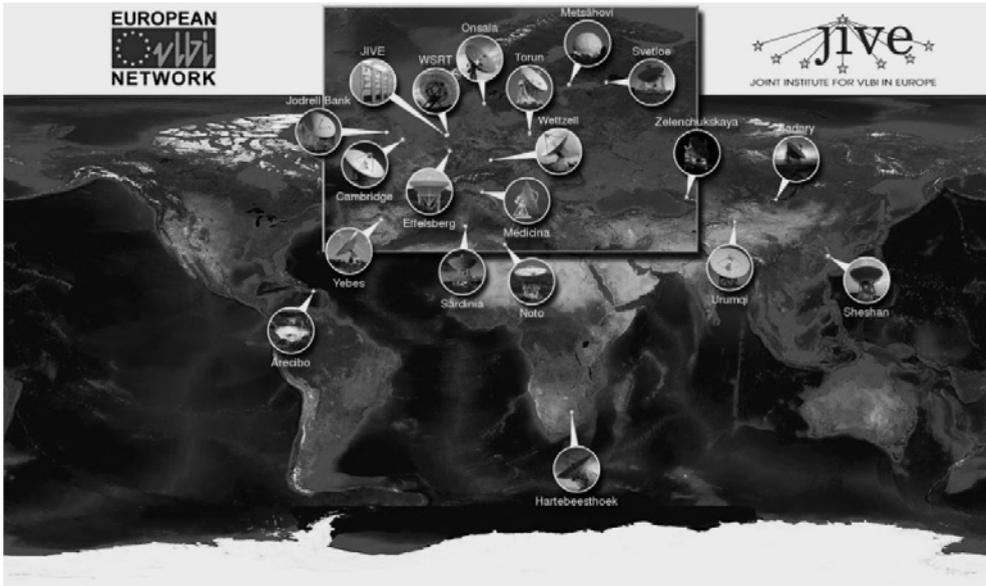


Figura 9. Immagine della rete VLBI europea sovrapposta alla distribuzione di altre antenne per osservazioni con VLBI intercontinentale. Si noti nell’insero piccolo (in basso-centro la collocazione dei radiotelescopi italiani).



Figura 10. 30 settembre 2013 – Inaugurazione del Sardinia Radio Telescope (SRT).

3.2 L’Astrofisica delle alte energie e il primo satellite scientifico italiano

Nel 1970 fu lanciato il satellite UHURU per l’Astronomia dei raggi X, il primo della serie SAS (Small Astronomical Satellites) della NASA, dalla base italiana San Marco di Malindi, ora Centro Spaziale “Luigi Broglio”. La missione terminò agli inizi del 1973, ma è ancora oggi ricordata per la straordinaria messe di scoperte sul cielo nella banda dei raggi X. A seguire, sempre della NASA, il satellite HEAO-2 (poi denominato “Einstein Observatory”, operativo dal 1978 al 1982 che per la prima volta adottava specchi riflettenti in una particolare configurazione ottica per focalizzare i raggi X.

E in Europa? Naturalmente le scoperte di UHURU avevano creato un grande fermento. Il Science Research Council (UK), in collaborazione con GSFC/NASA, nel 1974 lanciò dalla base “San Marco” il satellite Ariel V dotato di un ampio corredo di strumenti a copertura della banda dei raggi X che rimase operativo fino al 1980. L’ESRO, si

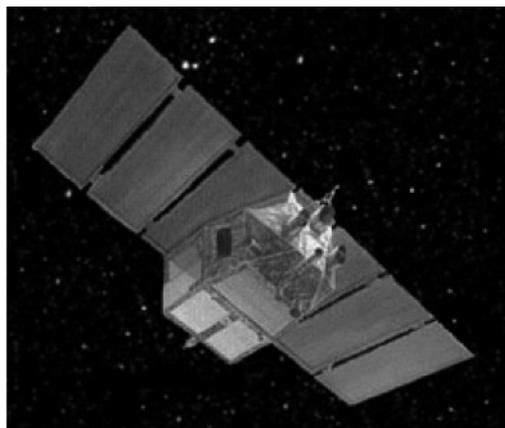


Figura 11. Immagine artistica del satellite BeppoSAX.

veda il par. 2.3, aveva approvato (1969) una missione per l'osservazione del cielo in raggi gamma con un carico strumentale fornito dagli istituti europei partecipanti, fra i quali il GIFCO per l'Italia. Lanciato nel 1975, il satellite è stato operativo con successo per 7 anni, 5 in più del previsto, e ha fornito il primo catalogo completo di sorgenti gamma. Occorre attendere il 1983 per il lancio della prima missione dell'ESA dedicata ai raggi X. Denominato EXOSAT (European X-Ray Observatory Satellite) era stato immesso in un'orbita eccentrica particolare onde consentire l'eventuale posizionamento delle sorgenti di raggi X sfruttando occultazioni lunari. La missione terminò dopo tre anni.

E in Italia? Nel 1980 il CNR venne incaricato della gestione del PSN (Piano Spaziale Nazionale) come "Progetto Finalizzato" (Dir. Luciano Guerriero) e poi subito dopo (1982) anche della preparazione dello stesso. Nel 1980 per la prima volta la comunità italiana fu invitata a presentare proposte per una missione scientifica e nel 1981 fu selezionata la proposta SAX (Satellite per l'Astronomia dei Raggi-X) – il primo satellite scientifico italiano, ma con alcune collaborazioni internazionali fra le quali primeggiava quella olandese. Lanciato nel 1986, e denominato BeppoSAX in onore del grande fisico Giuseppe "Beppo" Occhialini, portava un ampio carico di strumenti a copertura della banda dei raggi-X, fra questi il PDS (Phoswich Detector System) in capo all'ITESRE che ha consentito l'identificazione dell'origine dei Gamma Ray Burst (GRO), da oltre trent'anni il tormentone dell'astrofisica delle alte energie (Fig. 11; per i risultati si rimanda alla relazione di Filippo Frontera).

3.3 L'Astronomia ottica e l'evoluzione dell'Istituto di Astronomia dell'Università

Nonostante la rivoluzione scientifico-culturale introdotta dalle nuove discipline astronomiche, l'Astronomia ottica era ed è rimasta centrale per la conoscenza dell'universo. Così, ad esempio, la catalogazione delle radiosorgenti scoperte dalle mappature di grandi porzioni di cielo condotte dai radiotelescopi richiedeva la identificazione e studio delle loro controparti ottiche. L'irrompere delle nuove discipline astronomiche stimolò nuovi progetti per l'Astronomia ottica poiché appariva chiaro che il progresso nelle conoscenze

necessitava di un equilibrio nelle capacità osservative su tutte le bande dello spettro elettromagnetico. Nell'emisfero nord la scena dell'Astronomia ottica era dominata dai grandi telescopi americani degli Osservatori di Mt. Wilson e Mt. Palomar. Ma l'ultravioletto, che convoglia importanti informazioni astrofisiche, è fortemente assorbito dallo strato di ozono della nostra atmosfera. Altrettanto dicasi per la banda del vicino infrarosso che viene parzialmente assorbita dall'atmosfera. Anche la banda del visibile per la quale l'atmosfera è trasparente risulta tuttavia affetta dalla turbolenza atmosferica che limita il potere risolutore anche dei più grandi telescopi. Da qui la necessità di collocare telescopi nello spazio. Fra questi ricordiamo lo IUE (International Ultraviolet Explorer), lanciato nel 1978 nell'ambito di una collaborazione ESA-NASA e operativo fino al 1996, che per la prima volta ha consentito un'ampia indagine dell'universo ultravioletto e lo HST (Hubble Space Telescope), lanciato dalla NASA nel 1990 in collaborazione con ESA e ancora operativo, che copre le bande del vicino infrarosso, visibile e UV e le cui immagini stupende sono a tutti note.

In Italia non esisteva un Telescopio Nazionale al quale fare riferimento. In generale gli Osservatori Astronomici erano dislocati sul territorio nazionale e, per ragioni storiche, in maggioranza facevano parte della rete degli Osservatori del Ministero della Pubblica Istruzione (MPI) che contribuiva con risorse finanziarie e di personale al loro funzionamento. Questo non era il caso per l'Osservatorio Astronomico dell'Università di Bologna, gestito dall'Istituto di Astronomia, la cui attività dipendeva dalle risorse messe a disposizione dall'Università. Lo sviluppo delle nuove discipline astrofisiche richiedeva un ampliamento degli insegnamenti offerti e le Università di Bologna e Padova furono le prime, e per molti anni le sole, a istituire un Corso di Laurea in Astronomia (1969) e a rinnovare la strumentazione ottica dei propri Osservatori.

L'Università di Bologna approvò il progetto dell'Istituto di Astronomia di un nuovo e moderno telescopio da collocare nella sede di Loiano. Dotato di uno specchio primario di 152 cm di diametro, venne inaugurato nel 1976 e dedicato a Giovanni Domenico Cassini, il grande astronomo italiano del Seicento, poi naturalizzato francese, per molti anni docente presso lo Studio bolognese dove a ricordo imperituro ha lasciato la grande meridiana della Basilica di S. Petronio. Il telescopio "Cassini" (Fig. 12) ha giocato un ruolo fondamentale per il rilancio dell'Astronomia ottica bolognese e non solo. Per le ricerche condotte con questo telescopio si rimanda alle relazioni di Flavio Fusi Pecci e Alvio Renzini.

Nel seguito alcune date di eventi importanti che hanno inciso sulla evoluzione delle strutture della ricerca astronomica bolognese.

Nel 1980 viene pubblicato il famoso DPR 382/80 della riforma universitaria che per la prima volta affronta in modo organico la ristrutturazione degli studi superiori. Fra le norme, la strutturazione delle università in dipartimenti e l'introduzione del dottorato di ricerca. Ed è del 1980 l'istituzione del Dipartimento di Astronomia che per molti



Figura 12. Edificio e cupola del telescopio “G.D. Cassini” (OA di Loiano-Bologna).

anni, fino alla riforma Gelmini, si collocherà ai primi posti nelle valutazioni dell’Università di Bologna. La istituzione dei Dottorati di ricerca ha seguito un iter più lungo con il coinvolgimento del CUN (Consiglio Universitario Nazionale), ma finalmente (1985) viene istituito presso la nostra Università il Dottorato di Ricerca in Astronomia; assieme a quello analogo presso l’Università di Padova rimarranno per molti anni gli unici in Italia per le discipline astronomiche.

Nel 1982 viene pubblicato il DPR 163/82 che istituisce il CRA (Consiglio per le Ricerche Astronomiche) organo di consulenza del Ministro della PI, che formalmente lo presiede, per le materie astronomiche e per la gestione coordinata degli Osservatori afferenti al MPI. Su proposta del CRA nel 1985 viene istituito l’Osservatorio Astronomico di Bologna (OAB) al quale viene anche demandata la gestione dell’Osservatorio di Loiano dell’Università. Con l’istituzione di OAB si completava così il quadro delle strutture bolognesi specificamente dedicate agli studi astronomici e tuttora attive, quantunque con alcune varianti (Dipartimento di Astronomia, OAB, IRA, ITESRE).

Il 1982 registra anche un evento cruciale per lo sviluppo dell’Astronomia ottica italiana: il Parlamento approva una legge che sancisce l’adesione dell’Italia all’ESO (European Southern Observatory), una organizzazione inter-parlamentare analoga al CERN, con sede a Garching b. Muenchen-D e osservatori in Cile. Questo apriva l’accesso all’utilizzo dei grandi telescopi dell’ESO per l’osservazione dell’emisfero australe, ricco di oggetti di grande interesse astrofisico e alle tecnologie ottiche sviluppate dall’ESO. Già nel preambolo alla legge di adesione il relatore menzionava una interazione sinergica con ESO per la realizzazione del nostro telescopio nazionale. Infatti, approvato nel 1989 e finanziato dal MPI su un fondo per le grandi apparecchiature, il Telescopio Nazionale “Galileo” (TNG) di 3.6 m di diametro, progettato con il coordinamento del CRA. (Dir. Cesare Barbieri - Università di Padova) e una partecipazione corale degli OO.AA., sarà modellato secondo il New Technology Telescope (NTT) dell’ESO e, collocato presso l’Osservatorio Internazionale delle Isole Canarie (La Palma-E), verrà poi inaugurato nel 1996 (Fig. 13). Vorrei qui ricordare la partecipazione degli astronomi bolognesi e, in



Figura 13. Immagine della cupola del Telescopio Nazionale "Galileo" (TNG).

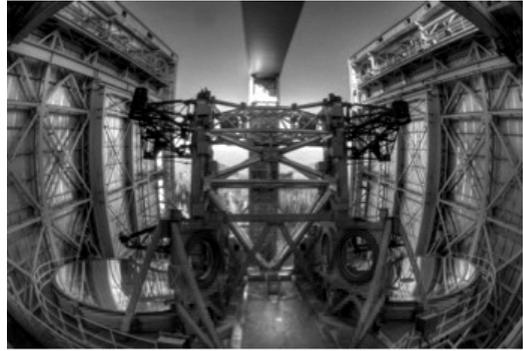


Figura 14. Vista di LBT dall'interno della cupola.

particolare, del nostro Flavio Fusi Pecci che con grande efficacia coordinò il primo set di strumenti ausiliari.

Per quanto riguarda l'osservazione ottica dell'emisfero settentrionale nel 1983 il CRA aveva approvato l'avvio di una collaborazione fra l'OA di Arcetri e lo Steward Observatory (Università di Arizona) per la progettazione ed eventuale costruzione di un grande telescopio. Il progetto prevedeva due grandi specchi di 8 m di diametro su un'unica forcella e utilizzabili sia singolarmente che in modo interferometrico, un progetto unico al mondo che avrebbe consentito agli astronomi di accedere all'osservazione dell'emisfero nord con un telescopio di cosiddetta "futura generazione". L'accordo formale venne siglato nel 1989 presso il MURST alla presenza del Ministro Ruberti, formalmente Presidente del CRA, dal Direttore dell'OA di Arcetri, e dal Direttore dello Steward Observatory e dal Presidente della Research Corporation (Arizona) per la parte americana; successivamente questa collaborazione internazionale si è ampliata con l'adesione dell'Astronomia tedesca tramite la Max Planck Gesellschaft. Denominato LBT (Large Binocular Telescope) sarà poi inaugurato nel 2004 (Fig. 14) presso il Mt. Graham International Observatory.

4. Conclusioni

In questa relazione si è tentato di dare una visione sintetica dello sviluppo della ricerca astronomica bolognese, tematica e strutturale, a iniziare dal 1960 e per i successivi tre decenni nel quadro delle grandi scoperte introdotte dalle nuove tecnologie che hanno completamente modificato, ampliandola, la conoscenza del cosmo. Questo ha portato all'insediamento di tre strutture che, assieme al ruolo insostituibile dell'Università tramite il Dipartimento di Fisica e Astronomia, rappresentano tuttora la forza trainante della ricerca astronomica bolognese ben radicata e apprezzata nel contesto nazionale e internazionale, come potrebbe essere meglio approfondito in un riepilogo storico degli ultimi tre decenni.

Bibliografia

- [1] Puppi G., Setti G., “Raggi cosmici”, *Enciclopedia del Novecento*, vol. V, Istituto dell’Enciclopedia Italiana Treccani, 1981, pp. 1910-1931.
- [2] Braccesi A., Ceccarelli M., “The Italian Cross Radiotelescope I – Design of the antenna”, Lettere alla Redazione, *Il Nuovo Cimento*, 23(1) (1962) 208-215.
- [3] Gelato G., Rosatelli C., Sinigaglia G., “The Italian Cross Radiotelescope II – Preliminary Design of the receiver”, *Il Nuovo Cimento*, 23(1) (1962) 254-257.
- [4] Setti G., “1960 and thereabout: the New Astronomy (Notes for a history still to be written)”, in *Cento Anni di Astronomia in Italia: 1860-1960*, Atti dei Convegni Lincei, vol. 217 (Bardi Editore, Roma, 2005) pp. 405-416.

L'Astrofisica Spaziale a Bologna: i primi passi e il suo sviluppo

Filippo Frontera*

1. Introduzione

L'Italia ha un'eccellente e lunga tradizione in Astrofisica Spaziale universalmente riconosciuta. Uno dei protagonisti di questa ricerca è senz'altro l'Istituto di Astrofisica Spaziale e Fisica Cosmica di Bologna (IASFBo), precedentemente chiamato ITESRE (Istituto di Tecnologie e Studio delle radiazioni Extraterrestri) e facente parte del CNR, ora invece è parte del nuovo Osservatorio di Astrofisica e Scienza dello Spazio (OAS) dell'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF).

La domanda che nasce spontanea è: come mai questa eccellenza a Bologna? Quali sono le motivazioni? Cercherò di rispondere a queste domande andando a ripercorrere i passi principali delle ricerche spaziali a Bologna dalla nascita fino al 1990, concentrandomi principalmente sulle ricerche fatte da questo istituto in Astronomia in raggi X, che ho vissuto per buona parte in prima persona.

Mi concentrerò pertanto su:

- motivazioni che hanno condotto alla nascita del gruppo "Bologna Ricerche Spaziali" (BORISPA);
- l'impatto sul BORISPA della nascita dell'Astronomia in raggi X;
- I passi principali del gruppo di Bologna nell'Astronomia in raggi X duri.

Molte informazioni sulle prime tappe dell'Astrofisica Spaziale a Bologna sono state estratte da una memoria del Prof. Domenico Brini su *Nascita e Sviluppo dell'Astronomia Sperimentale in raggi X duri a Bologna*, a cura della Biblioteca-Servizio di Documentazione dell'Area della Ricerca di Bologna del CNR (ottobre 1995).

* Eminente Studioso dell'Università di Ferrara, Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra. Associato dell'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF), Osservatorio di Astrofisica e Scienze dello Spazio (OAS) di Bologna

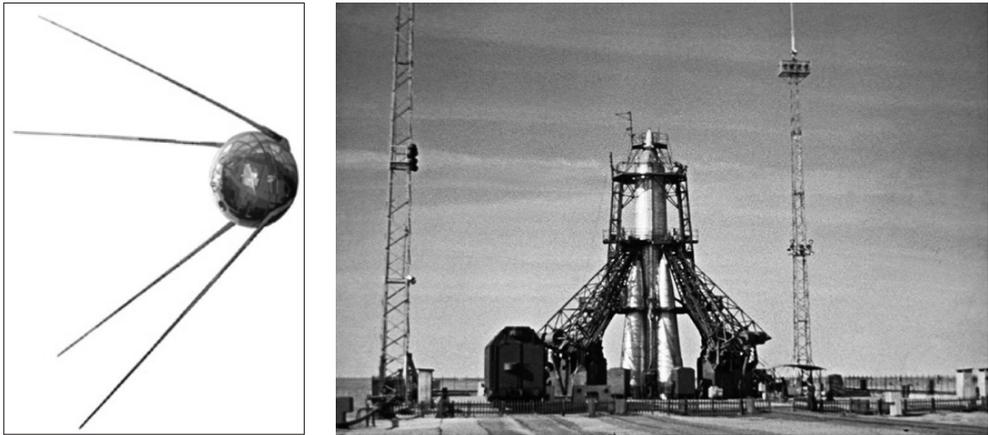


Figura 1. A sinistra: il satellite Sputnik-1. A destra: il lanciatore dello Sputnik-1 prima del lancio.

2. Ragioni che hanno condotto alla nascita del BORISPA

2.1 Nascita delle ricerche spaziali in USA e URSS

Le motivazioni furono principalmente la supremazia militare anche se ci si aspettava impagabili risultati scientifici e tecnologici. Si iniziò perciò, sia negli Stati Uniti che nell'allora Unione Sovietica, con lo sviluppo di razzi. I passi principali furono:

- 4 ottobre 1957: lancio del primo satellite orbitante attorno alla Terra (Sputnik-1) da parte dell'Unione Sovietica (Fig. 1). Uno degli importanti risultati scientifici fu la prima misura della densità atmosferica e delle trasmissioni radio.
- 31 gennaio 1958: lancio dell'Explorer-1 da parte degli Stati Uniti. Anche in questo caso si ebbe un risultato scientifico di grande portata: la scoperta delle fasce di radiazione di Van Allen.
- 5 marzo 1958: sotto la Presidenza di Dwight D. Eisenhower, venne costituita la National Aeronautics and Space Administration (NASA). Per confronto il CERN di Ginevra fu fondato nel 1961 e l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) fu fondata trent'anni dopo, nel 1988.

2.2 Nascita delle ricerche spaziali in Europa

Le tappe più importanti che hanno portato alla nascita delle ricerche spaziali in Europa furono le seguenti:

1. Il 16 dicembre 1958, in una lettera a Luigi Crocco, professore di Propulsione a Getto (Jet Propulsion) presso l'Università di Princeton (USA), Edoardo Amaldi (vedi Fig. 2, a sinistra) delineava l'idea di un'organizzazione europea nel campo dei razzi e satelliti simile al CERN nel campo delle particelle elementari. L'idea era

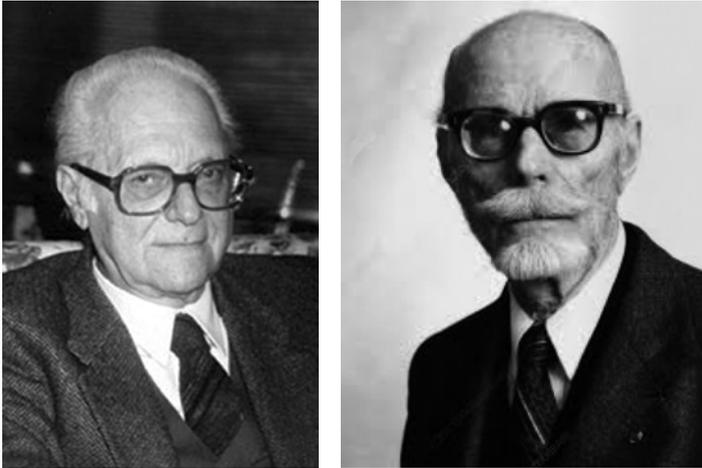


Figura 2. A sinistra: Edoardo Amaldi (1908-1989). A destra: Pierre Victor Auger (1889-1993).

- quella di iniziare in Europa un'attività in campo spaziale che non doveva essere né una competizione militare né tecnologica, ma solo scientifica.
2. Il 6 febbraio 1959, Edoardo Amaldi proponeva a Pierre Auger (Fig. 2, a destra) la realizzazione di un coordinamento della ricerca spaziale europea di tipo scientifico. P. Auger accettava l'idea e veniva stilato, a nome di entrambi, un documento intitolato "Space Research in Europe", che veniva inviato ai fisici più influenti in Europa. Il documento venne sostanzialmente condiviso da tutti.
 3. Nel gennaio 1960, in occasione della prima conferenza del COSPAR (Committee for Space Research costituitosi nel 1958 su iniziativa dell'International Council for Sciences, ora International Science Council), veniva ufficialmente approvata la proposta di costituire una Organizzazione Europea per le Ricerche Spaziali. Le nazioni immediatamente aderenti furono Francia, Italia, Olanda, Svezia e Regno Unito. Successivamente aderirono anche la Germania e la Svizzera.
 4. Il 14 giugno 1962 nascevano due organizzazioni europee: ELDO (European Launcher Development Organization) e ESRO (European Space Research Organization), con ratifiche governative nel 1964, con l'obiettivo di organizzare una Comunità Europea di Scienze Spaziali (European Space Science Community).
 5. Nel 1974, si ebbe la fusione dell'ELDO con l'ESRO e la costituzione dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA).

2.3 Tappe principali della ricerca spaziale in Italia

In sintonia con le decisioni a livello europeo, venivano prese importanti decisioni per far partire le ricerche spaziali in Italia:

1. Settembre 1959: il Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) costituiva la "Commissione Ricerche Spaziali" (CRS), i cui membri fondatori erano Edoardo

Amaldi (Roma), Giampiero Puppi (Bologna), Guglielmo Righini (Firenze), Nello Carrara (Parma), Luigi Broglio (Roma), Mario Boella (Torino), Corrado Casci (Milano). Nel 1961 veniva a far parte del CRS anche Giuseppe Occhialini.

Gli obiettivi del CRS erano i seguenti:

- identificare le competenze scientifiche nazionali utili per la gara spaziale europea;
 - identificare programmi scientifici fattibili in campo spaziale.
2. Nel 1959-60 si ebbero i primi finanziamenti per le attività spaziali, con un contributo da parte del CNR di 300 milioni di Lire per lo studio e realizzazione di carichi (payload) scientifici, e un contributo da parte dell'Aeronautica Militare di 500 milioni di Lire per l'acquisto di razzi e di strumentazione per la trasmissione dati a Terra (telemetria). Quest'ultimo finanziamento venne gestito da Luigi Broglio, che guidava la Scuola di Ingegneria Aeronautica (poi Aerospaziale) dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza".
 3. Nel maggio 1960, la Commissione guidata da Edoardo Amaldi suggeriva un programma preliminare di ricerche spaziali che prevedeva:
 - lo studio della componente neutronica dei raggi cosmici da affidare ai gruppi scientifici di **Bologna**, Roma e Parma;
 - il monitoraggio dei neutroni subito dopo l'occorrenza di flares solari da affidare ai gruppi di **Bologna** e Roma;
 - lo studio del comportamento della radiazione ionizzante con la quota da affidare a **Bologna**;
 - lo studio del comportamento dell'intensità della radiazione X e gamma durante i periodi di intensa attività solare da affidare al gruppo di **Bologna**;
 - misure dell'intensità degli elettroni nei raggi cosmici da affidare al gruppo di Roma;
 - misure della radiazione X di bassissima energia (1-1000 Å) e UV (1100-1345 Å) da affidare ai gruppi di **Bologna** e Firenze.

3. Nascita del BORISPA

Come ricaduta della partecipazione alla Commissione Ricerche Spaziali, per mettere Bologna in condizione di condurre le ricerche concordate nel campo spaziale, nel 1959 Giampiero Puppi (Fig. 3, a sinistra) proponeva a Domenico Brini (Fig. 3, a destra) di guidare la costituzione a Bologna di un laboratorio di ricerche spaziali. Brini accettava e si formava presso l'Istituto di Fisica un gruppo sperimentale, chiamato appunto BORISPA (BOlogna, Rlcerche SPAziali). I partecipanti al gruppo erano studenti del Corso di Specializzazione in Ingegneria Nucleare dell'Università di Bologna, alcuni tecnici della sezione di Bologna dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), alcuni ricercatori e tecnici neo-assunti dal CNR (il fisico Franco Fuligni, l'ingegnere elettronico Umberto Ciriegi e i tecnici elettronici Rodolfo Chiodi ed Elio Rossi).



Figura 3. A sinistra: Giampiero Puppi (1917-2006). A destra: Domenico Brini (1923-2008).

4. I primi esperimenti a quota di pallone del BORISPA

La primissima attività del gruppo fu lo sviluppo di strumentazione (circuiti a transistor, sistemi di trasmissione dati, ecc.) da qualificare a quote di palloni.

Nel 1960 il BORISPA lanciò il primo pallone sonda dal terrazzo dell'allora Istituto di Fisica in via Irnerio 46, che raggiunse una quota di 30 km. Durante il volo si poterono testare vari sistemi elettronici sviluppati per lavorare ad alta quota:

- una catena elettronica a basso consumo per processare e digitalizzare segnali analogici, come quelli, per esempio, provenienti da rivelatori di radiazione carica. Durante il volo fu usato come simulatore di segnali analogici un “baroswitch” usato per la misura della temperatura e umidità in funzione della pressione;
- una telemetria PCM per la trasmissione di segnali analogici;
- un trasmettitore AM a 108 MHz.

I dati trasmessi a Terra venivano ricevuti tramite un'antenna direzionale Yagi.

Nel febbraio 1961 il primo carico scientifico fu lanciato da Medicina, nelle vicinanze di Bologna. Esso includeva un contatore Geiger Müller (GM) di 6 cm² di area con lo scopo di studiare il comportamento dell'intensità della radiazione cosmica totale con la quota (Fig. 4). A questo lancio di pallone ne seguì un altro effettuato a luglio dello stesso anno che aveva a bordo 4 GM, per lo studio del comportamento della radiazione cosmica in presenza di un'intensa attività solare.

5. I primi accordi internazionali del gruppo BORISPA

Nell'aprile 1961, in occasione dell'International Space Science Symposium, tenutosi a Firenze, furono presi i primi contatti con colleghi stranieri. Il risultato fu che si poterono visitare alcuni laboratori di ricerche spaziali in Francia, dove, nel 1959, era stato fon-

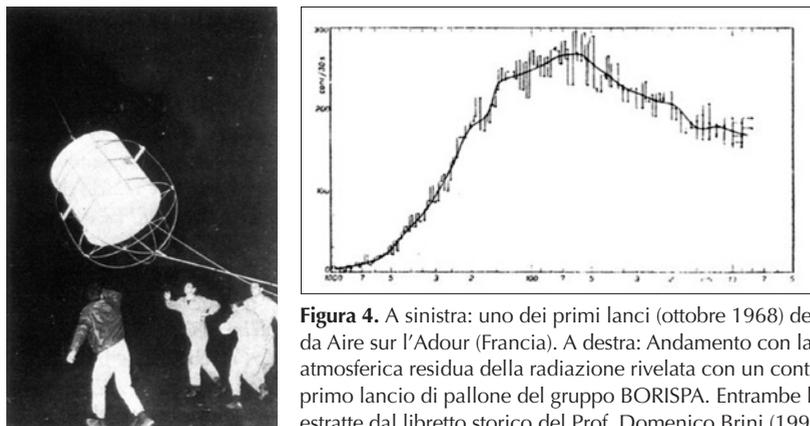


Figura 4. A sinistra: uno dei primi lanci (ottobre 1968) del gruppo BORISPA da Aire sur l'Adour (Francia). A destra: Andamento con la pressione atmosferica residua della radiazione rivelata con un contatore Geiger nel primo lancio di pallone del gruppo BORISPA. Entrambe le figure sono state estratte dal libretto storico del Prof. Domenico Brini (1995).

dato il Comité de Recherches Spatiales (CRS), da cui poi è scaturito il CNES (Centre National d'Etudes Spatiales), in Germania dove a Monaco nel 1958 era stato fondato il Max Planck Institute for Physics and Astrophysics, e in Olanda presso la Delft University of Technology.

Il risultato di questi contatti fu la nascita, nel 1961-62, di una collaborazione internazionale SPARMO (Solar Particles and Radiation Monitoring), cui aderirono, oltre che l'Italia, Francia, Germania e Olanda. Iniziò così un'attività di campagne di lancio di palloni, con lanci da Aire sur l'Adour (Landes, Francia) e stazioni di Terra oltre che a Aire sur l'Adour, anche a Bologna, appunto.

Ma nel 1962, ci fu un evento che portò il BORISPA a interrompere la sua collaborazione allo SPARMO: la nascita dell'Astronomia X.

6. Nascita dell'Astronomia in raggi X e l'impatto sul gruppo BORISPA

Nel dicembre 1962, con un articolo pubblicato su *Physical Review Letters* (Giacconi *et al.* 1962, vedi Fig. 5), un gruppo di 4 fisici sperimentali di cui tre di origine italiana, guidati da Bruno Rossi, con i primi tre (Riccardo Giacconi, Herbert Gursky e Frank Paolini) facenti parte di una piccola azienda ad alta tecnologia (American Science and Engineering Inc.) operante a Cambridge (Massachusetts, USA) mentre Bruno Rossi era professore al MIT, pubblicavano la scoperta inattesa di una intensa sorgente di raggi X (1.5-6 keV) nella costellazione dello Scorpione, chiamata Sco X-1, e della presenza di un'emissione X diffusa anch'essa inattesa. La scoperta era stata ottenuta mediante il lancio di un razzo con a bordo un piccolo contatore Geiger di 20 cm² di area, che aveva come obiettivo la misura della fluorescenza X dalla Luna, che non fu invece rivelata (fu poi rivelata 30 anni più tardi con il satellite tedesco ROSAT, Schmitt *et al.* 1991).

Prima di questa scoperta, tutti i tentativi rivolti a rivelare emissione X e gamma di origine celeste non avevano avuto successo. Non avevano avuto successo, per esempio, le



Figura 5. Frontespizio del lavoro di scoperta dell'Astronomia in raggi X.

misure fatte con un contatore a scintillazione a bordo del 3° satellite russo orbitante attorno alla Terra (si veda il lavoro di Vernov *et al.* 1959). Vi era un generale scetticismo che si potessero rivelare raggi X da stelle vicine e lontane, vista la bassa luminosità X del nostro Sole (1×10^{27} erg/s) che, riportata a una stella alla distanza di solo un 1 pc, corrispondeva a un flusso di 9×10^{-12} erg/cm² s, molto al di sotto delle sensibilità raggiungibili a quell'epoca.

Fu perciò una grande sorpresa quella di misurare una luminosità da Sco X-1 10 miliardi di volte maggiore di quella dal Sole. L'eccitazione era alle stelle e il gruppo BORISPA fu influenzato da questo risultato come lo furono tanti altri gruppi sperimentali nel mondo; si veda, per esempio, la storia dell'Astronomia in raggi X duri pubblicata dal sottoscritto in collaborazione con una ex-laureanda (Cavallari e FF 2017).

Gli obiettivi scientifici del gruppo BORISPA furono riconsiderati. Pur essendo interessati all'osservazione di sorgenti celesti di raggi X, risultava chiaro che, col budget a disposizione dal CNR, non era possibile svolgere un'attività osservativa nella banda dei raggi X di bassa energia (<10 keV), in quanto per tali osservazioni occorrevano veicoli molto costosi, come razzi e satelliti. Gli unici veicoli che a breve termine erano compatibili col budget disponibile erano i palloni stratosferici che consentivano di raggiungere quote di 30-40 km. Da queste quote era possibile rivelare solo raggi X duri (>20-30 keV).

Ma in questa banda si ponevano vari quesiti:

- esistevano raggi X duri di origine celeste? In caso positivo:

- qual era il loro flusso?
- qual era il loro spettro?
- come distinguere i fotoni di origine celeste da quelli prodotti nell'atmosfera terrestre?

Nonostante i dubbi e le incertezze, il gruppo BORISPA decise di entrare nel campo dell'Astronomia in raggi X duri.

Nel frattempo (1963) si costituiva, nell'ambito del CNR, il Gruppo Italiano di Fisica Cosmica (GIFCO) con lo scopo di coordinare e promuovere la Fisica Cosmica Italiana. Venivano istituite tre sezioni: una a Milano diretta da Occhialini, una a Bologna diretta da Brini e una terza a Roma diretta da Gratton. In tal modo il gruppo BORISPA diventò una sezione del GIFCO. In aggiunta, motivata dal programma di telecomunicazioni SIRIO, si costituiva, sempre all'interno del CNR, una Commissione Nazionale Spazio "Servizio Attività Spaziali", il cui primo direttore fu Livio Scarsi.

7. Il primo rivelatore di raggi X duri direzionale e i primi esperimenti di Astronomia in raggi X duri del gruppo di Bologna

Il primo rivelatore direzionale di raggi X duri realizzato del gruppo di Bologna consisteva in uno scintillatore inorganico di NaI(Tl) spesso 0.5 pollici circondato lateralmente da uno schermo passivo di piombo, a sua volta avvolto in uno scintillatore plastico. Sia lo scintillatore inorganico, che fungeva da rivelatore di raggi X duri, che lo scintillatore plastico, erano visti da un unico fotomoltiplicatore (PMT) (configurazione NaI/Pl, vedi Fig. 6). Per avere uno schermaggio dei raggi gamma dal basso, la guida di luce tra NaI(Tl) e PMT era fatta di vetro al Pb. La superficie del rivelatore esposta alla radiazione esterna era 5 cm² e il campo di vista 0.5 sr. La banda di lavoro era la classica banda per raggi X duri: 20-200 keV.

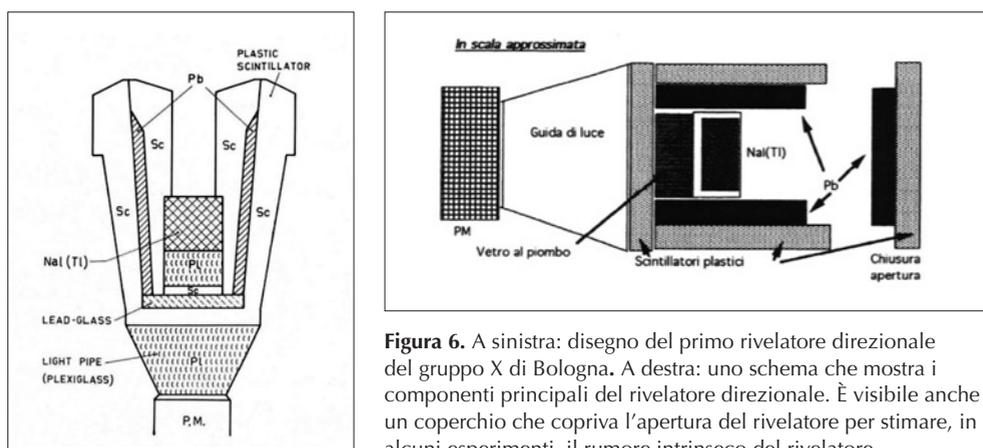


Figura 6. A sinistra: disegno del primo rivelatore direzionale del gruppo X di Bologna. A destra: uno schema che mostra i componenti principali del rivelatore direzionale. È visibile anche un coperchio che copriva l'apertura del rivelatore per stimare, in alcuni esperimenti, il rumore intrinseco del rivelatore.

Era il primo esempio di una configurazione di rivelatore che, successivamente, una volta sostituito il plastico con uno scintillatore inorganico (come CsI attivato al tallio o al sodio) fu chiamata phoswich (= PHOSphor SandWICH).

La configurazione NaI/PI fu pubblicata nel 1964 da D. Brini, U. Ciriegi e F. Fuligni su una rivista del CNR (*La Ricerca Scientifica*) e divenne il cavallo di battaglia del gruppo di Bologna. Essa fu impiegata per esperimenti da pallone, per esperimenti con razzo e per esperimenti da satellite.

7.1 I primi esperimenti da pallone per Astronomia X duri (20-200 keV)

I primi tre esperimenti furono volati nell'estate del 1964, con lanci dall'aeroporto di Bologna. Essi furono dedicati allo studio del fondo X intrinseco del rivelatore, quello atmosferico in quota (circa 5 mbar) e il fondo X primario in raggi X duri. La strategia fu quella di avere sulla stessa navicella 3 rivelatori direzionali, uno rivolto verso il cielo, un altro verso la Terra e un terzo completamente schermato. I risultati furono positivi e pubblicati in riviste internazionali, come quello sul fondo atmosferico pubblicato su *Journal of Geophysical Research* (Brini, Ciriegi *et al.* 1965). Nel 1966 fu fatto un volo per studiare l'efficienza del sistema di anticoincidenza nella riduzione del fondo intrinseco del rivelatore.

La ricerca di sorgenti celesti di raggi X duri iniziò nel 1965-66 con lanci di pallone da Aire sur L'Adour (Francia) e usando il rivelatore di cui sopra con un campo di vista di 16° . Per esplorare un'ampia faccia di cielo, il rivelatore era inclinato di un angolo zenitale di 30° e ruotava attorno allo zenith con un periodo di circa 6 min.

Furono misurati eccessi di conteggio dalla regione che includeva Cyg X-1 e Cyg X-2 e da una regione che includeva Ser X-1, tutte sorgenti scoperte a bassa energia con esperimenti su razzi.

I risultati furono pubblicati su riviste internazionali (Brini *et al.* 1965, Brini *et al.* 1967). Era sorprendente il fatto che gli spettri erano leggi di potenza, mentre i risultati a bassa energia erano anche compatibili con spettri di corpo nero.

7.2 Esperimenti del BORISPA a bordo di razzi dedicati allo studio del fondo cosmico primario in 20-200 keV

Grazie al successo ottenuto con i voli da pallone, il gruppo di Bologna ebbe approvata anche una campagna osservativa a bordo di razzi dell'appena costituito ESRO per lo studio del fondo cosmico primario (Cosmic X-ray Background, CXB). La campagna fu di 4 lanci di cui 2 con successo (maggio 1967 e ottobre 1969). In questo caso vennero usate più unità di rilevazione (Fig. 7) inclinate di 45° , ciascuna avente la solita configurazione NaI/PI, ma area utile maggiorata (20 cm^2) e campo di vista di 30° . Nell'esperimento volato nel maggio 1967 vi erano 4 unità di rivelazione, di cui una completamente schermata per misurare il fondo intrinseco del rivelatore, mentre in quello volato nell'ottobre 1969 vi erano 5 unità. Nonostante la breve durata delle osservazioni (circa 300 s), si poté misurare lo spettro del CXB negli X duri e lo spettro dell'albedo terrestre (vedi Fig. 7). Il gruppo di Bologna contribuì in modo signifi-

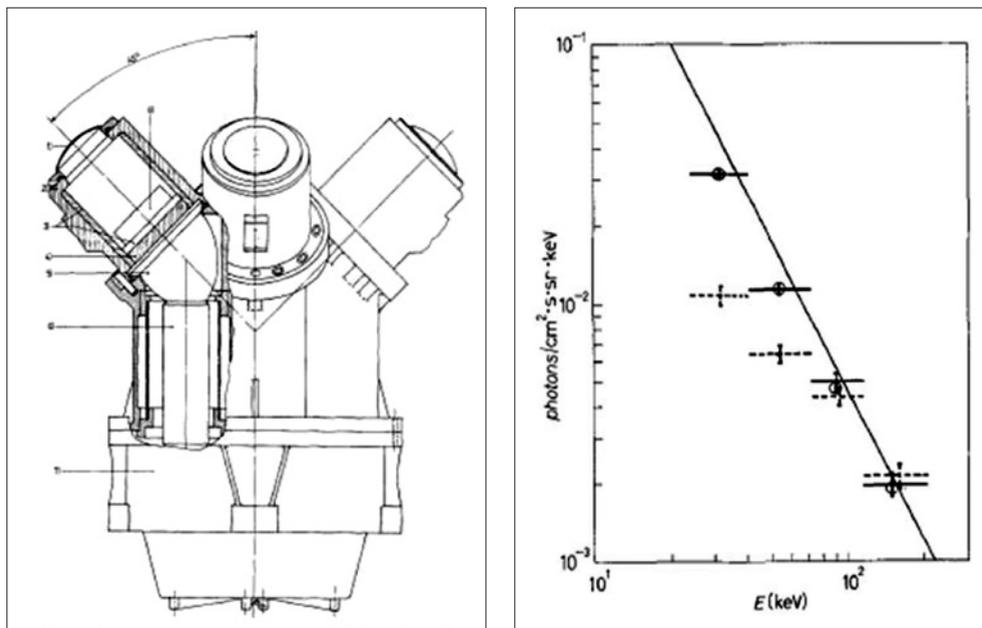


Figura 7. A sinistra: esperimento volato dal gruppo di Bologna a bordo di un razzo Skylark S11 dell'ESRO nel maggio 1967 dalla base di Perdasdefogu in Sardegna. A destra: risultati ottenuti sul CXB (tratti e linea continui). Linee tratteggiate: misura dello spettro dell'albedo X dalla Terra (Horstman-Moretti, Fuligni, Brini 1971).

cativo alla comprensione del CXB negli X duri, come risulta dal famoso articolo di rassegna di Horstman *et al.* (1975) e come anche discusso nel nostro articolo storico sull'Astronomia nei raggi X duri (Cavallari e Frontera 2017).

7.3 Esperimento del BORISPA a bordo del satellite NASA OSO-6

Il successo ottenuto con gli esperimenti da pallone e su razzi fu accompagnato da un ulteriore successo: l'approvazione nel 1965 di un esperimento in raggi X duri a bordo del satellite NASA OSO-6. I satelliti OSO (Orbiting Solar Observatory) erano dedicati allo studio del Sole, ma, allo scopo di garantire il puntamento degli strumenti dedicati a tale studio, era prevista una sezione rotante detta Ruota (wheel) che provvedeva alla stabilità del satellite mediante giroscopi (Fig. 8). L'esperimento di Bologna era previsto essere ubicato in uno dei settori della Ruota, che ruotava alla velocità angolare di 0.5 rps. L'esperimento era basato sempre su un rivelatore del tipo NaI/Pl, con un'area utile di 5 cm², e un campo di vista di 17×23 gradi (FWHM). I dati venivano raccolti in 4 canali di energia (Brini, Evangelisti *et al.* 1971).

Il satellite fu lanciato il 9 agosto 1969 e fu operativo fino a gennaio 1972. Vari risultati furono ottenuti con l'esperimento di Bologna, il primo interamente italiano a bordo di un satellite. Tra i risultati, vi fu anche l'osservazione di Gamma Ray Bursts (GRBs), vedi Fig. 8, (p.es., Palumbo *et al.* 1974, Pizzichini *et al.* 1975), la cui scoperta era stata annunciata solo 2 anni prima da Klebesadel *et al.* (1973).

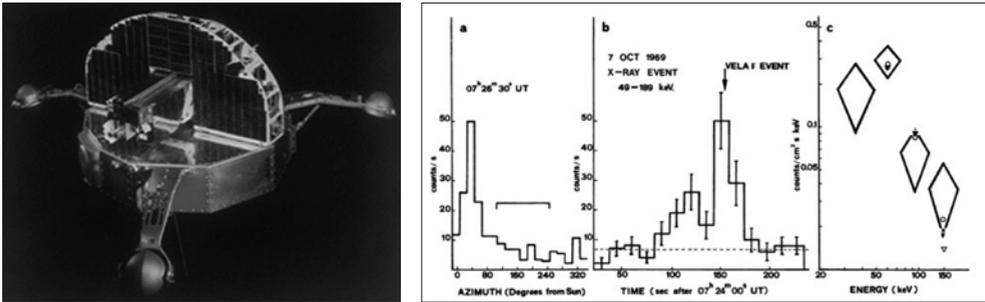


Figura 8. A sinistra: il satellite NASA OSO-6 sulla cui ruota fu ubicato l'esperimento in raggi X duri del gruppo di Bologna. A destra: uno dei GRBs osservato il 7 ottobre 1969 con l'esperimento di Bologna su OSO-6 (Palumbo *et al.* 1974).

8. Nascita del Laboratorio TESRE

Nel 1968 ci furono importanti trasformazioni strutturali delle sezioni GIFCO ormai cresciute. Su proposta del Comitato per la Fisica (presidente G. Puppi), il CNR approvò la costituzione di quattro Laboratori in cui confluirono le sezioni GIFCO: il Laboratorio di Fisica Cosmica e Tecnologie Relative (LFCTR) a Milano, il Laboratorio di Cosmogeofisica a Torino, il Laboratorio di Astrofisica Spaziale (LAS) a Frascati e il Laboratorio di Tecnologie e Studio delle Radiazioni Extraterrestri (LTESRE) a Bologna, con una sezione a Firenze. Nel LTESRE confluirono i gruppi BORISPA e OVRARCO guidato da Menotti Galli per il monitoraggio delle variazioni dei raggi cosmici a Terra, più un gruppo (diretto da Alberto Bonetti con collaboratore principale Francesco Melchiorri), che operava a Firenze ed era dedicato allo sviluppo di tecnologie per la rivelazione di radiazione cosmica di fondo nell'infrarosso.

Nei primi anni Ottanta i laboratori CNR furono trasformati in Istituti CNR e, ancora prima, la sezione di Firenze del TESRE si staccò per entrare nell'Istituto di Ricerca per le Onde Elettromagnetiche (IROE) del CNR.

Con la nascita del TESRE e la possibilità di nuove assunzioni di personale, negli anni Settanta, in aggiunta alla linea di ricerca in Astronomia in raggi X duri, anche altre attività di ricerca sorsero all'interno dell'istituto. Cito le due più importanti:

- lo sviluppo di rivelatori di raggi gamma di energia superiore a 200 keV, che era l'estremo superiore della banda (20-200 keV) cavallo di battaglia del gruppo di Bologna. Questo sviluppo, voluto dal Prof. Brini, primo direttore del TESRE, fu poi guidato da Guido Di Cocco. Lo sviluppo portò a un primo lancio di pallone da Palestine (Texas) nel 1978 e successivamente, attraverso collaborazioni con LFCTR di Milano (G. Villa), LAS di Frascati (P. Ubertini) e il gruppo gamma dell'Università di Southampton (UK) guidato da Tony Dean, portò a ulteriori sviluppi (es. ZEBRA) e alla partecipazione, col ruolo di PI di uno dei piani di rivelazione (PICsIT) dell'esperimento IBIS, al satellite ESA INTEGRAL (Di Cocco *et al.* 2003). La tecnologia sviluppata per IBIS è stata poi applicata per il mini-calorimetro del satellite AGILE;

- lo sviluppo di strumentazione da Terra e per lo spazio nell'infrarosso. Lo sviluppo iniziò sotto la guida di Giorgio Palumbo e, dopo poco tempo, di Reno Mandolesi, con collaborazioni anche internazionali (per es., con il Lawrence Berkeley Laboratory). Tale sviluppo portò alla CoI-ship della camera infrarossa a bordo del satellite ISO e, molto più importante e più recente, alla PI-ship dello strumento di bassa frequenza (Low Frequency Instrument, LFI) a bordo del satellite Planck (es., Mandolesi *et al.* 2000).

Io però continuerò il mio excursus storico nell'ambito dell'Astronomia in raggi X duri (il cosiddetto Gruppo X).

9. Seconda generazione di esperimenti per raggi X duri

Pur essendo stato positivo lo sviluppo del rivelatore NaI/PI per l'ingresso nell'Astronomia in raggi X duri, sulla base dei risultati ottenuti, specie con palloni, risultò chiaro che occorreva aumentare significativamente la sensibilità degli esperimenti. Questo richiedeva non solo lo sviluppo di un nuovo concetto di rivelatore (Fig. 9) ma anche la necessità di aumentare la durata delle osservazioni delle singole sorgenti. Ero entrato da un anno nel gruppo come borsista del Prof. G. Puppi, dopo una tesi di laurea di tipo teorico su "Meccanismi di emissione dei raggi X e gamma in Astrofisica", relatori Prof. Domenico Brini e Dott. Daniele Catani. In realtà fui affidato a D. Catani, un teorico esperto di plasm e magnetoidrodinamica. Con la scoperta di emissione X da Sco X-1 e di altre sorgenti X, come la Crab Nebula, anche in raggi X duri, la tesi era di interesse per il gruppo BORISPA e di attualità (1965-66) in generale. Lo scopo era di capire i meccanismi che potevano consentire, per esempio, a una sorgente come la Crab Nebula che emetteva raggi X duri con spettro non termico di poterlo fare per quasi 1000 anni (1054: anno di esplosione della supernova). Occorreva un meccanismo di accelerazione continua degli elettroni (le pulsar non erano state ancora scoperte). Nella tesi si suggerivano processi di accelerazione di particelle cariche (principalmente elettroni), per esempio, in punti neutri di campi magnetici.

Ma in quel periodo la competizione internazionale era più accentuata in ambito sperimentale (nascevano gruppi sperimentali un po' ovunque, vedi Cavallari e Frontera 2017). Accettai perciò volentieri la proposta di Brini di occuparmi dello sviluppo di un nuovo sistema di rivelazione di raggi X, avendo come mentore Franco Fuligni. La ricerca teorica fu successivamente portata avanti da Giacomo Cavallo, che si era occupato all'UCSD di San Diego (USA), insieme a R. J. Gould, della produzione di raggi gamma di origine celeste da decadimento di pioni neutri (Cavallo e Gould 1971).

Lo sviluppo sperimentale affidatomi portò a una configurazione di telescopio non focalizzante (vedi Fig. 9) che si basava sull'impiego di uno scintillatore di grande area di NaI(Tl) ben schermato lateralmente e dal basso. Lo schermo era semi-attivo, costituito, lateralmente, di piombo più scintillatore plastico in anticoincidenza con il rivelatore

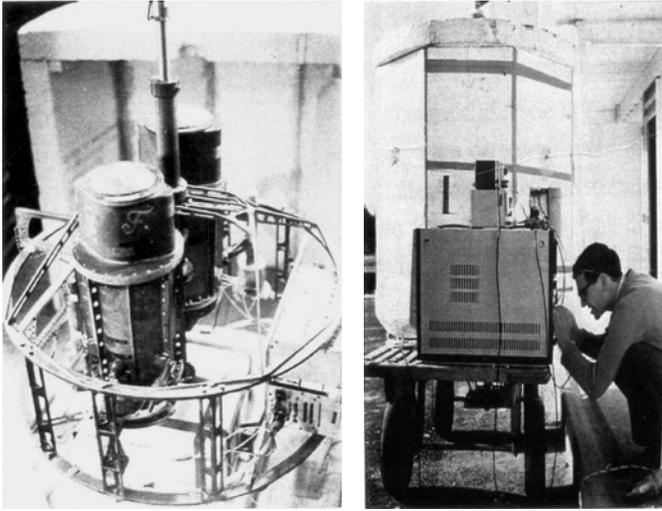


Figura 9. A sinistra: la navicella in fase di assemblaggio per il volo del 1968, in cui è visibile uno dei due rivelatori pronti per essere lanciati. A destra: foto che mi ritrae mentre stavo effettuando le calibrazioni pre-lancio dell'esperimento del 1970 mediante un multicanale Laben, all'epoca uno strumento prezioso per lo studio degli spettri in energia dei rivelatori X.

principale, e con guida di vetro al piombo tra scintillatore e PMT. Il rivelatore nella direzione di arrivo dei fotoni, era sormontato da un collimatore a schermo graduale (lastre di Pb ricoperte, su entrambe le facce, con uno strato di Sn seguito da uno di Cu) con risposta triangolare e campo di vista di 13° (FWHM).

Gli altri sviluppi effettuati nel corso del 1969 riguardavano una nuova elettronica di acquisizione dei dati e di trasmissione analogica, il controllo termico della strumentazione e lo sviluppo di una piattaforma stabilizzata che consentiva l'inseguimento di una sorgente in azimuth, pur tenendo costante la distanza zenitale del telescopio.

10. Lanci con pallone della nuova generazione di esperimenti in raggi X duri

10.1 Test del rivelatore con l'osservazione di alcune quasar

Il test del nuovo rivelatore fu effettuato nel 1969 con due voli di pallone, con durata utile di circa 3.5 ore il primo e circa 2 ore il secondo, entrambi lanciati da Aire sur L'Adour (Francia) (vedi Fig. 4, a sinistra) e impiegando due unità di rivelazione indipendenti e parallele con asse verticale e un'area complessiva di 130 cm^2 . I rivelatori erano tenuti alla pressione atmosferica al suolo per evitare scariche elettriche nell'alimentazione di alta tensione. La navicella in fase di assemblaggio è mostrata in Fig. 9, a sinistra. Insieme ai rivelatori fu lanciato anche un contatore GM per il monitoraggio del fondo di particelle. Nonostante fossero tecnologici, nel primo volo si cercò di osservare il transito di 2 quasar (3C186 e 3C196) e nel secondo volo 3C180. Le quasar erano state scoperte da poco ed era legittimo chiedersi se erano anche sorgenti di raggi X.

I rivelatori e tutti i sottosistemi si comportarono in modo nominale, ma i risultati scientifici del primo volo (il secondo durò troppo poco) risultarono enigmatici. L'andamento nel tempo del conteggio mostrava delle variazioni che potevano essere

attribuite al transito delle 2 quasar. Ebbi la fortuna di discutere la cosa con Bruno Rossi in occasione di una scuola estiva a Erice che si tenne nel 1969. Bruno (così voleva essere chiamato) mi consigliò di studiare possibili effetti di modulazione del fondo dovuti al cambiamento della latitudine geomagnetica durante il volo. Il suggerimento fu fondamentale: l'andamento del conteggio era effettivamente dovuto a un effetto latitudine, e si poterono dare solo limiti superiori al flusso dalle 2 quasar (Brini, Frontera e Fuligni 1970).

10.2 Osservazione della pulsar NP0532 nella Crab Nebula

Il primo volo solo scientifico, che sfruttava tutti gli sviluppi tecnologici effettuati nel 1969, fu effettuato nel 1970. Lo scopo era l'osservazione della pulsar NP0532 nella Crab Nebula. Le pulsar erano state appena scoperte (1968) e c'era grande curiosità di capire l'origine della radiazione X osservata a bassa energia. L'emissione X a bassa energia da NP0532 era stata appena scoperta ed era importante studiare spettro e curva di luce ad alta energia. Effettuammo un lancio di pallone il 23 giugno 1970 quando il Sole aveva coordinate celesti molto vicine a quelle della Crab, per cui inseguendo il Sole si riusciva a inseguire la pulsar. I risultati (Fig. 10) furono di grande rilievo (si poté studiare sia la curva di luce della pulsazione di NP0532 che il suo spettro) e furono pubblicati su *Nature Physical Science* (Brini, Cavani, Frontera e Fuligni 1971; Cavani, Frontera, Fuligni e Brini 1971).

Nello stesso volo potemmo osservare anche la pulsar radio NP0527, da cui non osservammo nessuna emissione X. Anche in questo caso sottoponemmo il lavoro a *Nature Physical Science*, il cui referee ci imponeva di citare un lavoro che noi ritenevamo sbagliato (come fu successivamente confermato), in cui gli autori sostenevano di aver rivelato un'emissione X da NP0527. Ritirammo il lavoro quando *Nature* ci obbligò a tale citazione pena la non pubblicazione. Pubblicammo il lavoro sulle *Lettere al Nuovo Cimento* (Frontera *et al.* 1972).

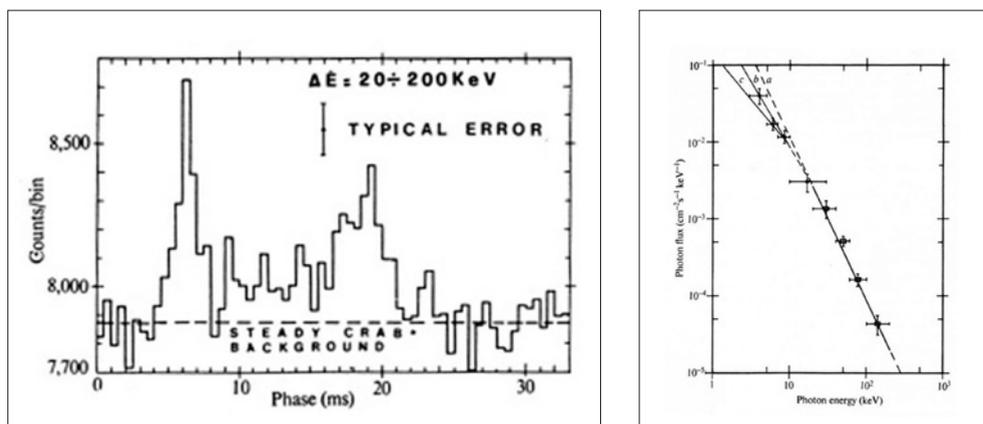


Figura 10. A sinistra: curva di luce della pulsazione di NP0532 (Brini *et al.* 1971). A destra: spettro misurato della pulsar NP0532 (curva a). Curve b e c: spettri misurati da altri gruppi. (Cavani *et al.* 1971).

10.3 Esperimenti da pallone 1971, 1972, 1973 e 1974 dedicati principalmente allo studio di Cygnus X-1, Cygnus X-3 e Perseus Cluster

Una delle sorgenti più enigmatiche osservate in raggi X di bassa energia con razzi prima e col satellite UHURU poi, era senz'altro Cygnus X-1, la prima sorgente celeste candidata essere una black hole nella nostra Galassia. Allo scopo di studiarne spettro e variazioni temporali nei raggi X duri, effettuammo tre lanci da pallone (20 settembre 1971, 30 giugno 1972, 30 giugno 1973). Nel volo del 1971 adottammo la stessa configurazione dell'esperimento impiegata per l'osservazione della pulsar NP0532 (due unità di rivelazione, ciascuna con area utile di 65 cm^2 e inseguimento in azimuth). Invece nei voli del 1972 e 1973, allo scopo di aumentare l'area utile, svilupparammo un rivelatore che, pur essendo concettualmente simile a quello precedente, faceva uso di un cristallo scintillatore di NaI(Tl) con un'area utile maggiore (280 cm^2). Anche in questi voli osservammo la sorgente con inseguimento in azimuth. Tutti i voli ebbero successo e pubblicammo vari risultati ottenuti da queste osservazioni. Quello più interessante fu una scoperta inattesa: la presenza di una quasi-periodicità (QPO) con frequenza del centroide a $5.75 \times 10^{-2} \text{ Hz}$ nell'emissione X dura da Cygnus X-1 (Fig. 11), ottenuta con tecniche di Fourier, che a quel tempo (1973) erano poco utilizzate in astronomia X, ma di cui noi avevamo acquisito ottima conoscenza grazie a una collaborazione con Menotti Galli, che applicava tali tecniche allo studio dei raggi cosmici. I risultati, anche se furono pubblicati su *Astrophysical Journal Letters* (Frontera e Fuligni 1975) non furono tenuti in grande considerazione per vari anni in lavori teorici. Remo Ruffini, che difendeva questi risultati in una conversazione con Martin Rees, ci riferì che quest'ultimo era scettico sulla nostra scoperta trattandosi di un "Italian balloon". La soddisfazione venne quando tali oscillazioni furono osservate nel 1992 dall'esperimento BATSE a bordo del satellite CGRO e dall'esperimento SIGMA a bordo della MIR Kvant (IAU Circ. 5576, 1992). Ero a Washington in occasione di un congresso del COSPAR (World Space Congress) quando furono presentati per la prima volta questi risultati da Chryssa Kouveliotou (gruppo BATSE) come una scoperta di grande rilevanza

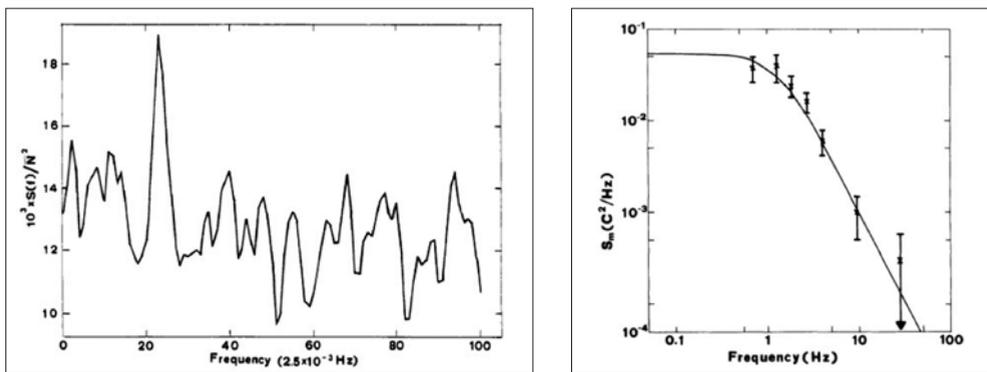


Figura 11. A sinistra: scoperta dei QPO a bassa frequenza ($5.75 \times 10^{-2} \text{ Hz}$) dalla candidata black hole Cyg X-1 (Frontera e Fuligni 1975). A destra: scoperta di emissione X dura durante un flare solare del tipo shot noise, con tempo caratteristico degli impulsi (shot) di 120 ms (Frontera e Fuligni 1979). I singoli impulsi furono successivamente osservati con il satellite NASA SMM (Solar Maximum Mission).

astrofisica (Kouveliotou *et al.* 1993). Alla fine della presentazione mi alzai per far presente che la scoperta di tali oscillazioni era stata già fatta 17 anni prima da noi e che era stata pubblicata in *Astrophysical Journal Letters*. Ci fu un po' di disappunto da parte americana, mentre Rashid Sunyaev, uno dei più eccellenti astrofisici russi che aveva anch'esso trovato tale risultato con SIGMA, durante il suo intervento si congratulò pubblicamente per il nostro lavoro. La nostra scoperta è ora riconosciuta (es., Van der Klis 1995).

Un altro risultato importante che desidero menzionare è la scoperta di una variabilità temporale non poissoniana dei raggi X duri emessi dai flare solari. Durante un volo del 6 luglio 1974, dedicato all'osservazione della regione del Perseus Cluster, un flare solare entrò nel campo di vista del nostro strumento (280 cm² di area utile) attraverso la diffusione in atmosfera. La stima della densità di potenza spettrale (PSD), già sperimentata per Cygnus X-1, consentì di stabilire che la radiazione X dura emessa durante il flare a breve scala di tempo (0.5-50 Hz) non seguiva una statistica poissoniana, ma era compatibile con una sovrapposizione di impulsi (shot noise) con tempo caratteristico pari a 120 ms. Il lavoro fu pubblicato su *Astrophysical Journal* (Frontera e Fuligni 1979). Successivamente la missione SMM (Solar Maximum Mission) della NASA, lanciata nel 1980 e attiva per 9 anni, confermò le nostre aspettative, scoprendo una struttura temporale a impulsi dei flares.

Mi piace ricordare anche un altro risultato ottenuto dal volo di pallone del 30 giugno 1972: la ricerca in raggi X duri della modulazione di 4.8 ore da Cyg X-3 osservata all'epoca solo a bassa energia (<7 keV). Tale ricerca fu l'argomento della tesi della laureanda Luigina Feretti, ora collega dell'Istituto di Radioastronomia di Bologna, che portò a un lavoro (Feretti *et al.* 1975) che fu pubblicato nel 1975 su *Astrophysical Journal Letters*, una rivista internazionale che inserì il nostro lavoro in un depliant avente lo scopo di pubblicizzare la rivista.

Menziono infine la scoperta di correlazioni su scala di tempo di 100 μ s nel fondo locale di particelle cariche che interagivano con lo scintillatore plastico di anticoincidenza (Cavani *et al.* 1974) (Fig. 12). Il risultato ci lasciò di stucco, in quanto ci aspettavamo che il fondo di particelle cariche avesse una distribuzione poissoniana, che invece non era. Quel risultato rimane ancora non chiarito.

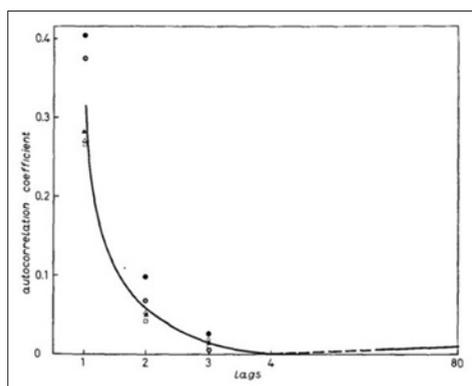


Figura 12. Funzione di autocorrelazione (misurata in hardware) in funzione dei ritardi temporali (in unità di 100 μ s) di una serie temporale di singole interazioni del fondo locale di particelle cariche con lo scintillatore plastico di anticoincidenza, ottenuta durante il volo di pallone lanciato il 6 luglio 1974 da Gap (Francia) (Cavani *et al.* 1974).

10.4 Il volo transatlantico del 1976

Grazie a un accordo tra CNR-Servizio Attività Spaziali e Rutherford Appleton Laboratory (UK) che aveva la responsabilità della telemetria e acquisizione dati a Terra, si poté organizzare nell'estate 1976, quando i venti alla quota di circa 40 km soffiano in modo laminare da est verso ovest, un volo di pallone stratosferico di lunga durata dalla Sicilia agli Stati Uniti. Il lancio fu effettuato dalla base di Trapani Milo (Lat = 38°) il 29 luglio. Lo scopo del volo era quello di fornire alla comunità spaziale italiana l'opportunità di osservare il cielo per un periodo decisamente lungo per un pallone (una settimana). Gli esperimenti a bordo furono quattro: tre esperimenti di Astronomia in raggi X duri (LTESRE Bologna, LAS Roma e LFCTR-sezione di Palermo) e un esperimento di Astronomia Infrarossa dell'Istituto di Ricerca sulle Onde Elettromagnetiche (IROE) di Firenze (ex Sezione LTESRE di Firenze).

L'esperimento di Bologna (Fig. 13) era costituito di due rivelatori direzionali a distanza di 4 m ma con assi paralleli diretti verso lo zenit, con un campo di vista di 14°, un'area utile complessiva di 525 cm² e una banda di lavoro in 20-300 keV. Purtroppo le trasmissioni erano molto limitate: si potevano trasmettere 96 bit al secondo. Data questa limitazione, si decise di trasmettere in modo continuo gli spettri di energia in 64 canali integrati su 106 s e i conteggi in 2 canali (20-150 keV e 150-300 keV) integrati su 0.8 s. In aggiunta si avevano le informazioni tecnologiche (housekeeping): temperatura, tensioni, ecc.

Il volo ebbe una durata di 5 giorni, ma quella utile fu di 75 ore (3.1 giorni) con collegamento radio da almeno una delle tre stazioni di Terra previste per l'acquisizione dati con link HF (Trapani, Palma di Maiorca e Chesapeake Beach (MD, USA)). Purtroppo, nell'ultima parte di volo, in vicinanza della costa est degli USA, si perse il contatto radio per cui si decise di inviare telecomandi di sgancio della navicella dal pallone, che ebbero successo. La navicella fu trovata dopo vari mesi galleggiante nel Nord Atlantico, nei pressi della Groenlandia.

Ottenemmo diversi risultati, tutti pubblicati su riviste internazionali. Per rivelare il transito delle sorgenti X, fu fondamentale lo studio del comportamento del fondo strumentale in quota che variava durante il volo al variare della latitudine geomagnetica (Frontera *et al.* 1981a, vedi Fig. 14).



Figura 13. L'esperimento di Bologna già assemblato col suo schermo termico, prima di essere integrato nella navicella per il volo transatlantico.

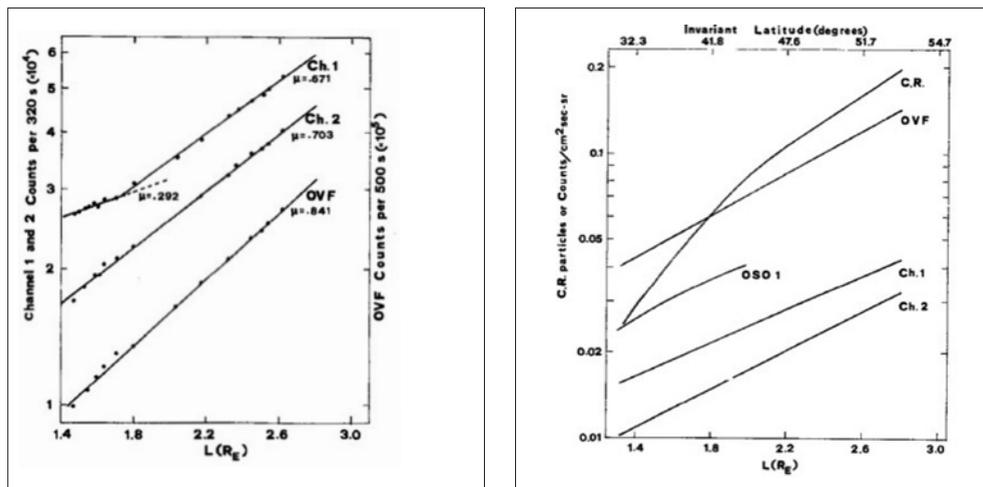


Figura 14. A sinistra: dipendenza del fondo strumentale, nei canali 1 (20-150 keV), 2 (150-300 keV) e di overflow (>300 keV), dal parametro di McIlwain che è legato alla latitudine geomagnetica da una legge di potenza. A destra: confronto fra i nostri risultati e quelli ottenuti coi raggi cosmici (RC) e con l'esperimento gamma (50 keV- 3 MeV) a bordo del satellite OSO 1. Si vede che col crescere dell'energia la dipendenza tende a quella mostrata dai RC. Figure estratte da Frontera *et al.* (1981a).

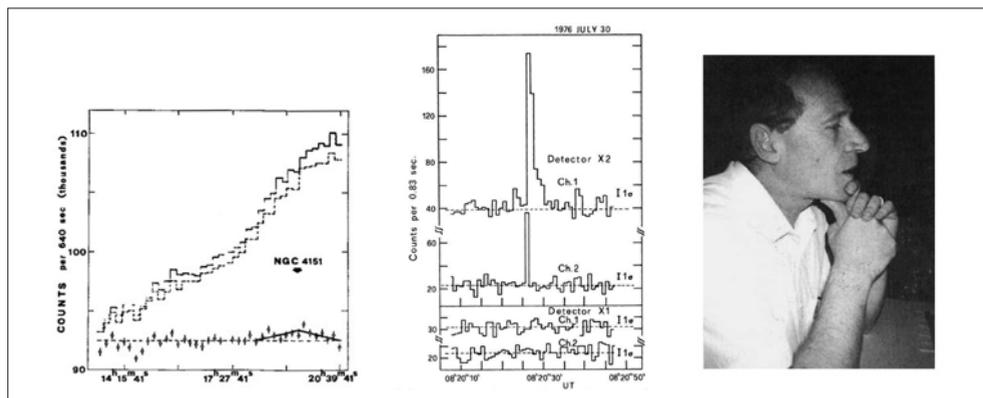


Figura 15. A sinistra: andamento del fondo strumentale durante circa 6 ore di volo e il fondo corretto per l'effetto latitudine e le variazioni di pressione. Dopo la correzione, è evidente il transito della galassia di Seyfert NGC4151 nel campo di vista dello strumento. Da Frontera *et al.* 1981a. Al centro: uno dei tre pseudo GRB di durata 4 s, osservato durante il volo transatlantico del 1976. Da Frontera *et al.* 1981b. A destra: Franco Fuligni (1938-1995), uno degli astrofisici sperimentali più autorevoli del gruppo BORISPA (prima) e del LTESRE (poi).

Una volta corretto il fondo per l'effetto latitudine, il transito delle sorgenti era perfettamente misurabile (vedi esempio mostrato in Fig. 15). Tra le sorgenti osservate, menziono la scoperta di emissione di raggi X duri da una galassia di Seyfert 1 (MCG 8-11-11, Frontera *et al.* 1979), la prima Seyfert dopo quella già nota NGC 4151; la scoperta di una sorgente X transiente (Fuligni *et al.* 1979); la rivelazione di pseudo Gamma Ray Burst di durata >4

s (Frontera *et al.* 1981b, Fig. 15). Quest'ultimo risultato era inaspettato: furono rivelati eventi transienti solo da uno dei due rivelatori e non sempre lo stesso. L'interpretazione fu che essi erano dovuti all'interazione di singole particelle cariche (tipo nuclei di ferro) di alta energia che provocavano una fosforescenza nello scintillatore, determinando il fenomeno osservato. Quel risultato fu molto importante in quanto ci guidò nel tipo di sistema di rivelazione da adottare successivamente per l'osservazione di GRB.

Con la conclusione dell'analisi dati del volo transatlantico, terminò la collaborazione col mio amico e maestro Franco Fuligni (Fig. 15), che nel frattempo si era trasferito all'Istituto di Fisica del Plasma Interplanetario del CNR di Frascati per lavorare in un campo di grande fascino: la rivelazione di onde gravitazionali. Purtroppo, a causa di una grave malattia, non poté vedere i risultati di questi ultimi tempi. Morì prematuramente all'età di 57 anni. Ho avuto il privilegio di lavorare con lui per oltre 10 anni, potendone apprezzare le sue qualità professionali, la sua profonda conoscenza della Fisica, la sua serietà, le sue capacità sperimentali. Non abbiamo mai dovuto rivedere i nostri risultati.

11. L'esperimento "X Grande": la maturità

Con l'esperimento del 1976, si chiudeva la seconda generazione di esperimenti da pallone. Nonostante gli ottimi risultati ottenuti, era urgente aumentare la sensibilità, migliorare la risoluzione energetica e la risoluzione angolare del telescopio per far fronte a studi più raffinati in raggi X duri di sorgenti che a bassa energia venivano scoperte con satelliti, come Ariel V, SAS C e HEAO-1 (si veda il nostro articolo storico Cavallari e FF 2017), in particolare le pulsar X, il cui meccanismo di emissione e la relativa geometria era una delle questioni aperte dell'astrofisica delle alte energie. In raggi X duri, da Her X-1 era stata scoperta con pallone del gruppo AIT/MPE (Università di Tübingen con Max Planck) la prima riga di ciclotrone (Trümper *et al.* 1978).

Sviluppammo così un nuovo esperimento, "X-Grande", operante nella solita banda 20-200 keV. Era costituito di una matrice di 4×4 scintillatori indipendenti spessi $\frac{1}{2}$ pollice, eccetto due (3 mm), visti ognuno da un PMT attraverso una guida di vetro al piombo, e sormontati ciascuno da un collimatore con risposta triangolare e campo di vista di 9° (Fig. 16). La superficie utile complessiva era di 1455 cm^2 , tre ordini di grandezza maggiore di quella del primo rivelatore del BORISPA! Come in precedenza, il rivelatore era schermato lateralmente e dal basso con un sistema semi-attivo in anti-coincidenza con le unità di rivelazione. Ogni 2000 s, in modo automatico, 4 sorgenti radioattive attraversavano il campo di vista effettuando la calibrazione in volo dello strumento. Finalmente si aveva una telemetria ad alta bit-rate che dava la possibilità di trasmettere i conteggi/unità in tre canali di energia ad alta risoluzione temporale (1 ms) e gli spettri di energia/unità in 64 canali integrati su 2 s. La navicella era stabilizzata in azimuth entro 20 arcmin, e, con computer di bordo, si potevano inseguire le sorgenti da osservare sia in azimuth che in elevazione. La temporizzazione degli eventi veniva fatta con un oscillatore ad alta stabilità sincronizzato col Tempo Universale.

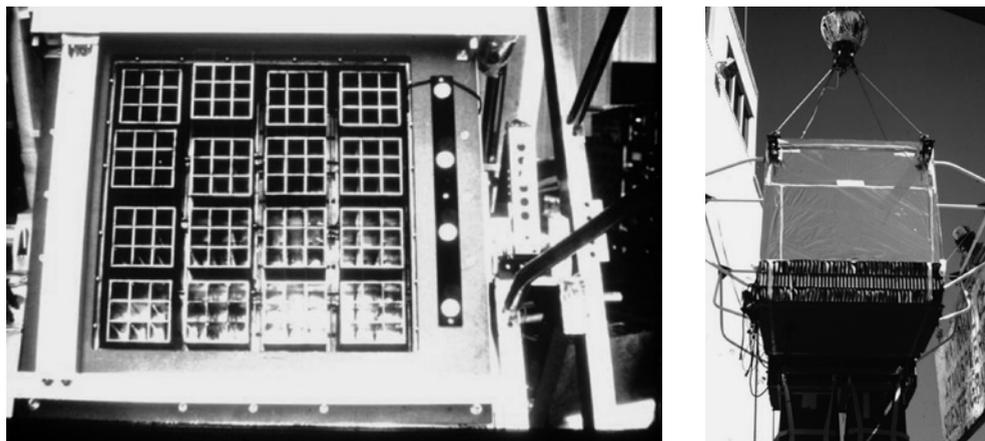


Figura 16. A sinistra: una vista dall'alto del telescopio dell'esperimento X-Grande. Sono visibili i collimatori con schermo graduale e, a destra le sorgenti radioattive che, su comando, attraversavano l'intero rivelatore. A destra: una vista dell'esperimento X-Grande poco prima del lancio del 1980 da Palestine (Texas). In alto è visibile il sistema di controllo di assetto della navicella.

12. Voli di pallone con l'esperimento X-Grande

Con l'esperimento X-Grande (XG) furono fatti tre voli di pallone da 1 milione di m³: 2 voli (nel 1980 e 1981) dalla base NSBF (National Space Balloon Facility) di Palestine (Texas), e il terzo (1982, transmediterraneo) dalla base ASI di Trapani Milo.

12.1 Volò del 1980

L'esperimento (vedi Fig. 16), lanciato il 4 ottobre e programmato per l'inseguimento di 3 sorgenti X celesti (Crab Nebula per la calibrazione dell'esperimento, Cygnus X-1 e X Persei), si comportò in modo nominale. La calibrazione con Crab diede risultati consistenti con quelli ottenuti da altri gruppi. Il volo fu molto fortunato (ma la fortuna aiuta le menti ben preparate!) in quanto, durante l'osservazione della Crab Nebula, trovammo la pulsar X transiente ricorrente A0535+26 ($P = 104$ s), che si trova a pochi gradi dalla Crab, in uno stato di attività X massima (outburst). Ci concentrammo subito su questa sorgente. I risultati furono eccellenti. In aggiunta a pubblicazioni su atti di congressi internazionali, pubblicammo due lavori su *Astrophysical Journal* uno dedicato alla curva di luce in raggi X duri e alla sua variabilità su varie scale di tempo (Frontera *et al.* 1985), l'altro dedicato alla spettroscopia con test di modelli teorici (Dal Fiume *et al.* 1988).

Potemmo vedere finanche i singoli impulsi (vedi Fig. 17) e determinare lo spettro della pulsar con un'accuratezza senza precedenti (Fig. 17). I risultati furono molto apprezzati dalla Comunità internazionale. A titolo di esempio, riporto in Fig. 18 la lettera Gerald Fishman, PI (Principal Investigator) dell'esperimento BATSE. I risultati sulle altre sorgenti furono pubblicati altrove (Frontera *et al.* 1985a).

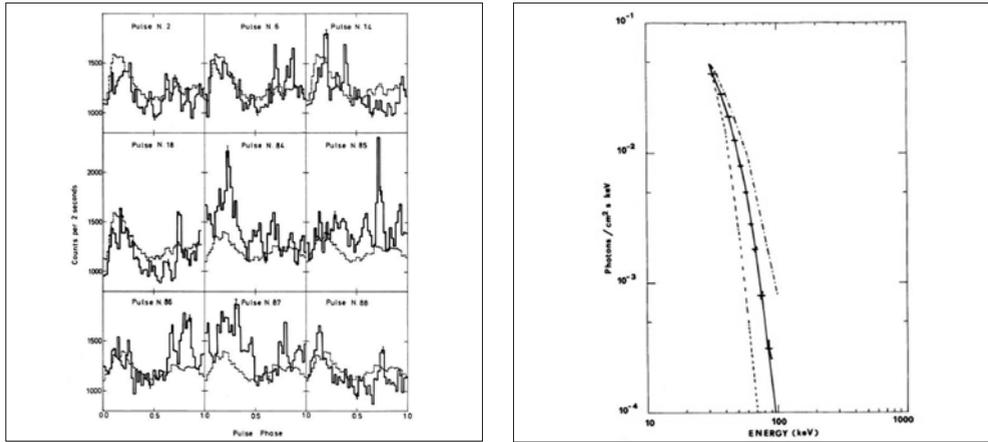


Figura 17. A sinistra: i singoli impulsi in raggi X duri osservati dalla pulsar X A0535+26 il 5 ottobre 1980 con l'esperimento X-Grande. Da Frontera *et al.* (1985b). A destra: lo spettro della pulsar da noi misurato. Da Dal Fiume *et al.* (1988). Le curve tratteggiate indicano gli spettri teorici attesi sulla base di un modello elaborato da Harding *et al.* (1984), per due valori diversi del campo magnetico (5×10^{12} e 10^{13} gauss).

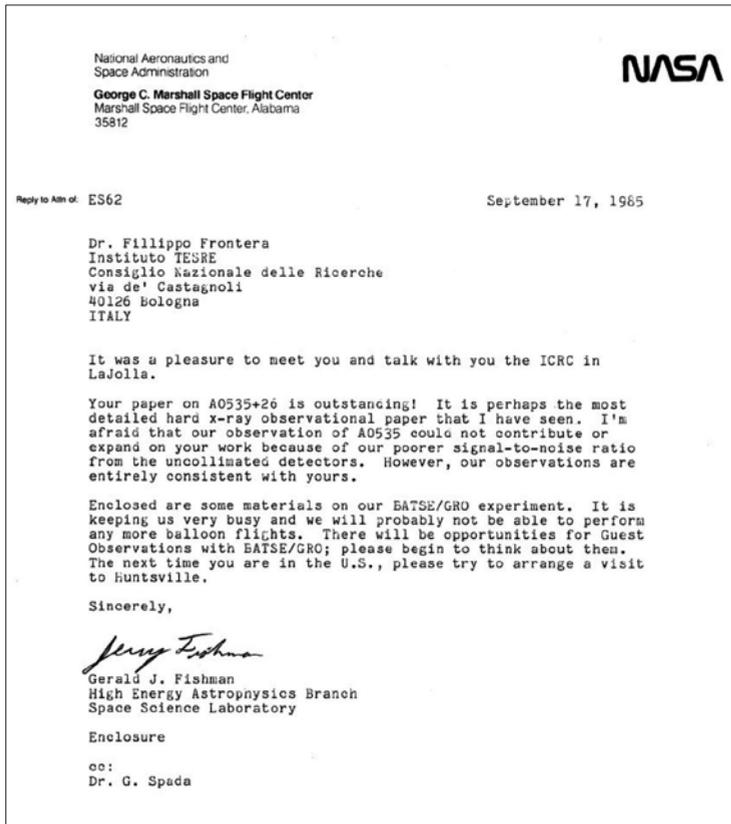


Figura 18. Lettera di congratulazioni di Gerald Fishman, PI dell'esperimento BATSE a bordo del satellite NASA CGRO, per l'eccellenza del risultato ottenuto dal gruppo di Bologna sulla pulsar X A0535+26.

12.2 Volo del 1981

Il volo del 1981, lanciato il 28 settembre, aveva come obiettivo l'osservazione con inseguimento di un campione di sorgenti peculiari. Del resto con i palloni, data la breve durata dei voli (dell'ordine di 24 ore) non si può fare che così. Le sorgenti prescelte furono la Crab Nebula (sorgente di riferimento), le galassie di Seyfert 1 NGC 5548 e MKN 464 (ben note a bassa energia e ancora poco note alle alte energie), l'ammasso di galassie Perseus (per la verifica dell'esistenza di una coda dura), le sorgenti X compatte galattiche Cygnus X-1, Cygnus X-2 (Low Mass X-ray Binary) e Her X-1 (pulsar X, $P = 1.24$ s).

A titolo di curiosità, a questa campagna di lanci partecipò anche Nichi D'Amico, attuale Presidente dell'INAF, che in quel periodo aveva interesse a fare ricerca in Astronomia X.

L'analisi dati non fu rapida; fummo tutti assorbiti da un'opportunità inaspettata: quella di sottomettere una proposta di missione in risposta al bando emesso dal Piano Spaziale Nazionale per una missione nazionale con partecipazione internazionale (vedi più avanti). L'analisi dati di NGC 5548, Cyg X-2, Hex X-1 e del Perseus Cluster fu ripresa alcuni anni più tardi col contributo decisivo di un laureando, ora un astrofisico ben noto nella comunità astrofisica internazionale, Giorgio Matt, che preparò la sua tesi di laurea contribuendo all'analisi dei nostri dati. I risultati di quest'analisi furono pubblicati su *Astrophysical Journal* (Matt *et al.* 1990). L'osservazione di MKN 464, trovato in uno stato di un outburst, fu pubblicata anch'essa in *Astrophysical Journal* (Piro *et al.* 1991).

12.3 Volo del 1982

Il volo del 1982 fu dettato dall'obiettivo di individuare la configurazione di rivelatore phoswich di NaI(Tl)/CsI(Na) (vedi Fig. 19) ottimale per un esperimento di alta energia ad alta sensibilità proposto, come vedremo più avanti, per la missione SAX sottomessa in risposta al bando del PSN (vedi più avanti). Il sistema phoswich è il sistema ottimale per la minimizzazione del fondo strumentale, con una condizione: essendo le scintillazioni viste dallo stesso PMT, occorre un analizzatore di forma dei segnali di ottima prestazione in grado di separare nettamente i segnali che sono dovuti a scintillazioni in uno o nell'altro degli scintillatori.

Per raggiungere questo obiettivo, 4 unità di rivelazione dell'esperimento X-Grande furono sostituite con altrettante unità phoswich di NaI(Tl)/CsI(Na), con spessori diversi sia dello scintillatore di NaI(Tl) che svolgeva il ruolo di rivelatore principale (3 e 10 mm), che dello scintillatore di CsI(Na) che fungeva da schermo attivo dal basso (30, 40, 50 mm). Fu realizzata un'elettronica di ottime prestazioni con cui si poteva misurare sia la distribuzione in forma che la distribuzione in energia dei segnali (vedi Fig. 19).

Il lancio fu eseguito il 10 agosto 1982 (vedi Fig. 20). L'esperimento funzionò in modo nominale (ormai il team era molto esperto nella preparazione di un volo). I risultati del test dei phoswich (Frontera, Catani *et al.* 1985) furono fondamentali e decisivi per stabilire la configurazione phoswich dello strumento PDS che proponemmo per SAX.

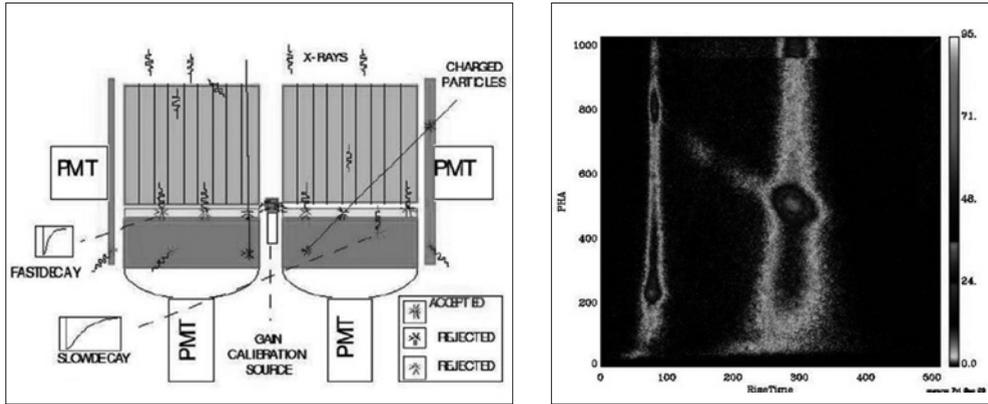


Figura 19. A sinistra: Configurazione di due unità phoswich NaI/CsI appaiate (come nell'esperimento PDS a bordo del satellite BeppoSAX) sormontate da collimatori e una sorgente radioattiva per il controllo di guadagno. Sono anche mostrate le forme di segnali attesi in caso di interazioni dei raggi X entranti dal lato del collimatore con uno o l'altro degli scintillatori. A destra: immagine che mostra la distribuzione in forma dei segnali sull'asse delle ascisse ("Rise Time") e l'energia dei fotoni entranti (PHA) in ordinate. È più che evidente la capacità dell'analizzatore di forma sviluppato di separare i segnali dovuti a perdite nel NaI (a sinistra) da quelli dovuti a perdite nel CsI. Sono anche ben individuabili i fotoni che perdono energia in entrambi gli scintillatori a causa di interazioni Compton.

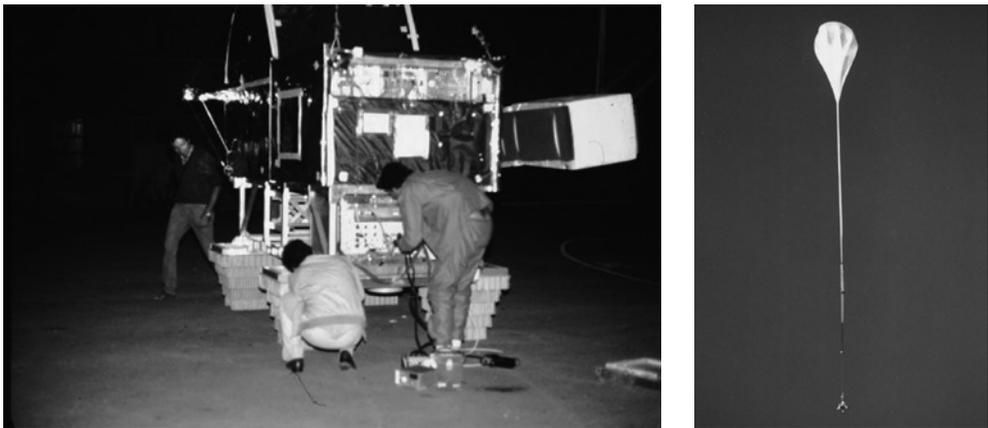


Figura 20. Esperimento X-Grande 1982. A sinistra: lavori in corso prima del lancio da Trapani. A destra: vista del pallone, paracadute, sistema di controllo di assetto e navicella subito dopo il lancio.

13. Anno 1981: un'opportunità straordinaria per la comunità nazionale di Astrofisica Spaziale

Nel 1979 il Governo italiano, tramite il CIPE (Comitato Interministeriale per la Programmazione Economica), istituiva il Piano Spaziale Italiano (PSN), allo scopo di favorire la crescita delle industrie italiane perché potessero competere con i partners europei nella gestione di grandi programmi spaziali. La gestione del PSN venne affidata al CNR.

Il PSN era guidato da un Comitato Scientifico e da un Comitato Consultivo. Fra le numerose prime iniziative del PSN, tra cui ITALSAT, TETHERED, LAGEOS II, il Lanciatore IRIS, era prevista la realizzazione di un satellite scientifico italiano.

Il bando uscì nel 1981 con le seguenti linee guida:

- missione di importanza primaria per la scienza moderna;
- coinvolgimento della Comunità scientifica italiana e delle sue potenzialità;
- coinvolgimento dell'industria italiana e il suo sviluppo e promozione;
- partecipazione internazionale.

Furono sottomesse tre proposte di missione:

1. **Una missione rivolta allo studio del fondo cosmico** nell'infrarosso, subito dopo ritirata.
2. **Una missione, OOXA** (Osservatorio Orbitante per X Astronomia), rivolta alla spettroscopia stellare a energie sotto i 2 keV. Responsabile principale (PI) della missione: Giuseppe "Pippo" Vaiana dell'Università di Palermo.
3. **Una missione, SAX** (Satellite di Astronomia X), rivolta all'osservazione in banda larga (2-300 keV) di sorgenti di raggi X celesti, più un frequente monitoraggio del piano della nostra Galassia nella banda 2-30 keV (vedi Fig. 21).

SAX era stata sottomessa da un Consorzio di Istituti CNR e Universitari e da due partners internazionali (SRON olandese e Space Science Department (SSD) di ESA).

PROPOSTA AL		
PIANO SPAZIALE NAZIONALE		
PER UN		
SATELLITE PER ASTRONOMIA IN RAGGI X		
PREPARATA DA		
F. Waldner	Istituto di Fisica - Università	Bari
G. Maggi	Istituto Nazionale Fisica Nucleare - Sezione	Bari
W. Dusi	Istituto TESRE/CNR	Bologna
F. Frontera	Istituto TESRE/CNR	Bologna
G. Spada *	Istituto TESRE/CNR	Bologna
E. Costa	Istituto di Astrofisica Spaziale/CNR	Frascati
M. Ranieri	Istituto di Astrofisica Spaziale/CNR	Frascati
P. Ubertini	Istituto di Astrofisica Spaziale/CNR	Frascati
G. Bollini	Istituto di Fisica Cosmica/CNR	Milano
N. D'Amico	Istituto di Fisica - Università	Palermo
N.R. Robba	Istituto di Fisica - Università	Palermo
G. Gerardi	Istituto Fisica Cosmica e Informatica/CNR	Palermo
S. Re	Istituto Fisica Cosmica e Informatica/CNR	Palermo
G.C. Perola	Istituto Osservatorio Astronomico - Università	Roma
I. Scanzani *	Istituto di Fisica - Università	Roma
e		
	Istituto Fisica Cosmica e Informatica/CNR	Palermo
J.A.M. Bleeker	Huygens Laboratory	Leiden
G. Manzo	Space Science Department/ESA	Noordwijk
A. Peacock	Space Science Department/ESA	Noordwijk
B.G. Taylor	Space Science Department/ESA	Noordwijk
A.C. Stinkman	Space Research Laboratory	Utrecht

Figura 21. Frontespizio della proposta SAX sottomessa nel giugno 1981.

Vi erano chiaramente due filosofie diverse nelle due proposte di Astronomia:

- OOXA era concepita come il seguito (migliorato) di un programma e di una tecnologia di successo sperimentata sul satellite "Einstein", di cui era stato PI Riccardo Giacconi;
- SAX era concepita come il miglior modo per sfruttare le potenzialità nella scienza spaziale della Comunità Italiana cresciuta attorno agli esperimenti da pallone e alla loro partecipazione a progetti spaziali europei dell'ESRO/ESA e, in parte, della NASA (per esempio, OSO 6).

Il PSN nominò una Commissione di Saggi per la selezione della missione da promuovere. I membri della Commissione erano di chiara fama: Edoardo Amaldi, Giuseppe "Beppo" Occhialini, Bruno Rossi, Giancarlo Setti e Lodewijk Woltjer. La missione selezionata dalla Commissione nel luglio 1982 fu SAX.

14. La missione SAX

14.1 Gli obiettivi e la configurazione iniziali

La missione SAX, come menzionato sopra, era dedicata allo studio a larga banda (2-300 keV) di sorgenti X compatte galattiche, resti di supernove, sorgenti extragalattiche (Nuclei Galattici Attivi e ammassi di galassie). In aggiunta si voleva effettuare un monitoraggio frequente del piano galattico in 2-30 keV. La configurazione del satellite è mostrata in Fig. 22.

Vi erano due tipi di strumenti: a campo stretto e a campo largo. Quelli a campo stretto, tutti allineati, comprendevano:

- Uno strumento X (2-35 keV) non focalizzante basato su tre rivelatori a gas scintillante con maschera codificata a campo stretto (3°), sostituito successivamente con 4 telescopi focalizzanti (LECS+MECS) che coprivano la banda 0.2-10 keV, con campo di vista di 30 arcmin. Dei telescopi MECS (1.3-10 keV) era responsabile Giuliano Boella, direttore IFCTR di Milano (Boella *et al.* 1997), mentre del telescopio LECS (0.1-10 keV) era responsabile Arvind Parmar dello Space Science Department di ESA a Noordwijk (Olanda) (Parmar *et al.* 1997).
- Un telescopio non focalizzante (HPGSPC) basato su un rivelatore a gas scintillante che copriva la banda 4-120 keV con campo di vista di 1.1° , di cui era responsabile Giuseppe (Peppino) Manzo dell'IFCAI di Palermo (Manzo *et al.* 1997).
- Un telescopio non focalizzante (PDS) a bassissimo rumore, basato sul sistema di rivelazione phoswich di NaI(Tl) / CsI(Na) schermato anche lateralmente con degli scintillatori di CsI(Na), che copriva la banda 15-300 keV, con campo di vista di 1.3° , di cui era responsabile il sottoscritto (Frontera *et al.* 1997).

Lo strumento a campo largo (Wide Field Cameras, WFC) era fornito dall'Istituto di Ricerche Spaziali olandese (SRON), che in questo modo entrava come partner internazionale sostenuto finanziariamente dall'agenzia spaziale olandese NIVR, che aveva

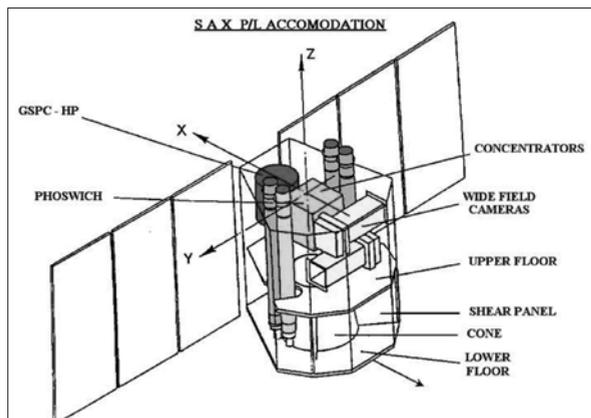


Figura 22. Configurazione del satellite SAX dopo la sostituzione del telescopio X (2-35 keV) a maschera con 4 telescopi X focalizzanti (1 LECS e 3 MECS).

firmato un accordo col PSN. Le WFC coprivano la banda 2-30 keV e impiegavano contatori proporzionali sensibili alla posizione sormontati da una maschera codificata che consentiva una risoluzione angolare di 3-4 arcmin e un campo di vista di $20^\circ \times 20^\circ$ (FWHM). Erano orientate in direzioni opposte ed entrambe a 90° rispetto ai telescopi a campo stretto. La responsabilità dello strumento era stata affidata a Rijk Jager dello SRON di Utrecht (Jager *et al.* 1998).

14.2 L'ingresso di un monitor di Gamma Ray Bursts per SAX

SAX non era stato pensato per lo studio dei Gamma Ray Bursts (GRB). L'origine di questi eventi, scoperti già da più di un decennio, era ancora un mistero. Non si era riusciti ancora a identificare le loro sorgenti o controparti ottiche/radio nonostante i molteplici tentativi già effettuati (vedi libro di G. Vedrenne and J. L. Atteia 2009, dedicato ai GRB). Era suggestiva la possibilità di sfruttare i 4 schermi attivi laterali del PDS, fatti di scintillatori di CsI(Na) spessi 10 mm e con un'area utile complessiva di 4200 cm^2 , come monitor di GRBs (GRBM) con banda di lavoro in 40-700 keV e campo di vista complessivo di mezzo cielo (2π). Infatti, essendo due di questi schermi orientati come le WFC, c'era la possibilità di osservare alcuni di questi eventi (stima conservativa di 2-3 GRB/anno) contemporaneamente in entrambi gli strumenti e quindi poterne determinare la direzione con un'accuratezza di pochi minuti d'arco. Tale accuratezza era stata già raggiunta in alcuni casi con la rete interplanetaria, ma dopo mesi dall'evento e senza la scoperta di controparti. Il ruolo del GRBM era fondamentale in quanto, con le sole WFC, data la loro banda di lavoro (2-30 keV), non era possibile identificare i veri GRB. In questa banda, oltre che i GRBs, possono essere rivelati altri tipi di eventi transienti, come flares da stelle e X-ray bursts dovuti a stelle di neutroni in sistemi binari (X-ray bursters). Il GRBM aveva quindi il ruolo fondamentale di identificare i veri GRBs.

Mosso da queste considerazioni, come responsabile dello strumento di alta energia PDS, nel 1984, durante la fase A industriale di SAX affidata, per quanto riguarda il Payload, alla LABEN di Milano, proposi che gli schermi attivi di CsI(Na) del PDS svolgessero anche il ruolo di GRBM (Frontera *et al.* 1984, Rapporto Interno ITESRE

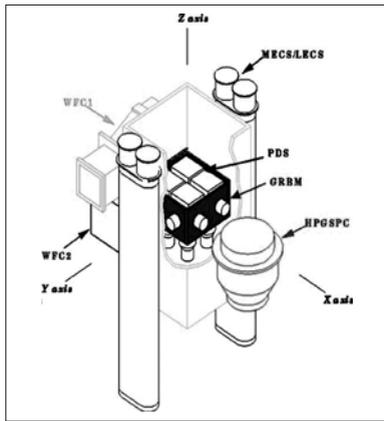


Figura 23. Payload di SAX, in cui sono evidenziate (in nero) le unità di rivelazione (lastre di CsI) del GRBM. Si vede molto bene che due delle 4 unità sono orientate come le WFC.

n. 99 e successive integrazioni). Ciò richiedeva che ciascuna delle quattro lastre fosse un rivelatore indipendente con propria elettronica e alimentazione e che ci fosse un sistema di trigger a bordo che scattasse per eventi transienti di diversa durata con l'invio a Terra di spettri e conteggi veloci da ciascuna lastra.

La proposta fu sottomessa alla Science Steering Committee di SAX, dove in realtà non ebbe grande accoglienza. Solo nel 1990, grazie anche a Chris Butler, che svolgeva il ruolo di Payload Manager ASI, in configurazione ridotta per contenere i costi, la proposta fu approvata. In Fig. 23 si può vedere la configurazione del payload, in cui è evidenziata l'ubicazione del GRBM.

Una volta approvata la proposta, fu fatto parecchio lavoro per ottenere dal GRBM il massimo delle informazioni sui GRB, quale un codice Monte Carlo per ricavare la funzione di risposta dello strumento (Pamini *et al.* 1990, Alberghini *et al.* 1994, Rapisarda *et al.* 1997), calibrazioni a Terra presso ESA-ESTEC dopo l'integrazione dello strumento nel satellite (Amati *et al.* 1997) e così via. La configurazione finale fu pubblicata dopo il lancio di SAX (Frontera *et al.* 1997, Costa *et al.* 1998).

14.3 Il successo di SAX

Il prosieguo è storia relativamente recente. SAX (vedi Fig. 24) fu lanciato da Cape Canaveral il 30 aprile 1996 e, grazie a un razzo due stadi Atlas-Centaur, fu messo su un'orbita quasi equatoriale (3.8° di inclinazione rispetto all'equatore).

Dopo l'accensione e i test di funzionalità di tutti i sottosistemi (fase di commissioning) a cura dell'Alenia Spazio di Torino, iniziò la fase di verifica scientifica (science verification phase) e quindi, a partire dall'ottobre 1996, la fase operativa. A SAX fu quindi cambiato nome: BeppoSAX, in memoria di Beppo Occchialini. Tutti i sottosistemi funzionavano egregiamente, il PDS (vedi Fig. 25) mostrava un basso fondo strumentale molto stabile con l'orbita, come previsto; analogamente bene si comportava il GRBM.

Grazie alla configurazione già vista di BeppoSAX, alla possibilità di orientare il satellite in tempi relativamente brevi e alla pervicacia del GRBM team, in soli 6 mesi (GRB del 28 febbraio 1997) si poté trovare la controparte X (Costa, Frontera, Heise *et al.* 1997)

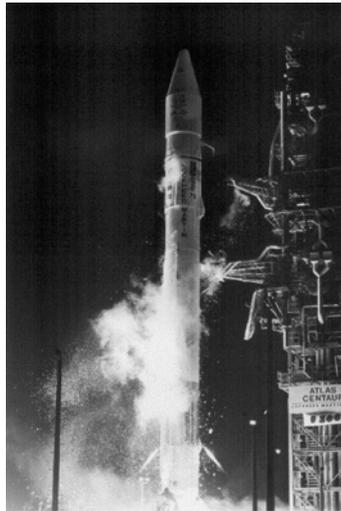
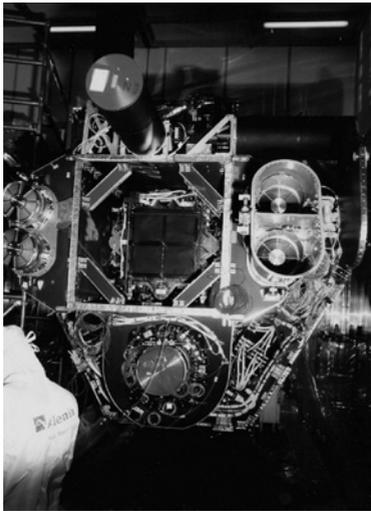


Figura 24. A sinistra: vista frontale di SAX durante la campagna di lancio. Sono ben visibili i LECS, MECS, HPGSPC e PDS. A destra: lancio di SAX da Cape Canaveral il 30 aprile 1996.

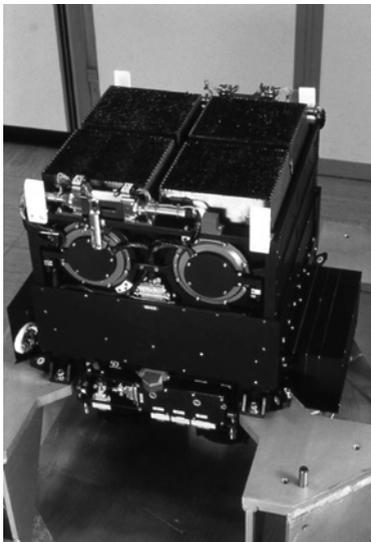


Figura 25. Modello di volo del PDS. Ben visibili i 2 collimatori basculanti (rocking) e i loro motori.

e ottica (van Paradijs *et al.* 1997) dell'evento e subito dopo stabilire, dopo circa 30 anni di mistero, che i GRB sono eventi esplosivi in galassie a distanza cosmologica (Metzger *et al.* 1997). La storia dei GRB e il ruolo chiave di BeppoSAX è stato raccontato in varie occasioni, come quella del Premio "Fermi" 2010 della SIF (Costa e Frontera 2011), quella del Marcel Grossmann Award (Frontera 2015), quella dei vent'anni dalla scoperta (Frontera 2019), oltre che nel libro di Vedrenne e Atteia (2009).

La risonanza della nostra scoperta nella comunità scientifica internazionale, non solo astronomica, fu enorme. Il team BeppoSAX ottenne due premi prestigiosi: il Bruno Rossi Prize 1998 dell'American Astronomical Society e il Descartes Prize 2002 della Commissione Europea. Per due anni (1997-1998), la nostra scoperta fu classificata dalla

rivista americana *Science* tra le top ten delle scoperte in tutti i campi della scienza. Come mi scrisse l'amico e collega Josh Grindlay, professore alla Harvard University, la scoperta sui GRB ottenuta con BeppoSAX sarà scritta in tutti i libri di testo di Astronomia.

La scoperta fatta con BeppoSAX ebbe un impatto eccezionale sulle facilities di Terra e nelle decisioni delle agenzie spaziali internazionali:

- I grandi telescopi radio e ottici dedicarono tutto il tempo necessario per studiare le controparti dei GRB. In aggiunta furono sviluppati piccoli telescopi robotici per osservare in modo automatico e veloce i GRB scoperti con BeppoSAX.
- L'ESA modificò il flusso di dati del satellite INTEGRAL per consentire una veloce localizzazione di GRBs rivelati con lo strumento IBIS.
- La NASA annunciò l'opportunità di proporre un satellite dedicato ai GRB e fu selezionato SWIFT, ancora operativo, dedicato primariamente allo studio dell'afterglow iniziale dei GRB. SWIFT ha una configurazione simile a BeppoSAX.
- Anche i satelliti gamma *Fermi* e AGILE hanno adottato configurazioni simili per consentire la localizzazione e lo studio dei GRB nella banda gamma di alta energia.

Ma BeppoSAX non ha solo scoperto l'origine extragalattica dei GRBs. Ha anche consentito per la prima volta di studiare quasi tutte le classi di sorgenti celesti in una banda eccezionalmente larga (0.1-200 keV) mai esplorata prima con un satellite. Il PDS in particolare ha consentito di estendere lo studio di molte classi di sorgenti nei raggi X duri, grazie anche un'analisi dei dati molto "friendly" da usare.

15. Conclusioni

Gli anni Sessanta e Settanta, oltre che essere stati anni eccitanti dal punto di vista scientifico, sono stati fondamentali per raggiungere nel campo dell'Astronomia in raggi X duri la maturità scientifica e tecnologica e così poter affrontare con sicurezza e competenza le sfide degli anni Ottanta, in particolare la missione BeppoSAX. Negli anni Ottanta realizzammo anche un altro esperimento da pallone, il LAPEX (Large Area Phoswich EXperiment, Frontera *et al.* 1984), che fu sviluppato in parallelo allo sviluppo dell'esperimento PDS e quindi fu di grande aiuto per disegnare la configurazione ottimale del PDS. L'esperimento fu anche lanciato nel 1995 da Fort Sumner in New Mexico (USA), ma il lancio di SAX (1996) ci assorbì tutti per ovvie ragioni. Oggi l'ex TESRE, poi IASF Bologna ora OAS Bologna (Osservatorio di Astrofisica e Scienza dello Spazio dopo la fusione con l'Osservatorio Astronomico di Bologna), ha una nuova opportunità e sfida nel campo X e gamma, che grazie all'esperienza acquisita negli anni scorsi con BeppoSAX, INTEGRAL e AGILE, è potuta nascere a Bologna: THESEUS (Transient High Energy Sky and Early Universe Surveyor), una proposta di missione guidata da Lorenzo Amati. È dedicata ai GRB più distanti e, grazie alla scoperta che alcuni eventi gravitazionali possono essere legate ai GRB brevi (<1 s), alla "multimessenger astrophysics". THESEUS è

stato già approvato da ESA per uno studio di fase A e il mio augurio più sincero è che possa proseguire la sua corsa fino al lancio, per futuri successi dell'OAS Bologna nel campo dell'Astronomia X.

16. La squadra tecnica del Gruppo X di Bologna

Desidero qui ricordare i fisici elettronici, i matematici informatici e i numerosi tecnici che, a partire dagli ultimi anni Sessanta, quando io entrai a far parte del gruppo, si sono succeduti e che hanno consentito al BORISPA prima e al Gruppo X del LTESRE/ITESRE dopo, di raggiungere quell'eccellenza ora riconosciuta a livello internazionale. I tecnici che facevano parte del gruppo sin della fine degli anni Sessanta erano Rodolfo Chiodi (tecnico elettronico e radioamatore), Gianni Giovannini (disegnatore meccanico), Elio Rossi (tecnico elettronico), Silvano Tarlazzi (tecnico elettronico), Sante Neri (tecnico elettronico). Subito dopo il mio arrivo, entrò a far parte del Gruppo X Carlo Cavani (Fisico elettronico). Negli anni Settanta si aggiunsero Gualtiero Baravelli (progettista meccanico), Alberto Brighenti (tecnico elettronico), Oscar Catani (tecnico informatico), Gianni Landini (progettista e operatore meccanico), Ennio Morelli (Fisico elettronico), Alda Rubini (tecnico elettronico), Stefano Silvestri (perito fisico e tecnico informatico), Massimo Trifoglio (Matematico informatico), Giulio Ventura (Fisico elettronico), Orazio Zerlotin (operatore meccanico). Infine, negli anni Ottanta, si sono aggiunti Angelo Basili (tecnico elettronico) e Turiddo Franceschini (tecnico elettronico). L'ultimo Fisico sperimentale aggiuntosi al Gruppo X alla fine degli anni Ottanta per un limitato periodo di tempo fu Leonida Gizzi (ora nell'Istituto Nazionale di Ottica del CNR). A tutti va il mio ringraziamento per il loro impegno negli esperimenti a cui hanno partecipato. Nella Fig. 26 si possono vedere alcuni membri del Gruppo X a tavola per festeggiare il Premio Fermi 2010 della Società Italiana di Fisica assegnatoci per le nostre scoperte sui GRB.



Figura 26. Alcuni membri del Gruppo X a tavola per festeggiare il Premio Fermi 2010 assegnato al sottoscritto e a Enrico Costa per le scoperte sui GRB. Dal fondo del tavolo (a sinistra e a destra): Angelo Basili e Lorenzo Amati, Nicola Masetti e Stefano Silvestri, Luciano Nicastro e Turiddo Franceschini, Filippo Frontera e Gianni Landini, la signora Nicastro.

Bibliografia

- Alberghini F., Dal Fiume D., Frontera F., Pizzichini G., 1994, in *Gamma Ray Bursts: 2nd Workshop*, Huntsville, Alabama, October 1993, edited by Gerald J. Fishman, *AIP Conference Proceedings*, vol. 307 (American Institute of Physics, New York) p. 638.
- Amati L., Cinti M.N., Feroci M., Costa E., Frontera F., dal Fiume D., Collina P., Nicastro L., Orlandini M., Palazzi E., Rapisarda M., Zavattini G., 1997, *Proceedings SPIE*, 3114, 176-185.
- Boella G., Chiappetti L., Conti G. *et al.*, 1997, *Astronomy & Astrophysics Suppl. Ser.*, 122, p. 327-340.
- Brini D., 1995, *Nascita e Sviluppo dell'astronomia sperimentale in raggi X duri a Bologna*, a cura della Biblioteca-Servizio di Documentazione dell'Area della Ricerca di Bologna del CNR.
- Brini D., Cattani D., Ciriegi U., Fuligni F., Galli M., Gandolfi A., Moretti E., Sacchi C., 1965, *Annales d'Astrophysique*, 28, 1034.
- Brini D., Cavani C., Frontera F., Fuligni F., 1971, *Nature Physical Science*, 232(30), 79-81.
- Brini D., Ciriegi U., Fuligni F., 1964, *La Ricerca Scientifica*, 34 (II-A), 6(3), 565-610.
- Brini D., Ciriegi U., Fuligni F., Gandolfi A., Moretti E., 1965, *Journal of Geophysical Research*, 70(21), 5460-5463.
- Brini D., Ciriegi U., Fuligni F., Moretti E., Vespignani G., 1967, *Astrophysical Journal*, 149, 429.
- Brini D., Evangelisti F., Fuligni F., Vespignani G., 1971, *Nuovo Cimento B*, 2(2), 193-207.
- Brini D., Frontera F., Fuligni F., 1970, *Nuovo Cimento B*, Series 10, 65(2), 181-186.
- Cavallari E., Frontera F., 2017, *Space Science Reviews*, 212(1-2), 429-518.
- Cavallo G., Gould R.J., 1971, *Nuovo Cimento B*, 2(1), 77-92.
- Cavani C., Frontera F., Fuligni F., Brini D., 1971, *Nature Physical Science*, 233(43), 153-155.
- Cavani C., Frontera F., Fuligni F., Galli M., 1974, *Lettere al Nuovo Cimento*, 11, 673-675.
- Costa E., Frontera F., 2011, *La Rivista del Nuovo Cimento*, 34(10), 585-615, eprint arXiv:1107.1661.
- Costa E., Frontera F., dal Fiume D., Amati L., Cinti M.N., Collina P., Feroci M., Nicastro L., Orlandini M., Palazzi E., Rapisarda M., Zavattini G., 1998, *Advances in Space Research*, 22(7), 1129-1132.
- Costa E., Frontera F., Heise J., Feroci M., in't Zand J., Fiore F., Cinti M.N., dal Fiume D., Nicastro L., Orlandini M., Palazzi E., Rapisarda M., Zavattini G., Jager R., Parmar A., Owens A., Molendi S., Cusumano G., Maccarone M.C., Giarrusso S., Coletta A., Antonelli L.A., Giommi P., Muller J.M., Piro L., Butler R.C., 1997, *Nature*, 387, 783-785.
- Dal Fiume D., Frontera F., Morelli E., 1988, *Astrophysical Journal*, 331, 313-320.
- Di Cocco G., Caroli E., Celesti E., Foschini L., Gianotti F., Labanti C., Malaguti G., Mauri A., Rossi E., Schiavone F., Spizzichino A., Stephen J.B., Traci A., Trifoglio M., 2003, *Astronomy & Astrophysics*, 411, L189-L195.
- Feretti L., Frontera F., Fuligni F., 1975, *Astrophysical Letters*, 16(1), 13-15.
- Frontera F., 2015, "GRB afterglow discovery with BeppoSAX: its story 15 years later", in *Proceedings of the Thirteenth Marcel Grossmann Meeting on Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Astrophysics and Relativistic Field Theories*, edited by K. Rosquist *et al.*, vol. 1 (World Scientific, Singapore) pp. 33-53.
- Frontera F., 2019, "The key role of BeppoSAX in the GRB history", *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 30, 171-184, eprint arXiv:1902.06119.
- Frontera F., Catani O., Costa E., dal Fiume D., Landini G., Morelli E., Rubini A., Silvestri S., Spada G., Trifoglio M., 1985, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 235, 573-581.

- Frontera F., Costa E., dal Fiume D., Feroci M., Nicastro L., Orlandini M., Palazzi E., Zavattini G., 1997, *Astronomy & Astrophysics Supplement series*, 122, 357-369.
- Frontera F., dal Fiume D., Franceschini T., Landini G., Morelli E., Pamini M., Rubini A., Silvestri S., Spada G., Costa E., 1984, *Nuovo Cimento C*, Serie 1, 7, 656-672.
- Frontera F., dal Fiume D., Dusi W., Morelli E., Spada G., Ventura G., 1985a, *Advances in Space Research*, 5(3), 125-128.
- Frontera F., dal Fiume D., Morelli E., Spada G., 1985b, *Astrophysical Journal*, 298, 585-595.
- Frontera F., Fuligni F., 1975, *Astrophysical Journal Letters*, 198, L105-L108.
- Frontera F., Fuligni F., 1979, *Astrophysical Journal*, Part 1, 232, 590-594.
- Frontera F., Fuligni F., Brini D., Cavani C., 1972, *Lettere al Nuovo Cimento*, 5(2), 131-134.
- Frontera F., Fuligni F., Morelli E., Ventura G., 1979, *Astrophysical Journal*, 234, 477-480.
- Frontera F., Fuligni F., Morelli E., Ventura G., 1981a, *Advances in Space Research*, 1(11), pp. 107-110.
- Frontera F., Fuligni F., Morelli E., Pizzichini G., Ventura G., 1981b, *Astrophysics and Space Science*, 75, 211-217.
- Fuligni F., Dusi W., Frontera F., Morelli E., Ventura G., 1979, in *Proceedings of the Symposium X-ray Astronomy*, Innsbruck, Austria, May 29-June 10, 1978, a cura di W.A. Baity, L.E. Peterson, *COSPAR Symposium Series*, vol. 3 (Pergamon Press, Oxford) p. 505.
- Giacconi R., Gursky H., Paolini F.R., Rossi B.B., 1962, "Evidence for X rays from sources outside the solar system", *Phys. Rev. Lett.*, 9, 439-443.
- Harding A.K., Meszaros P., Kirk J.G., Galloway D.J., 1984, *Astrophysical Journal*, 278, 369-381.
- Horstman-Moretti E., Fuligni F., Brini D., 1971, *Nuovo Cimento B*, Serie 11, 6, 68-82.
- Horstman H.M., Cavallo G., Moretti-Horstman E., 1975, "The X and gamma diffuse background", *Nuovo Cimento*, 5(2), 255-311.
- Jager R., Mels W.A., Brinkman A.C., Galama M.Y., Goulooze H., Heise J., Lowes P., Muller J.M., Naber A., Rook A., Schuurhof R., Schuurmans J.J., Wiersma G., 1997, *Astronomy & Astrophysics Supplement series*, 125, 557-572.
- Klebesadel R.W., Strong I.B., Olson R.A., 1973, "Observations of gamma-ray bursts of Cosmic Origin", *Astrophysical Journal Letters*, 182, 85.
- Kouveliotou C., Finger M.H., Fishman G.J., Meegan C.A., Wilson R.B., Paciesas W.S., Minamitani T., van Paradijs J., 1993, in *Compton Gamma-Ray Observatory*, St. Louis MO, 1992, *AIP Conference Proceedings*, vol. 280 (American Institute of Physics, New York) pp. 319-323.
- Matt G., Costa E., dal Fiume D., Dusi W., Frontera F., Morelli E., 1990, *Astrophysical Journal*, 355, 468-472.
- Mandolesi N., Bersanelli M., Burigana C., Villa F., 2000, *Astrophysical Letters and Communications*, 37, 151.
- Manzo G., Giarrusso S., Santangelo A., Ciralli F., Fazio G., Piraino S., Segreto A., 1997, *Astronomy & Astrophysics Supplement series*, 122, 341-356.
- Metzger M.R., Djorgovski S.G., Kulkarni S.R., Steidel C.C., Adelberger K.L., Frail D.A., Costa E., Frontera F., 1997, *Nature*, 387, 878-880.
- Parmar A.N., Martin D.D.E., Bavdaz M., Favata F., Kuulkers E., Vacanti G., Lammers U., Peacock A., Taylor B.G., 1997, *Astronomy & Astrophysics Supplement series*, 122, 309-326.
- Palumbo G.G.C., Pizzichini G., Vespignani G.R., 1974, *Astrophysical Journal Letters*, 189, 9-11.
- Pamini M., Natalucci L., dal Fiume D., Frontera F., Costa E., Salvati M., 1990, *Nuovo Cimento C*, Serie 1, 13(2), 337-344.

- Piro L., Matt G., Costa E., dal Fiume D., Frontera F., Morelli E., 1991, *Astrophysical Journal*, 380, 357-361.
- Pizzichini G., Palumbo G.G.C., Spizzichino A., 1975, *Astrophysical Journal Letters*, 195, L1-L5.
- Rapisarda M., Amati L., Cinti M.N., Feroci M., Costa E., Collina P., Zavattini G., Frontera F., Nicastro L., Orlandini M., Palazzi E., dal Fiume D., 1997, *Proceedings SPIE*, 3114, 198-205.
- Schmitt *et al.*, 1991, *Nature*, 349, 583-587.
- Trümper J., Pietsch W., Reppin C., Voges W., Staubert R., Kendziorra E., 1978, "Evidence for strong cyclotron line emission in the hard X-ray spectrum of Hercules X-1", *Astrophysics Journal Letters*, 219, 105-110.
- Van der Klis M., 1995, in *X-ray binaries*, edited by W. Lewin, J. van Paradijs, E. van den Heuvel, *Cambridge Astrophysical Series*, no. 26 (Cambridge University Press, Cambridge, UK) pp. 252-307.
- Van Paradijs J., Groot P.J., Galama T., Kouveliotou C., Strom R.G., Telting J., Rutten R.G.M., Fishman G.J., Meegan C.A., Pettini M., Tanvir N., Bloom J., Pedersen H., Nørdgaard-Nielsen H.U., Linden-Vørnle M., Melnick J., Van der Steene G., Bremer M., Naber R., Heise J., in't Zand J., Costa E., Feroci M., Piro L., Frontera F., Zavattini G., Nicastro L., Palazzi E., Bennett K., Hanlon L., Parmar A., 1997, *Nature*, 386, 686-689.
- Vedrenne G., Atteia J.L., 2009, *Gamma-Ray Bursts: The brightest explosions in the Universe*, (Springer Praxis Books, Berlin).
- Vernov S.N., Chudakov A.E., Gorchakov E.V., Logachev J.L., Vakulov P.V., 1959, *Planetary and Space Science*, 1(2), 86-93.

La Radioastronomia a Bologna dalla nascita agli anni Novanta

Carla Fanti e Roberto Fanti*

1. Introduzione

“Perché – mi dice un giorno G. (Gianpietro Puppi, N.d.A.) sulle scale dell’Istituto – non costruisci un radiotelescopio?”.

Con queste parole Marcello Ceccarelli ricorda, in *Viaggio Provvisorio*, con il suo solito stile scherzoso, l’inizio di questa avventura.

Il prof. Puppi, trasferitosi a Bologna da Padova, nel 1959 era il direttore dell’Istituto di Fisica e aveva allora 41 anni mentre Ceccarelli ne aveva 31: erano quelli che oggi definiremmo “due giovinotti”.

La data di questo incontro va collocata presumibilmente nel maggio 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. L’avvio della *Radioastronomia* in Italia è stato una delle tante iniziative di Puppi per promuovere nuovi settori di ricerca nella fisica italiana che potessero affermarsi a livello internazionale.

La Radioastronomia, nata intorno agli anni Trenta del 1900, era, a quell’epoca, un settore dell’Astronomia già consolidato a livello internazionale. Si era capito che le radiosorgenti non sono stelle ma oggetti esterni alla Galassia. Si erano compresi i meccanismi che producono la radiazione: per lo più *Sincrotrone*, cioè energia irradiata da elettroni relativistici nei deboli campi magnetici delle galassie, ma anche fenomeni atomici. La Radioastronomia aveva dato un nuovo potente impulso all’Astronomia aprendo nuovi orizzonti: si pensi alla possibilità di osservare l’idrogeno atomico interstellare della nostra Galassia per studiarne la dinamica (in seguito anche nelle altre) mediante la riga che esso emette alla lunghezza d’onda di 21 cm. Inoltre era entrata con forza nel, per così dire “vivace”, dibattito cosmologico dell’epoca fra i sostenitori della *Teoria dello Stato Stazionario* (età infinita e creazione continua di materia) e quelli del *Big Bang* (modelli relativistici di Friedman).

* Già professori del Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Bologna

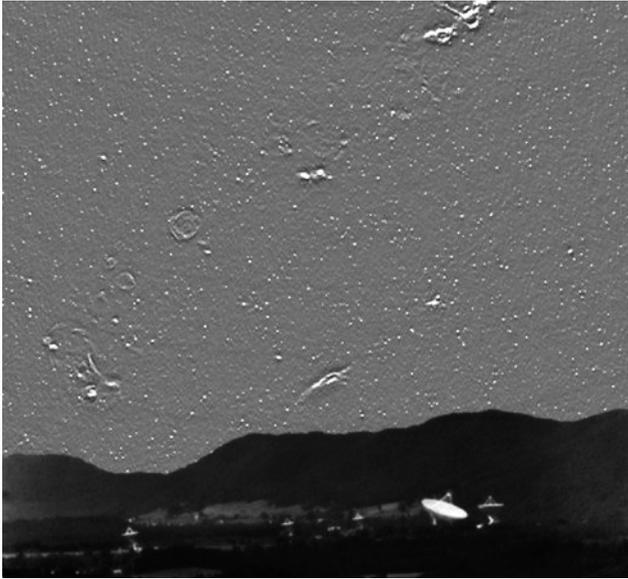


Figura 1.

Il discriminante sta nell'andamento dei *conteggi* degli oggetti astronomici distanti.

I conteggi (ossia il numero di oggetti in funzione della loro luminosità apparente, o *flusso*, S) sono ben rappresentati da una legge del tipo $N(>S) \propto S^{-\delta}$ dove $N(>S)$ rappresenta il numero di oggetti con flusso maggiore di S . Generalmente questa relazione è data in forma logaritmica cioè: $\text{Log}(N>S) = -\delta \text{Log } S + \text{costante}$, e ci si riferisce a essa col termine $\text{Log } N - \text{Log } S$.

Una rappresentazione grafica è data più avanti, quando se ne riparla come risultato scientifico ottenuto.

Il valore di δ , previsto dalla teoria, è al massimo 1.5 per lo stato stazionario e maggiore di 1.5 per i modelli relativistici. I risultati fino ad allora ottenuti erano però ancora contraddittori.

Capitosi che le radiosorgenti non potevano essere radiostelle, ci si convinse che, almeno le più luminose, dovessero essere altre galassie: le *radiogalassie* (non si conoscevano ancora le quasar). Nella Fig. 1 un'immagine prodotta con dati radio reali di come apparirebbe il cielo se i nostri occhi fossero sensibili alle onde radio. I puntini sono radiosorgenti lontane, le strutture estese radiosorgenti interne alla nostra Galassia e, al centro, si vedono le Nubi di Magellano.

Le radiosorgenti extragalattiche, così potenti da potersi rilevare a distanze enormemente superiori a quelle raggiungibili con i maggiori telescopi ottici dell'epoca, erano viste dunque come le "sonde" ideali per risolvere il dibattito in maniera definitiva, a patto di avere a disposizione un congruo numero di oggetti.

Un futuro grande *Radiotelescopio* (italiano), avrebbe dato un contributo rapido e importante al dibattito potendo osservare, in tempi brevi, grandi quantità di radiosorgenti a flussi molto piccoli e quindi, presumibilmente, molto lontane.

2. Marcello Ceccarelli e il progetto

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.

Giovane fisico nucleare di Padova, Ceccarelli, chiamato a Bologna da Puppi, aveva ottenuto grandi risultati nel suo campo (aveva sfiorato il Premio Nobel) ma aveva deciso di lasciare la fisica subnucleare e cercava nuove tematiche.

Ricordiamo solo il suo ultimo lavoro di fisica nucleare, grazie al quale “affondò” una importante teoria proposta da famosi astrofisici teorici (Burbidge e Hoyle), secondo la quale la grande luminosità delle radiogalassie poteva essere spiegata da annichilazione materia-antimateria. Si prevedeva che tale processo avrebbe prodotto, fra l’altro, anche “raggi gamma”, dei quali Morrison calcolò per Cigno A, la radiosorgente apparentemente più forte del cielo nord, il flusso aspettato a terra. Ceccarelli, usando strumentazione per la fisica subnucleare montata su palloni in alta quota, trovò (1959) che il flusso gamma misurato era inferiore a quello previsto da Morrison di almeno 200 volte. Quindi *nessuna annichilazione materia-antimateria*. All’esperimento avevano partecipato, rinunciandovi poi, anche alcuni studenti, fra cui Alessandro Braccesi, che fu l’unico ad arrivare fino in fondo e divenne poi il braccio destro di Ceccarelli.

Ceccarelli aveva fatto la prima osservazione al mondo di *gamma-astrofisica* ed era entrato nella Radioastronomia.

Puppi ebbe l’idea, sponsorizzò il progetto, ne reperì i finanziamenti necessari (800 milioni di lire, pari a circa 11 milioni di euro oggi, secondo l’ISTAT) da ricevere a rate, 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 Nazionale di Radioastronomia* (LNRA) per l’uso scientifico e per la manutenzione del Radiotelescopio.

Ceccarelli, coraggiosamente, accettò la proposta di 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 elettronico alla Marelli, che lasciò un lavoro certo per un altro più incerto ma molto più interessante!

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

Il progetto che ne scaturì fu quello di uno strumento del tipo “Croce di Mills”, quindi con due rami tra loro perpendicolari, che, nella “Croce del Nord”, sarebbero stati di 600 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. La Croce (in realtà una croce *tau*, o T) sarebbe stato uno strumento di transito, che, puntate in direzione NS le antenne a una certa declinazione (δ), avrebbe permesso di



Figura 2.

registrare, mentre il cielo le scorre sopra a causa della rotazione terrestre, i segnali radio con continuità nell'arco delle 24 ore. Il ramo EW sarebbe stato costituito da un unico "spicchio" di cilindro da orientare in NS, mentre il ramo NS sarebbe stato formato da 128 corti semi-cilindri, ciascuno lungo 23.5 m. Frequenza di lavoro 408 MHz.

La Fig. 2 mostra il Radiotelescopio come è ora, con accanto l'antenna parabolica per il VLBI costruita all'inizio degli anni Ottanta e questo articolo racconta la storia di come e con quale fatica e problemi ci si è arrivati, ma anche dei successi che si sono ottenuti.

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 1960 fu realizzato il prototipo del ramo EW della "Croce del Nord".

Un semicilindro parabolico di 7 m × 100 m, operante a 327 MHz.

Parteciparono ai lavori, assieme a Ceccarelli e Sinigaglia, i giovani Giancarlo Setti (neo-laureato) e Alessandro Braccesi (ancora studente) più alcuni tecnici universitari.

La storica e memorabile foto della Fig. 3 immortalava la conclusione di questa prima fase. Vi compaiono, in piedi, da destra: Ceccarelli, Mannino (direttore dell'Osservatorio di Bologna), Puppi, Righini (direttore dell'Osservatorio di Arcetri, Firenze), Sinigaglia e Setti. Davanti, seduto, Alessandro Braccesi.

Il Ministro Medici (Pubblica Istruzione) presenziò al primo test.

Il gruppo di lavoro si estese acquisendo altre persone di grande qualità: gli ingegneri Gianni Gelato (appena reduce da una scuola militare) e Carlo Rosatelli (in prestito dal CNEN, ora ENEA), due giovani neo-PhD, Dan Harris (Caltech) e Louise Volders



Figura 3.

(Leiden), con buone competenze astronomiche, e un nutrito numero di tecnici universitari molto bravi.

Era nato il gruppo ROUB, “Radio Osservatorio Università Bologna”.

Il progetto fu presentato alla fine di maggio 1961 alla Scuola di Varenna della Società Italiana di Fisica e, a dicembre, al “Symposium on Large Antennae for Radioastronomy” tenutosi a Parigi.

3. La costruzione del ramo EW

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*, la struttura verso cui viene riflesso il segnale intercettato dall’antenna per essere convertito in segnale elettrico.

Nell’agosto del 1963, nelle campagne di Medicina (BO), furono erette le centine (in Fig. 4 il montaggio della prima centina, su cui sono arrampicati alcuni addetti alla costruzione) e in settembre tutta la “ferraglia” era in piedi.

Il grande spicchio di cilindro parabolico che costituiva il ramo EW della “Croce del Nord” si ergeva maestoso, con la sua estensione di 600 m × 35 m.

Durante la primavera del 1964 una squadra del genio militare fu impiegata per la posa dei cavi coassiali sotterranei che dovevano convogliare al registratore il segnale radio raccolto.

I soldati lavoravano volentieri: lì stavano molto meglio che in caserma e gradivano molto il pranzo all’osteria “dei Cacciatori” vicina alla “Croce”.

Carla aveva intanto cominciato a collaborare con Louise nel settore informatico, imparando il FORTRAN e sviluppando con lei alcuni semplici algoritmi per l’analisi dei futuri dati.



Figura 4.

Di questi anni Ceccarelli scrive 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 “Crocce 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 Sinigaglia e Co. completarono il collegamento del ramo EW con il ricevitore. Restammo all'Osservatorio in tanti, 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 ancora lo sapesse. Festeggiammo con salame e Sangiovese.

Scrivendo 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 Pubblica Istruzione Gui, il Rettore Felice Battaglia, lo stato maggiore 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 un mare di fango, impantanando il 50%



Figura 5.

delle auto dei partecipanti, inclusa quella del Ministro (vedasi Fig. 5; Ceccarelli sta spiegando qualcosa al Ministro).

Apnea 1: mancanza di ossigeno (finanziamenti)

Acquisito questo primo successo, l'operazione "Croce del Nord" era però ben lungi dall'essere finita. Era stata costruita anche una frazione (300 m anziché 1200) del ramo NS, senza però poterla collegare con il ramo EW, per carenza di finanziamenti.

Con il solo ramo EW il potere risolutivo dello strumento era eccellente, per quei tempi, in ascensione retta (cioè in EW, 4 primi 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 (cioè in NS), simulassero una sola radiosorgente più forte (effetto così detto della *confusione*), introducendo incertezze nei dati, anche se parzialmente controllabili.

Bisognava quindi mettere il ramo NS in condizioni di lavorare, anche se era di soli 300 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 Arcibo, all'inizio del 1964, e L. Volders era tornata in Olanda, forse nel 1966, insieme al marito, G. Gelato. Anche Giancarlo Setti era in Olanda, ma c'erano Marcello e Alessandro a guidare i tanti pivellini (laureandi e neo-laureati) 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 (mediante triangolazioni sul territorio italiano effettuate con una piccola antenna portatile) Ceccarelli contattò le alte gerarchie militari, con scarsi risultati, salendo progressivamente di livello, finché, persa la pazienza, inviò una lettera ad 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 danneggiavano le osservazioni del radiotelescopio (e, a causa delle ispezioni con l'antenna portatile, 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 penoso il nostro lavoro.

4. Osservazioni e analisi dei dati: primi lavori scientifici

L'osservazione col Radiotelescopio consisteva nel registrare il segnale su tre registratori a carte (uno per ogni “occhio” dello strumento) usando rotoli lunghi circa 15 m per 12 ore di osservazione. Poi si sovrapponevano i tre fogli su un tavolo dotato di lampade che li illuminavano da sotto, e si faceva a mano, con la matita, la media dei tre tracciati indipendenti, visti in trasparenza, indi 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 potevamo prendere a 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 noi due eravamo entrati “ufficialmente” nel gioco, avendo concluso in luglio la tesi di laurea.

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 alla stessa frequenza dal Radiotelescopio parabolico di Parkes (Australia), che portò a un catalogo (il *BI*) contenente 654 radiosorgenti con flusso maggiore di 1 Jy (omettiamo la definizione di Jy ma sottolineiamo che questo era un valore alquanto basso per l'epoca). Il catalogo conteneva tutte le radiosorgenti già viste da Parkes (le più forti delle nostre, circa una quarantina), mentre le altre erano tutte nuove anche se parte di esse potevano essere affette da *confusione*.

Successivamente altre estese zone di cielo, questa volta intorno allo zenit, furono osservate, ma la prospettiva di continuare l'analisi dei dati a mano era improponibile.

D'altronde le capacità di calcolo erano esigue.

Puppi ottenne per noi il permesso di accedere, solo di notte, all'IBM 1620 della Facoltà di Ingegneria e ci prestò un tecnico informatico dell'INFN.

Sotto la supervisione di Tonino Ficarra, si cominciò a utilizzare il “mangiaspago” imprestatoci, per la notte, dall'INFN, per digitalizzare, con manodopera studentesca (pagata), i tracciati cartacei.

Si trattava di un misuratore di coordinate usato per scansionare le tracce delle camere a bolle.

Le misure venivano scritte in automatico su schede perforate e i dati elaborati coll'IBM 1620 per derivare, mediante software sviluppato in casa, posizione e flusso delle sorgenti presenti.

Nell'estate del 1965 durante una scuola estiva a Varenna, alla quale erano presenti Burbidge, Fowler, Sandage, Thorne e Giacconi, fu possibile far circolare un po' dei nostri primi risultati. Burbidge, cui fu mostrato il *preprint* del catalogo *BI*, rimase impressionato dal numero di radiosorgenti non precedentemente catalogate che vi apparivano. Fowler chiese ripetutamente se i “600” (metri) di estensione dell'EW fossero *piedi* o cosa altro.

Nel novembre del 1965 si tenne a Bologna il Congresso annuale della SIF. Ceccarelli fu invitato a fare una relazione sulla “Croce del Nord”, nell'Aula Magna di Fisica, piena di gente. 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 ROUB, ventiquattro persone, esclusi, per regolamento della SIF, i professori ordinari (Ceccarelli e Mannino). Carla, unica donna del gruppo, ritirò l'assegno a nome di tutti.

Subito dopo, a seguito di uno scambio di lettere con Ryle, inviammo al *Nuovo Cimento* un articolo con i conteggi delle nostre radiosorgenti e una dettagliata analisi degli effetti strumentali e delle correzioni applicate.

In questa occasione Carla e Marcello, per stimare la *confusione*, che irripidisce i conteggi, avevano fatto, all'IBM 1620, il primo *Montecarlo* della nostra storia. Avevano fabbricato cioè un *fantacielo* distribuendo in posizioni casuali radiosorgenti, simulandone l'osservazione con l'EW e analizzando i *fantatracciati* come se fossero state osservazioni vere. Il confronto fra i dati d'ingresso e quelli di uscita avrebbe fornito le correzioni da apportare ai conteggi. Per i numeri a caso che, rinormalizzati, diventavano le coordinate celesti delle *fantaradiosorgenti* avevano usato una lista presa da un libro di Marcello.

I nostri risultati erano intermedi fra quelli del gruppo di Ryle (modello relativistico) e le previsioni della Steady State (Mills), sebbene con notevoli incertezze a causa della *confusione* per le sorgenti più deboli (malgrado l'applicazione delle correzioni stimate col Montecarlo).

Questa fu la seconda pubblicazione scientifica ottenuta con l'EW. Poco tempo dopo avemmo l'opportunità di discuterne con Dennis Sciama, che era venuto per fare un seminario proprio sulla “Teoria dello stato Stazionario”.

Oltre a ciò, ci capitò un grosso colpo di fortuna. Dopo l'estate uscì sull'*Astrophysical Journal* la prima lista delle quasar selezionate otticamente da Sandage

(QSO). Ci lanciammo su di essa e facemmo rapidamente osservazioni con l'EW, senza trovare emissioni radio significativa da nessuno dei 15 oggetti osservati, a un livello di circa un ordine di grandezza inferiore a quella delle quasar radio (QSS) più deboli. Inviammo una lettera all'*Astrophysical Journal*, che la pubblicò velocemente. Questo lavoro ebbe un notevole successo e rimase per molto tempo quanto di meglio su questo argomento.

Altre ricerche con il solo EW che produssero una decina di pubblicazioni furono: osservazione della striscia di cielo $30^\circ < \delta < 40^\circ$ per la misura del flusso a 408 MHz delle prime 520 radiosorgenti 4C (Cambridge, GB a 178 MHz) pubblicate per studiarne lo spettro radio, ossia l'andamento del flusso in funzione della frequenza; osservazioni di campioni vari di QSO, di galassie a spirale, di nebulose planetarie, e altro.

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

Apnea 2: nuova mancanza di ossigeno (finanziamenti)

Come detto, col radiotelescopio mutilo del ramo NS si avevano delle incertezze sulle posizioni delle radiosorgenti più deboli. Inoltre al livello di 1 Jy la *confusione* era già importante. Il passo, ora *veramente cruciale*, era il completamento della "Croce", con la messa in funzione almeno dei 300 m esistenti del ramo NS. Il che richiese altri tre anni dalla inaugurazione dell'EW...

In attesa di potere procedere nei lavori, alcuni di noi furono mandati, a turno, al Caltech (Pasadena, California) per fare esperienza con l'interferometro della Owens Valley e i telescopi ottici a Monte Palomar: Alessandro 1966-67 e noi 1967-68. In seguito (1969-70) ci andrà Gavril Grueff, di cui parleremo fra poco.

Ceccarelli cercò di stabilire dei rapporti con altri centri astronomici (USA, UK). Dopo un incontro con 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*".

Il ritardo nell'operazione Nord-Sud era dovuto a vari fattori: ritardo nei finanziamenti sul fronte MPI da un lato, difficoltà con il CdA dell'Università dall'altro. Come Puppi ha più volte ricordato, l'Università di Bologna non recepì mai la potenzialità innovativa del progetto e lo considerò sostanzialmente uno sgradevole disturbo.

In questi tre anni si aveva avuto un certo cambiamento nello staff tecnologico. Rosatelli era rientrato al CNEN e Gelato era stato assunto Estec (Centro Europeo per le Ricerche Spaziali, Olanda): due esperti ingegneri perduti... Era subentrato, come ingegnere, Giuliano Colla e c'era stato un determinante crescendo del coinvolgimento di Gavril Grueff e di Tonino Ficarra (neo-laureati), tutti, come i precedenti, più o meno precari (docenti universitari incaricati, borsisti, contrattisti, ecc...).

Il lavoro comunque era proseguito.

Il problema della messa in fase della NS era stato risolto, alla fine del 1965, con un semplice e ingegnoso sistema: anziché usare pezzi di cavo per aggiustare i ritardi di fase fra le antenne, Sinigaglia aveva usato lo stratagemma di linee di trasmissione riempite di un dielettrico liquido (cherosene), che permetteva di variare le fasi con continuità. Goliardo Tomassetti era diventato il “mago dell’alta frequenza” (408 MHz, frequenza moderatamente bassa per la Radioastronomia, era invece considerata alta per le radio-comunicazioni...). Giuliano Colla aveva ereditato da Gelato il progetto di codificatore per registrare il segnale su nastro magnetico, che ci 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”. La catena di registrazione e acquisizione su nastro magnetico dei dati era dunque pronta.

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.

Ceccarelli (10 agosto) dalla villeggiatura scriveva ad Alessandro: *“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 strumentizzando tutti quanti per una Notte di S. Bartolomeo. E credo di riuscire a trascinare anche Puppi”*.

Ricordiamo molto bene che, poi, Ceccarelli ci raccontò dell’intervento durissimo di Puppi che minacciò di chiedere al Ministero della Pubblica Istruzione il trasferimento del progetto “Croce del Nord” all’Università di Padova.

Questo aiutò non poco sul fronte bolognese.

Restava però ancora 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 ossessivo 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 di istituzione del Laboratorio Nazionale di Radioastronomia era stato definitivamente respinto, commentò “[...] *quel tesoro del Tesoro ha bocciato il progetto [...]*”.

5. La piccola “Croce del Nord” e il B2

Non avendo altra scelta ci si rimboccò le maniche, G. Grueff in primis, 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 divennero cinque).

La notte della vigilia di Natale 1967 Alessandro e Gavril poterono vedere le prime radiosorgenti con la “Croce” di 300 m × 600 m (Fig. 6) che aveva un potere risolutivo (3×10) primi.

Un primo lotto di osservazioni produsse un catalogo preliminare di 328 radiosorgenti a 0.2 Jy che fu pubblicato nel luglio 1968.

In seguito, nel 1970, venne pubblicato, su *Astronomy and Astrophysics*, il *B2.1*, un catalogo di una striscia di cielo che conteneva più di 3000 radiosorgenti con flusso fino a 0.2 Jy (almeno cinque volte inferiore a quella dei grandi cataloghi allora esistenti). Forte impatto a livello internazionale: l'articolo sul *B2.1*, per qualche anno, fu, fra gli articoli italiani di Astronomia, il più citato a livello internazionale.

Nei tre anni successivi continuarono le osservazioni sistematiche e si pubblicarono i successivi *B2.2*, *B2.3* e *B2.4* catalogando in totale circa 10000 radiosorgenti.

Per l'elaborazione informatica delle osservazioni alcuni membri del gruppo avevano scritto il software necessario. Fu possibile accedere al calcolatore IBM del CNEN e l'analisi dei dati fu ordini di grandezza più rapida e certamente più accurata.

In parallelo alla produzione dei cataloghi si iniziò un progetto di identificazione ottica delle radiosorgenti *B2* per classificarle secondo la loro controparte ottica, usando le stampe delle lastre fotografiche (*print*) del telescopio Schmidt da 48 pollici del Palomar.

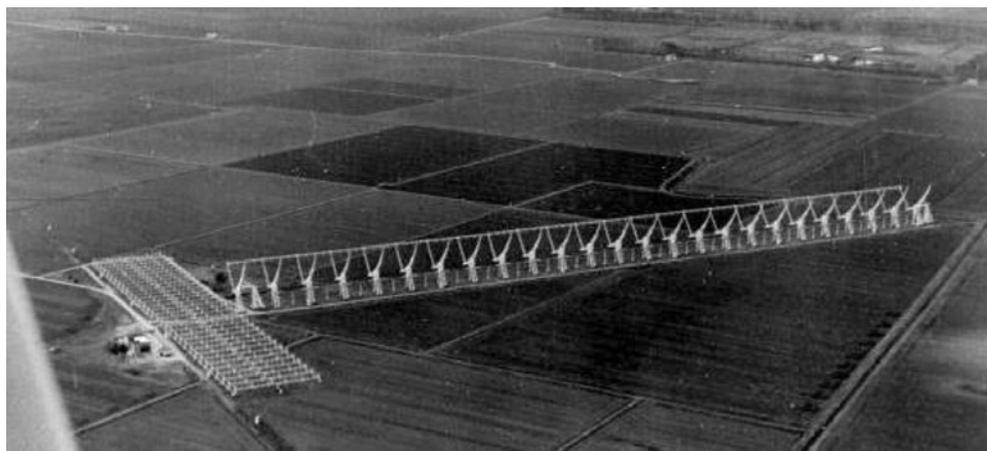


Figura 6.

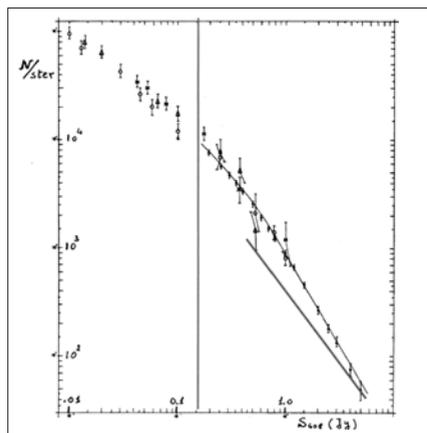


Figura 7.

Il *B2* ebbe un forte impatto a livello internazionale. Era meno esteso del *4C* (quarto catalogo di Cambridge) ma era molto più profondo.

La $\text{Log } N - \text{Log } S$, ottenuta con grande statistica, è riportata in Fig. 7. La linea verticale indica il limite di flusso dei nostri dati, mentre i conteggi a flussi più deboli, in perfetto accordo coi nostri, vengono da un piccolo campione osservato a Cambridge (il *5C*). La linea inclinata rappresenta la pendenza 1.5 dello Steady State. I dati mostravano, senza ombra di dubbio, che l'Universo si è evoluto secondo il modello relativistico di Friedman.

Lo scopo primo del progetto era dunque 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).

A questo punto avevamo, comunque, la merce di scambio di cui Ceccarelli aveva sottolineato la necessità. Illustri colleghi stranieri cominciarono a utilizzare il *B2*.

Una indicazione chiara del passaggio dall'essere stimati all'essere richiesti.

Nel 1970 il direttore del *WSRT* (*Westerbork Synthesis Radio Telescope*, lo strumento olandese che, all'inizio degli anni Settanta, rivoluzionò la Radioastronomia) invitò i bolognesi a utilizzare il nuovo interferometro di 1200 m, per osservare radiosorgenti *B2* a differente frequenza (1.4 GHz) e a risoluzione assai migliore (circa 10 secondi d'arco) raffinando le posizioni *B2* per le identificazioni ottiche.

Accettammo con la massima velocità e Carlo Lari, Roberto e altri (soprattutto Grueff e Paola Parma, neo-laureata) iniziarono a fare la spola fra Bologna e Westerbork.

Dopo avere sviluppato il software necessario cominciammo a realizzare anche mappe delle *B2*, ottenendo negli anni interessanti risultati.

Anche con l'Osservatorio di Meudon (James Lequeux, Marie Helene Demoulin e altri) avemmo fruttuose collaborazioni: usando il loro grande radiotelescopio di Nançay i colleghi francesi misurarono i flussi a 1.4 GHz di due campioni di radiosorgenti *B2* deboli, identificate con galassie otticamente brillanti, permettendo di determinarne lo spettro radio, le caratteristiche morfologiche e altre proprietà all'epoca ancora poco note.

6. L'entrata nel CNR e il "completamento" della "Croce". Il B3 e altro

Restava come cosa irrisolta il dare alla Radioastronomia un assetto istituzionale.

Fallita l'operazione "LNRA" del Ministero della PI 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 Puppi.

Il CNR istituì il Laboratorio di Radioastronomia, diventato poi Istituto di RadioAstronomia (IRA), con Setti direttore. Tramite esso si garantiva un finanziamento regolare per ricerca e strumentazione, posizioni stabili per ricercatori e tecnici e la possibilità di sviluppi successivi, sia tecnici che informatici. In tempi accettabili furono a disposizione una decina di posti di lavoro, fra tecnici e ricercatori. In due tornate vicine di concorsi furono assunti con posizioni permanenti per la ricerca i già citati Grueff, Ficarra, Colla, Lari e inoltre Liliana Formiggini, Roberto Bergamini (teorico, collaboratore di Setti), Mario Vigotti e Lucia Padrielli, che in precedenza erano precari. In particolare ricordiamo fra questi Lucia, prematuramente scomparsa nel 2003, che, oltre a essere stata un'ottima scienziata e grande amica, ha avuto un ruolo molto importante nella crescita dell'IRA, quando ne ha avuto, per anni (1986-99), la direzione.

Si cominciava a respirare...

Nel periodo 1972-76, sotto la gestione CNR, fu possibile un robusto aggiornamento della "Croce" (attori principali Grueff, Ficarra e Tomassetti). Il ramo N-S fu tagliato nel senso della lunghezza, e le antenne (ora lunghe circa 12 m) furono ridistribuite in NS così da ottenere un allineamento di 600 m, che raddoppiava il potere risolutivo totale della "Croce" portandolo a (2.6×4.8) primi.

L'elettronica e il software per la gestione ed elaborazione dati furono radicalmente modificati per fare funzionare la "Croce" come un interferometro multiplo (6 sezioni EW \times 8 sezioni NS) permettendo di ottenere dati ancora migliori.

Fu prodotto un nuovo catalogo (il B3, 1985) di 13354 sorgenti, a un flusso limite di 0.1 Jy, due volte inferiore a quello del B2.

Di nuovo questo catalogo ebbe un impatto notevole a livello internazionale, anche per la tecnica innovativa con cui furono effettuate le osservazioni.

I colleghi del NRAO invitarono a un lavoro congiunto: osservare col *VLA* (*Very Large Array*, Socorro, USA) a 1.4 GHz, con la risoluzione di 15 secondi d'arco, un campione di 1049 radiosorgenti estratto dal B3 per identificazioni ottiche profonde e cosmologia (il catalogo B3_VLA).

Successivamente, in collaborazione col Max Planck Institute für Radioastronomie di Bonn, furono misurati a Effelsberg i flussi a sei frequenze (da 151 MHz a 10.6 GHz) di tutte le sorgenti del B3_VLA. Per molto tempo questo è stato il miglior catalogo multi-frequenze disponibile.

Dopo il *B3* il compito principale della “Croce” era esaurito (seguiranno altre attività: *pulsar*, *SETI*, *debris spaziali*, ecc.).

Tornando un po' indietro nella cronologia, ricordiamo che con l'entrata nel CNR, verso la fine degli anni Settanta, perdemmo l'utilizzo del centro calcolo del CNEN (di cui si doveva pagare l'utilizzo...) e dovemmo servirci del calcolatore del CNR, al CNUCE di Pisa, che sarebbe stato gratuito. Non esisteva ancora la rete informatica, e, per trasmettere schede, nastri e stampe, facevamo uso di corrieri (umani) che trasportavano in camion, avanti e indietro, capaci cassette di legno contenenti il nostro preziosissimo materiale (la chiamavamo *trasmissione a banda larga*).

Fortunatamente a partire dalla fine del 1980 fu costituito all'IRA un centro calcolo con un ottimo staff, sotto la supervisione di Mauro Nanni. Venne prima il VAX 11/780 (fine 1980), poi l'ARRAY PROCESSOR necessario per velocizzare il calcolo delle Fast Fourier Transform, indispensabili per l'analisi dei dati interferometrici (1985 ca., finanziamento MPI) quindi il calcolatore parallelo CONVEX 210 (1989).

7. L'Astrofisica

Verso la metà anni Settanta, grazie ai grandi interferometri (*WSRT* prima, e in seguito *VLA* e poi *VLBI*), l'interesse generale si era spostato dalla catalogazione delle radiosorgenti allo studio della loro fisica, su cui numerosi modelli si stavano sviluppando.

Da tempo, già con strumenti a media risoluzione (decine di secondi d'arco) si era capito, che le radiosorgenti avevano in genere una struttura doppia (in Fig. 8 l'immagine radio di Cigno A) con due *lobi* da parti opposte dell'oggetto ottico associato (galassia o quasar), quando visibile. Questi potevano essere collegati con uno o due strutture lunghe e strette, i *getti* (*jets*), che emergevano dall'oggetto ottico al cui centro poteva o no comparire una debole radiosorgente di piccole dimensioni (il *nucleo radio* o *core*). Dove i getti terminano nel lobo può comparire una regione più luminosa (in inglese *hot spot*). Ma le variazioni sul tema erano moltissime.

Quindi l'interesse per l'alta risoluzione angolare e la multi-frequenza.

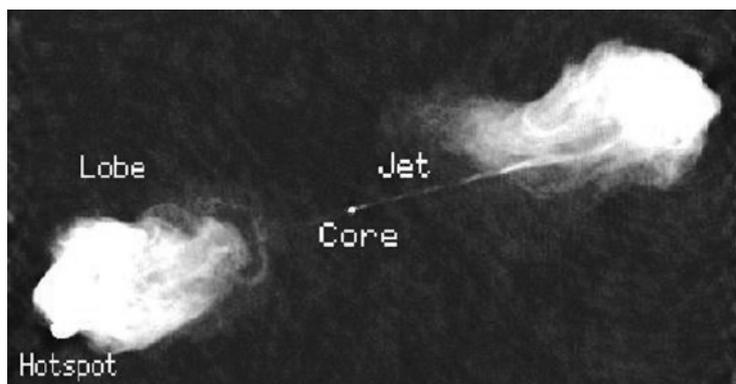


Figura 8.

L'uso combinato dei dati prodotti da questi strumenti permetteva di definire la struttura delle radiosorgenti dalla grande alla piccolissima scala. Le informazioni spettrali e della polarizzazione fornivano poi le informazioni fisiche da mettere a confronto coi modelli teorici.

Indagini con questi strumenti risolvevano importanti problemi e al tempo stesso ne sollevavano di nuovi. Esempio:

- L'energia della radiosorgente è prodotta nel nucleo della galassia.
- L'energia viene trasmessa dal nucleo ai lobi tramite i due getti.
- L'energia viene trasmessa tutta ai lobi, o c'è perdita nella trasmissione?
- In vari casi i due lobi non sono allineati rispetto al nucleo e getti. Perché?
- C'è interazione dinamica fra getto e ambiente?
- Si può spiegare l'evoluzione della radiosorgente?

In questo settore di indagine a Bologna si avviarono o continuarono vari progetti, grazie anche alla politica di apertura agli utenti esterni di *WSRT*, *VLBI* e *VLA*.

Esempi di progetti, che hanno coinvolto gruppi di persone all'IRA:

– *Galassie lontane e quasar*. Basato sostanzialmente sul *B3_VLA*, in collaborazione con colleghi americani. Del migliaio di radiosorgenti che costituiscono questo catalogo, circa 350 sono state identificate otticamente usando i *print* del Palomar, e, grazie a questa collaborazione, si sono ottenute misure di distanza (*redshift*, indicato con z) molto grandi (per l'epoca), fino a $z \approx 4.5$, grazie alla partecipazione dei colleghi americani che avevano accesso ai grandi telescopi ottici, praticamente inaccessibili a noi "forestieri". Inoltre si sono prodotte mappe a una risoluzione assai più alta di quella della "Croce", con evidenti possibili risvolti scientifici.

– *Campione completo di 105 radiogalassie di bassa luminosità* ($\log P \text{ (W/Hz)} < 24$, le radiogalassie potenti erano già state ampiamente studiate) relativamente vicine ($z < 0.2$, *mag.* < 17) e tutte con *redshift* grazie alla collaborazione con Marie Helene Demoulin-Ulrich (Kitt Peak e Mc Donald Observatory, USA). Il campione è noto in letteratura come "*The B2 sample of radio galaxies*". È stato studiato per molti anni con *WSRT* prima e col *VLA* poi, a varie frequenze e risoluzioni sia a Bologna che in altre sedi. A partire dagli anni Novanta sono state effettuate anche osservazioni in banda X e in banda ottica con lo Hubble Space Telescope (collaborazione con Università e Osservatorio Astronomico di Torino).

Questi studi hanno fornito fondamentali informazioni sulla formazione di getti e lobi. Si è trovato che nelle radiogalassie di bassa luminosità (*B2*) i getti sono più prominenti rispetto ai lobi che non nelle radiogalassie più potenti. Spesso i due getti sono asimmetrici in luminosità e brillantezza, i due lobi non sono sempre allineati rispetto al nucleo e i getti, c'è evidente interazione dinamica con l'ambiente (interstellare/intergalattico) con perdita di energia nel trasporto. Esempi sono riportati in Fig. 9.

Grazie alla collaborazione con gli astrofisici teorici Geoff Bicknell (Australia) e Robert Laing (ex-Cambridge) si è dimostrato, mediante l'uso di modelli *magnetoidrodinamici*, che la larghezza e la prominente di un getto dipende dal rapporto fra la velocità del getto

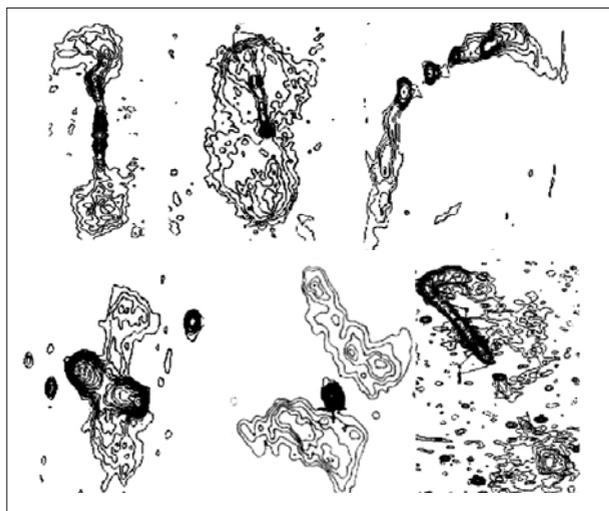


Figura 9.

stesso e la velocità del suono nel mezzo circostante. Tale rapporto, detto *numero di Mach* e indicato con M , è ben noto in aeronautica. Per M piccoli (< 1) il getto è poco efficiente, perde energia nel trasporto e quindi diventa visibile. Si mescola col mezzo interstellare, si allarga e si attenua in brillantezza. Può distorcersi. Per $M > 1$ il getto è molto efficiente, trasporta tutta l'energia, non lo vediamo o al massimo vediamo dei picchi di brillantezza allineati, che sono in realtà fronti d'urto, come nelle scie che si lasciano dietro gli aerei supersonici. Formano le *hot spot*.

In qualche caso si è perfino capito che le strane forme dei getti sono prodotte dal moto orbitale della radiogalassia intorno alla galassia compagna di un sistema binario.

Un caso notevole è quello della radiosorgente associata al sistema doppio di galassie NGC 326. La sua strana forma (parte sinistra di Fig. 10) sembrava suggerire, fin dal 1978, quando fu osservata, che i getti fossero soggetti a un moto di precessione, come nel modellino disegnato, che distorceva i lobi. Molti anni dopo (2001) Matteo Murgia (spostatosi intanto nella sede dell'Istituto di Radioastronomia a Cagliari), in una immagine radio di altissima qualità in cui i getti sono visibili fin dalla loro origine (parte destra di Fig. 10) mostrerà che essi si dipartono dal nucleo di una delle due galassie del sistema binario, in orbita intorno alla compagna (si veda l'ingrandimento dove i getti sono sovrapposti all'immagine ottica).

Il campione *B2* di radiogalassie deboli è rimasto unico nel suo genere, ed è tuttora studiato e usato da altri colleghi, anche stranieri.

– *Galassie in ammassi (RADEX)*. Alla fine del 1978, il lancio in America del satellite per osservazioni in banda X, HEAO-2 (poi rinominato “Einstein Observatory”), primo satellite X in grado di produrre immagini, aveva stimolato in van der Laan (direttore scientifico dell'Osservatorio di Leiden, Olanda) l'idea di un grandioso progetto da farsi in collaborazione coi colleghi del Center for Astrophysics (CfA) di Boston, depositari

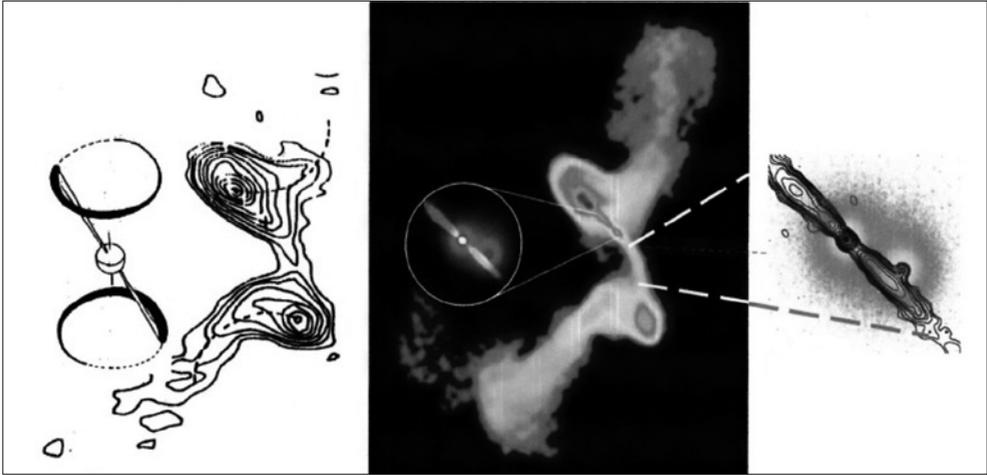


Figura 10.

dei futuri dati X : osservare con $WSRT$ campi che erano nei programmi di osservazioni dell'Einstein Lab, per poi combinare i risultati (di qui il nome $RADEX$ del progetto).

Ai colleghi bolognesi, invitati a partecipare, furono assegnati quegli Ammassi di Abell appartenenti ai programmi del "Einstein Observatory Consortium" che non avevano ancora osservazioni radio.

In particolare osservammo col $WSRT$, a 1.4 GHz, con (24×24) secondi d'arco di risoluzione, 63 ammassi con classe di distanza fra 1 e 5 e con declinazione $\delta > 15^\circ$ (limite dovuto a ragioni tecniche).

In questi campi sono state rivelate alcune centinaia di radiosorgenti con $S_{1.4}$ maggiore di qualche Jy, di cui un centinaio associate a galassie dell'ammasso.

Peccato che la parte "EX" di $RADEX$ non abbia funzionato, e che i dati X siano rimasti nei cassettei dei colleghi americani fino alla loro pubblicazione. Il campione di radiogalassie in ammasso prodotto a Bologna, comunque, è risultato sufficientemente completo da permettere considerazioni fisiche statistiche.

In particolare, si è trovata fra le radiogalassie in ammasso una grande percentuale di *radiosorgenti a coda* (dove, cioè, i getti e i lobi non sono allineati con la galassia che li origina, ma sembrano "due code lasciate indietro" dal moto della galassia).

Vi sono code "aperte" (*Wide Angle Tail, WAT*; la galassia in Fig. 11 si muove come indicato dalla freccia) e code "strette" (sembrano *girini* in cui la galassia è la testa, *Head Tail, HT*). Queste ultime si muovono più velocemente nell'ammasso che le WAT e sono orientate a caso, mentre le WAT sembrano muoversi verso l'esterno. Le WAT sono preferibilmente associate alle galassie ellittiche più brillanti. Si è anche trovato che la probabilità che ha una galassia di diventare radiosorgente è indipendente all'essere isolata, in un piccolo gruppo o in un ammasso, malgrado la densità di galassie negli ammassi di Abell sia 10 volte quella delle galassie isolate o in piccoli gruppi. Se ne conclude che ciò che conta di più per diventare radiosorgente è l'essere o meno una ellittica gigante.

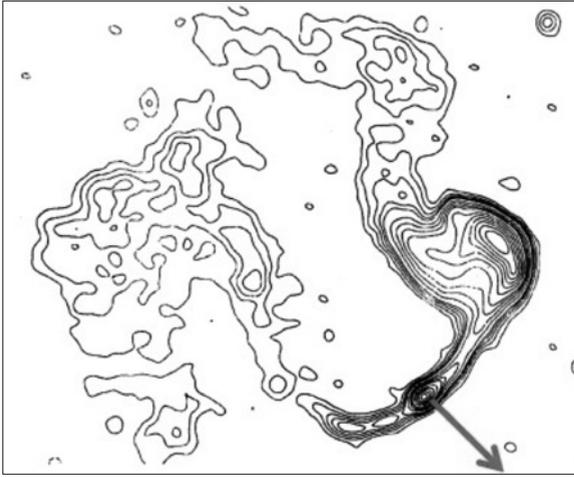


Figura 11.

– *L'ambiente negli ammassi di galassie.* Le distorsioni delle radiogalassie e gli studi di polarizzazione suggeriscono la presenza di un denso mezzo intergalattico (rivelato poi da osservazioni X). In alcuni casi, inoltre, strutture radio diffuse, non associate in modo ovvio a galassie dell'ammasso (chiamate *Aloni* e *Relitti*) permeano l'ambiente e testimoniano dell'esistenza di elettroni relativistici e campo magnetico. Questo ha aperto un ampio campo di ricerca, anche teorica, per comprenderne l'origine.

Fra i primi ammassi studiati all'IRA, e forse il più studiato in assoluto data la sua vicinanza a noi, c'è l'ammasso di Coma ($z = 0.023$). A questo si sono dedicate numerose persone ed è tuttora argomento di studio sperimentale e dibattito teorico.

8. Verso l'Interferometria a Lunghissima Base (Very Long Baseline Interferometry, VLBI)

Come già detto, verso la metà degli anni Settanta, il massimo dell'interesse per la Radioastronomia si era spostato verso le alte frequenze e la risoluzione angolare sempre più spinta.

A Bologna si cominciava a ragionare su un ulteriore sviluppo tecnologico, con uno strumento flessibile e di interesse internazionale. Si pensò a un grande interferometro. Ma c'era già quello di Westerbork (ora esteso a 1.5 km) e quello di 24 km del *VLA* stava iniziando a operare. Inoltre non avevamo né la forza lavoro né quella finanziaria per intraprendere un tale progetto.

C'era però l'interessante possibilità di entrare nell'impresa *VLBI*, di cui da un decennio ormai si parlava ma che era ancora a un livello pionieristico.

Il *VLBI* non differisce, in linea di principio, dalla interferometria convenzionale se non per la distanza reciproca dei radiotelescopi (centinaia e migliaia di km) che non

era possibile, all'epoca, collegare fisicamente in alcun modo (dal 2003 si può fare con la fibra ottica).

L'utilizzo di questa tecnica era perciò assai complicato.

A ogni antenna era necessario registrare su maxi-nastri magnetici (le "pizze" per le pellicole dei film), milioni di dati al secondo, insieme a marche di tempo, per la sincronizzazione delle osservazioni provenienti dalle antenne individuali, con una precisione migliore del miliardesimo di secondo di tempo. Quindi si dovevano spedire i nastri a un computer specializzato (*correlatore*) e correlare i dati a posteriori (con conseguente grande difficoltà a rimuovere, in fase di analisi, gli errori antenna-dipendenti, come quelli dovuti ad atmosfera, oscillatori locali, ecc.).

Alcuni riuscitissimi esperimenti condotti in Canada, USA, URSS su distanze (*linee di base*) di centinaia di km, avevano permesso, già nel 1967, di effettuare con successo un esperimento Canada-USA, su una linea di base di 3000 km e nel 1969 un esperimento USA-URSS su 8000 km di linea di base. Ciò aveva cominciato a dimostrare che la tecnica *VLBI* era applicabile. E poiché l'accuratezza con cui si può mappare una radiosorgente migliora sensibilmente col numero delle linee di base, piccoli gruppi di osservatori avevano cominciato a creare mini-reti *VLBI*, in modo da realizzare, in ogni esperimento, più linee di base differenti.

Ma perché imbarcarsi in un'impresa così faticosa? Per la semplice ragione che col *VLBI* si potevano ottenere risoluzioni angolari inferiori al centesimo di secondo d'arco e questo permetteva, per esempio, di guardare dentro al nucleo delle radiosorgenti, dove risiede il motore che produce tutta l'energia irradiata. In Fig. 12 immagini a varie frequenze e risoluzioni di Cigno A mostrano dettagli via via più interni della radiosorgente.

Inoltre era possibile misurare eventuali variazioni della lunghezza di una linea di base, con evidenti interessanti applicazioni geodinamiche.

In Europa, dal 1968, gli osservatori di *Jodrell Bank* (GB), *WSRT/Dwingeloo* (NL), *Onsala* (SW), *Effelsberg* (D) avevano cominciato a fare, con accordi informali, osservazioni *VLBI*.

Nel settembre 1975, Setti partecipò, con un'altra ventina di colleghi da tutta l'Europa, a una riunione per discutere sulla possibilità di una *rete europea*. Scrive Roy Booth che Setti "*ne fu così entusiasta che, persino in quella fase così preliminare, promise di costruire tre antenne in Italia*", sollevando sommo interesse e incoraggiamento da parte dei colleghi. In Fig. 13 le stelline grigio scure rappresentano le 4 stazioni della mini-rete europea, quelle grigio chiare le future antenne italiane.

Il ruolo dell'Italia, con le antenne a Medicina, in Sicilia e in Sardegna, era strategico, non solo perché più che raddoppiava il numero di linee di base (migliorando la qualità delle mappe), ma anche perché estendeva la rete in direzione NS, raddoppiando il potere risolutivo in questa direzione.

Dal punto di vista nostro, l'Italia avrebbe avuto un suo mini-*VLBI* di 3 antenne da poter utilizzare indipendentemente dalla rete europea, almeno per esperimenti semplici, soprattutto se urgenti.

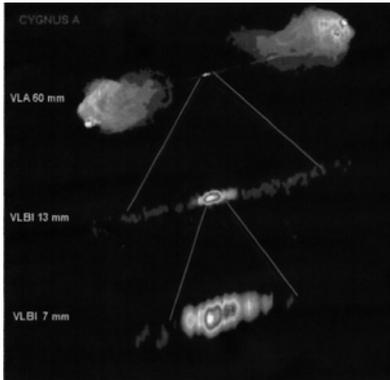


Figura 12.

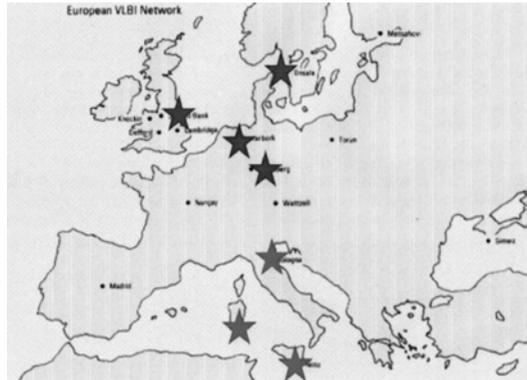


Figura 13.

Infine era di interesse geofisico il fatto che una futura antenna in Sardegna avrebbe rappresentato un ottimo punto di riferimento geodinamico. Infatti, allo stato attuale, la regione attraversa una fase che la rende una formazione stabile e poco attiva dal punto di vista geologico.

Il progetto fu approvato dal CNR nel 1979.

Setti, degno allievo di Puppi, si diede da fare per reperire dal CNR i fondi necessari per le antenne, gli orologi atomici, ecc.

Arrivarono anche un certo numero di posti tecnici, per manutenzione e sviluppo, e per costituire anche uno staff adeguato per il complicato metodo di osservazione. Gavril Grueff fu il direttore del progetto e della sua realizzazione.

Il 5 marzo 1980 i quattro direttori più Setti discussero e firmarono il documento costitutivo dell'*EVN (European VLBI Network)* come struttura internazionale aperta all'utilizzo da parte della comunità scientifica, con l'impegno di dedicare a osservazioni congiunte *VLBI* parte del tempo di ogni radiotelescopio. Per la correlazione si sarebbe utilizzato il correlatore a tre stazioni del Max Planck Institute für Radioastronomie di Bonn, nato per la geodinamica. Setti fu il primo direttore del neo-formato collegio dei direttori. Questo senza avere ancora un'antenna...

Fin dal 1979-80, per impraticarsi col *VLBI*, un certo numero di bolognesi cominciò a fare osservazioni con le succitate quattro antenne europee o con reti che si estendevano ad altre regioni nel mondo, e a viaggiare fra qui e Bonn per correlare i dati personalmente nelle ore non lavorative del personale tedesco (sera e notte, sabati e domeniche, per non dire del giovedì e venerdì grasso...).

Gli esperimenti furono spesso condotti con collaborazioni internazionali. La natura stessa del *VLBI* comportava l'assenza di barriere nazionali. Persino con l'URSS – c'era ancora il muro di Berlino – si riusciva a lavorare (anche se con qualche difficoltà burocratica in più).

Il software che avevamo scritto per trattare i dati interferometrici di *WSRT* non era adeguato per elaborare i dati *VLBI* e ne dovemmo scrivere di nuovo, che usammo fino a quando il famoso *AIPS*, scritto in USA per elaborare i dati *VLA*, non fu adattato anche ai dati *VLBI*.

Nel giugno 1983 organizzammo a Bologna un grandioso convegno scientifico (che tutti ancora ricordano anche per l'ottima accoglienza e il buon cibo) dal titolo "*VLBI and compact radio sources*".

Nell'autunno 1983 fu inaugurata l'antenna di Medicina (BO), di 32 m di diametro. L'antenna gemella di Noto (SI) seguì nel 1988. L'*SRT* (*Sardinia Radio Telescope*, 64 m, CA) fu inaugurata nel 2013.

9. L'era del VLBI a Bologna

Citiamo, come esempio, alcune delle ricerche *VLBI* all'IRA, quelle che hanno coinvolto molte persone. Sono stati tutti esperimenti di lunga durata e, solitamente, anche con collaborazioni internazionali.

– *Radiosorgenti variabili in flusso a bassa frequenza*. La problematica risale agli anni Settanta, ma la tecnica allora non era adeguata per indagare sull'origine del fenomeno.

La variabilità in flusso al di sopra di 1 GHz era un fatto ben noto, studiato e spiegato teoricamente come fenomeno *intrinseco* alla radiosorgente, dal modello di van der Laan del 1966: plasmoidi che irradiano per sincrotrone che si espandono relativisticamente. Il modello escludeva però variazioni cospicue di flusso alle basse frequenze, se non invocando fenomeni relativistici estremi e temperature di brillantezza inaccettabilmente alte. Tuttavia radiosorgenti che mostravano questo comportamento venivano segnalate sempre più di frequente, quindi il fenomeno richiedeva di essere compreso.

Nel 1975 si era cominciato a Bologna un lavoro sistematico (che durò fino agli anni Novanta) di monitoraggio a 408 MHz, col solo EW, di un campione (cresciuto negli anni fino a 125 oggetti). Intorno agli anni 1979-80, la collaborazione con Margo e Hugh Aller del Michigan Observatory aveva fornito osservazioni simultanee alle nostre alle frequenze di 4.8, 8.0, 14.5 GHz, che permisero studiare la variabilità in un ampio intervallo di frequenze.

Si trovò che, mentre una parte delle radiosorgenti osservate mostrava variabilità a tutte le frequenze, in accordo col collaudatissimo modello *intrinseco* di van der Laan, una non piccola frazione del campione mostrava variabilità *esclusivamente* a bassa. La causa di ciò era dunque *presumibilmente estrinseca* e probabilmente dovuta a scintillazione (analoga a quella a tutti nota della luce delle stelle) nel mezzo interstellare della Galassia, fenomeno plausibile, ma allora ancora sconosciuto.

Per verificare le due ipotesi era necessario misurare le dimensioni delle radiosorgenti (o loro sottostrutture) con risoluzioni dell'ordine dei millesimi di secondo d'arco (*milli-arcsec, mas*).

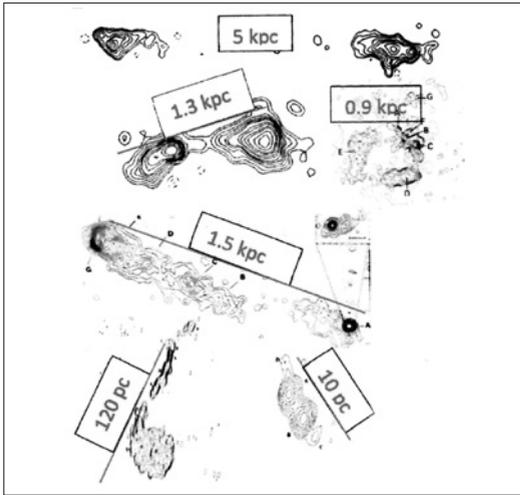


Figura 14.

Osservazioni *VLBI* globali a 18 cm (con 8-11 antenne a seconda della disponibilità degli osservatori), ripetute nel tempo (1980, 1981, 1987) hanno mostrato che variazioni di struttura o nascita di nuove componenti (fenomeni *intrinseci* alle radiosorgenti) sono correlate con aumenti di flusso *solo* per le sorgenti che variano esclusivamente ad alta frequenza.

Per le altre radiosorgenti, lo studio dei parametri (indice e periodo) di variabilità ha rivelato una buona correlazione con la latitudine galattica, mostrando che il fenomeno avviene nella Galassia stessa ed è *esterno* alla radiosorgente. Le dimensioni delle strutture radio hanno permesso di stimare le dimensioni delle disomogeneità del mezzo interstellare (responsabile della scintillazione) e la velocità con cui queste disomogeneità si muovono.

– *Nuclei radio* (come definiti sulla scala dei secondi d'arco) “*brillanti*” ($S > 0.1$ Jy a 5 GHz) in radiogalassie di bassa (molte dal *campione B2*) e alta luminosità.

Alla risoluzione di qualche *mas* i cosiddetti nuclei mostrano di essere dei mini-getti. Si è trovato che le proprietà dei getti, su scale dei 50-100 parsec (pc), sono le stesse per tutte le classi di potenza. Quindi le differenze che si vedono sulla grande scala fra le radiogalassie deboli e quelle forti non dipendono dalle caratteristiche del nucleo ma sono da attribuirsi a una densità del mezzo interstellare della galassia ospite maggiore nelle prime. In questi casi il getto dissipa la sua energia e la radiogalassia risulta più debole.

– *Sorgenti potenti* ($\text{Log } P > 26.5$ a 178 MHz) e *compatte* (dimensioni inferiori a 1-2 secondi d'arco) ma *con spettro ripido* (pendenza > 0.5) a medie/alte frequenze con eventuale appiattimento a basse frequenze. Questa tipologia di radiosorgenti era del tutto inaspettata sulla base delle conoscenze dell'epoca (fine anni Settanta) che prevedeva per gli oggetti compatti uno spettro piatto anche ad alte frequenze.

Per ragioni storiche si sono considerate tre sottoclassi, che sono forse legate da una sequenza evolutiva:

CSS = *Compact Steep spectrum Sources* (appiattimento dello spettro a frequenze $\lesssim 400$ MHz, dimensioni $\lesssim 15$ kpc); *GPS* = *Gigahertz Peaked Sources* (picco nello spettro a circa 1 GHz, dimensioni $\lesssim 1$ kpc); *HFP* = *High Frequency Peakers* (picco nello spettro a frequenze > 5 GHz, dimensioni $\ll 1$ kpc).

Si noti che queste radiosorgenti sono completamente contenute nella regione centrale della galassia o quasar che le ospita.

Nei cataloghi di radiosorgenti le *CSS* e *GPS* sono una frazione cospicua del totale (15-30%). Molte, ma non tutte, sembrano la versione su scala ridotta delle sorgenti più grandi, tipo Cigno A. Vi sono strutture distorte o dominate da getti luminosi, fenomeni attribuiti a effetti di proiezione accentuati dalla presenza di moti relativistici all'interno della radiosorgente. In Fig. 14 sono riportati alcuni esempi. Si notino le dimensioni ridotte rispetto a quelle di Cigno A, che si estende per 120 kpc.

C'è un legame con le radiosorgenti di dimensioni di centinaia di kpc?

Per molto tempo le due ipotesi dominanti, ma non soddisfacenti, sono state: *fase giovane* delle radiosorgenti grandi (però sembrano troppo numerose); *bloccate* nella turbolenza nella galassia o QSS ospite (però per mantenerle potenti, occorrerebbero parametri del mezzo interstellare estremi e inaccettabili). In effetti, sulla base della forma dello spettro, si deduce che le *HFP*, il cui spettro raggiunge il massimo a frequenze molto alte, sono più giovani delle *GPS* che sono più giovani delle *CSS*, coerentemente con l'aumentare delle loro dimensioni. Quindi lo scenario della "giovinezza" sembrerebbe essere quello corretto, però...

Verso la fine degli anni Ottanta, dopo una decina di anni di osservazioni da parte di vari gruppi nel mondo, è stato disponibile un campione di oggetti sufficientemente esteso per tentare di fare considerazioni fisiche.

Utilizzando tutti i dati disponibili, abbiamo cercato di costruire un modello plausibile in cui le *GPS/CSS* possono essere considerate la fase iniziale (giovane) delle radiosorgenti di grandi dimensioni. Questo modello è applicabile solo alle radiosorgenti doppie che non sono affette da fenomeni relativistici.

Abbiamo usato modelli evolutivi classici e modelli del mezzo interstellare e intergalattico come dalle informazioni dell'epoca.

Abbiamo quindi considerato due soli processi concomitanti:

1. rifornimento continuo dei lobi da parte del nucleo;
2. perdita di energia dovuta all'espansione dei lobi nello spazio intergalattico.

Inizialmente prevale il processo (1) e la luminosità (P) cresce, i lobi si espandono e le perdite di energia (2) cominciano a contrastare l'aumento di P , che smette di crescere, infine le perdite di energia dominano e la luminosità diminuisce definitivamente.

Con valori standard per densità e distribuzione spaziale del mezzo interstellare e intergalattico si trova che $P \propto LS^{-0.5}$ (LS =linear size, dimensione lineare).

È perciò *plausibile* che le radiosorgenti nascano come *HFP/GPS*, evolvano in *CSS* e infine diventino le radiosorgenti di grandi dimensioni e le *CSS/GPS* che osserviamo ora

potrebbero essere davvero i progenitori di sorgenti grandi, ma *non* di quelle della *stessa fascia di potenza*, bensì di quelle almeno 10 volte più deboli. Questo aggiusterebbe le proporzioni numeriche.

Nel 1999 osservazioni a 230 GHz di un campione di *CSS/GPS* mostreranno che il loro spettro radio si irripidisce a frequenze molto alte, indicando età $\lesssim 10^5$ anni (mediana 7×10^3 anni), cioè almeno 100 volte inferiore all'età delle radiosorgenti grandi, e che le *GPS* sono più giovani delle *CSS*.

Nel 2002 a seguito di un monitoraggio ventennale della separazione delle due componenti in un campione di *GPS*, Polatidis troverà che la velocità di separazione è dell'ordine di $0.1 \div 0.4$ la velocità della luce, il che implica età di 200-3000 anni. In qualche radiosorgente comune al campione di Murgia le stime indipendenti delle età risulteranno simili.

Tutto ciò metterà la parola finale sulla natura di questi oggetti.

10. Conclusioni

Tutte le ricerche che abbiamo citato hanno dato luogo a collaborazioni scientifiche per lo più con Olanda, Jodrell Bank, Nançay, USA, Australia, India, Cina, e, in Italia, prevalentemente Torino.

Grazie a queste collaborazioni, sono state effettuate negli anni misure in altre bande dello spettro elettromagnetico, fino alla banda *X*, che hanno contribuito ulteriormente a migliorare la conoscenza della fisica delle radiosorgenti.

Vi sono stati scambi reciproci di ricercatori per periodi più o meno lunghi, noi all'estero, loro a Bologna, il che ha rafforzato le collaborazioni e stabilito amicizie che durano tutt'ora, anche se siamo ormai tutti pensionati.

Attualmente l'IRA fa parte dell'INAF (Istituto Nazionale di AstroFisica).

Negli anni gli studenti che si sono laureati all'IRA sono stati numerosi, e parecchi di loro sono riusciti a rimanere. Lo "staff" oggi conta una cinquantina di persone, fra ricercatori, tecnici e amministrativi, cui si aggiungono, come associati, (ex) docenti universitari, una decina di post-doc e una decina di dottorandi.

Tutto ciò da una idea nata nel lontano 1959 e fatta crescere e diventata realtà con il lavoro successivo ed entusiasta di tanta gente.

I quasar e la radiazione di fondo X (XRB) a Bologna

Gianni Zamorani*

1. La scoperta dei quasar

Oggi sappiamo che al centro di quasi ogni galassia c'è un buco nero massiccio ($M_{\text{BH}} \sim 10^6 - 10^9$ masse solari). Una frazione di questi buchi neri è attiva ed emette enormi quantità di radiazione a tutte le lunghezze d'onda (dal radio ai raggi gamma). In questa fase questi oggetti vengono chiamati quasar¹ e approssimativamente conosciamo la loro geometria e i processi fisici che producono la loro radiazione a diverse frequenze. Questa radiazione, che proviene da un volume che può essere un milionesimo del volume della galassia in cui questi buchi neri si trovano, può rendere molto difficile la rivelazione della galassia sottostante in immagini ottiche da terra e anche dallo spazio.

All'inizio degli anni Sessanta del secolo scorso i quasar ancora non esistevano. Fig. 1 mostra due articoli "storici" sulla loro scoperta. Nell'immagine di sinistra è riprodotto il *preprint* dell'articolo di Matthews e Sandage (1963), in cui, a valle della determinazione precisa della posizione di tre radiosorgenti, si riportavano le immagini ottiche degli oggetti in quelle posizioni, trovando che un oggetto stellare è presente in ciascuna delle posizioni e che queste *stelle* hanno colori peculiari, molto blu e simili a quelli di stelle molto calde, come le novae o le nane bianche. Uno spettro ottico, ottenuto dagli autori, per la controparte ottica della radiosorgente 3C48 mostrava righe di emissione larghe, non identificate. Nello stesso *preprint* si stimava anche la distanza media (~300 anni-luce) di queste radio-stelle peculiari. Nell'immagine di destra si mostra la riproduzione dell'articolo di Maarten Schmidt (1963), in cui, in sole due pagine, si riporta l'identificazione delle righe larghe trovate nello spettro dell'oggetto "stellare" coincidente con la posizione della radiosorgente 3C273. Come ricordato 20 anni dopo (Schmidt 1983),

* INAF – OAS, Osservatorio di Astrofisica e Scienza dello Spazio, Bologna. Accademico Corrispondente.

¹ Il nome quasar nasce come abbreviazione di *quasi-stellar radio source*.

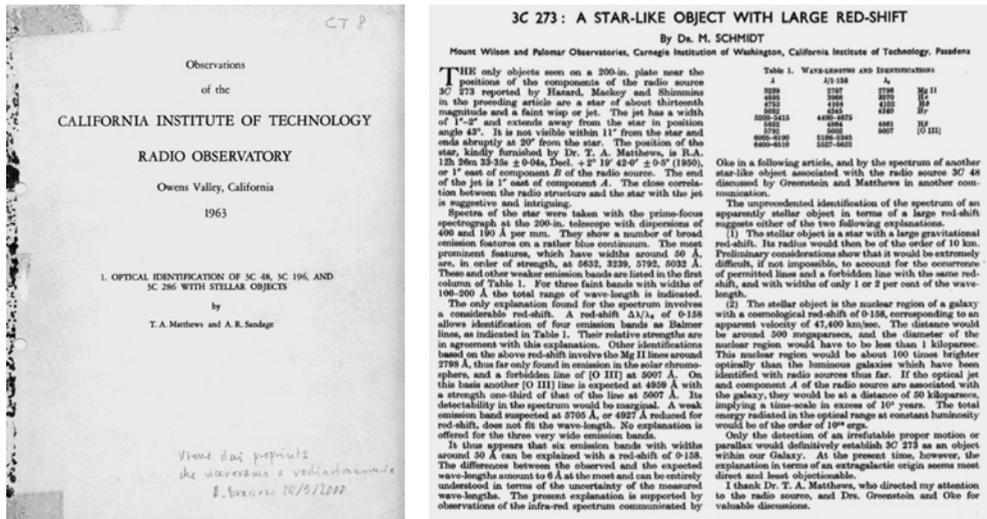


Figure 1. Immagini di due articoli fondamentali nella storia della scoperta dei quasar.

Maarten Schmidt stava finendo di scrivere un articolo per *Nature* in cui descriveva la sua analisi delle righe non identificate nello spettro ottico di 3C273 quando “*Not necessarily for any good reason [...] I started taking the ratio of the wavelength of each line to that of the closest Balmer line. The first ratio was 1.16, the second 1.16, the third [...] 1.16!*” E così si scoprì che quella *radio-stella* era invece qualcosa di completamente diverso, la regione nucleare di una galassia a circa 500 Mpc di distanza², 100 volte più brillante in ottico delle galassie identificate fino ad allora con radiosorgenti³.

Anche se i primi quasar furono identificati come controparti di radiosorgenti, ben presto ci si rese conto che oggetti con colori simili a quelli dei quasar esistevano, in numero ben maggiore, in immagini ottiche (Fig. 2). Solo due anni dopo la scoperta dei primi quasar, Sandage (1965⁴) scriveva:

² Il Mpc è un'unità di misura delle distanze usata in astronomia ed equivale a circa 3.26 milioni di anni luce.

³ A seguito dell'identificazione della distanza cosmologica di 3C273 da parte di Maarten Schmidt, l'articolo di Matthews e Sandage, quando fu pubblicato, conteneva una nuova discussione sulla natura di questi oggetti, che non era presente nella versione originale, sottomessa per la pubblicazione: “*After this paper had been submitted, new evidence strongly suggests that 3C 273, another similar object, has an appreciable redshift ($z = 0.158$; Schmidt 1963) [...] Thus these objects may be associated with a distant galaxy. The absolute magnitude of the star-like objects is $M_v = -24.3$, which is much brighter than any other known galaxy*”.

⁴ Questo articolo di Sandage provocò una reazione durissima da parte di Fritz Zwicky che nel 1970, quando pubblicò il suo *Catalogue of Selected Compact Galaxies and of Post-eruptive Galaxies* (Zwicky e Zwicky 1970), scrisse parole di fuoco contro Sandage, accusandolo di essersi reso responsabile di uno dei casi più eclatanti di plagio scientifico perché, secondo Zwicky, i nuovi oggetti che Sandage affermava di avere scoperto facevano parte di quella classe di oggetti (galassie compatte) che lui aveva scoperto

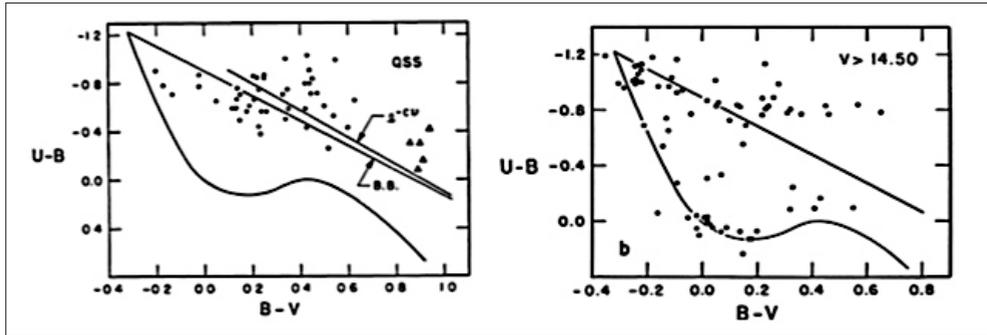


Figura 2. Colori U-B verso B-V per 44 quasar identificati come controparti di radiosorgenti (a sinistra) e per oggetti stellari senza radio emissione, ma con simili colori U-B (a destra) (da Sandage 1965).

Photometric, number count, and spectrographic evidence is presented to show that most of the blue, star-like objects fainter than $m = 16$ found in color surveys of high-latitude fields are extragalactic and represent an entirely new class of objects. Members of this class... resemble the quasi-stellar radio sources (QSS) in many optical properties, but they are radio-quiet. The QSG brighter than $m = 19$ are 10^3 times more numerous per square degree than the QSS.

2. Alessandro Braccesi e i quasar radio-quieti

Alessandro Braccesi, laureato a Bologna nel 1962, nel 1966 andò al Caltech con una borsa di studio annuale, e lì lavorò a stretto contatto con Sandage e Lynds. Come già detto, il lavoro di Sandage aveva mostrato che i quasar avevano un colore molto blu nell'ultravioletto (eccesso ultravioletto), ma bisognava trovare un modo per distinguerli in modo efficiente da stelle con colori U-B simili. Le prime osservazioni spettroscopiche di questi candidati con eccesso ultravioletto non ebbero molto successo e molti dei candidati quasar osservati si rivelarono stelle. Quasi subito Alessandro ebbe quella che alcuni anni dopo (**Braccesi** 1997) definì “una piccola grande idea”, e cioè che le differenze fra lo spettro termico delle stelle e quello non-termico dei quasar si sarebbero dovute manifestare anche nei colori nel vicino infrarosso (eccesso infrarosso) per oggetti con colori simili nell'ultravioletto. Alessandro andò quindi in ufficio da Sandage e gli

e discusso in articoli precedenti. Zwicky lanciò i suoi strali anche sull'editore di *Astrophysical Journal* (Chandrasekhar), colpevole, a suo dire, di avere accettato l'articolo di Sandage il giorno stesso in cui fu mandato alla rivista, senza chiedere un parere a un *referee* competente che, secondo lui, l'avrebbe senz'altro rifiutato. Anche senza raggiungere il livello di polemica di Zwicky, è comunque vero che l'articolo di Sandage fu accolto con un certo scetticismo da una parte della comunità astronomica, forse anche a causa di quello che veniva considerato un trattamento di favore che l'articolo aveva ricevuto da parte dell'editore di *Astrophysical Journal*.

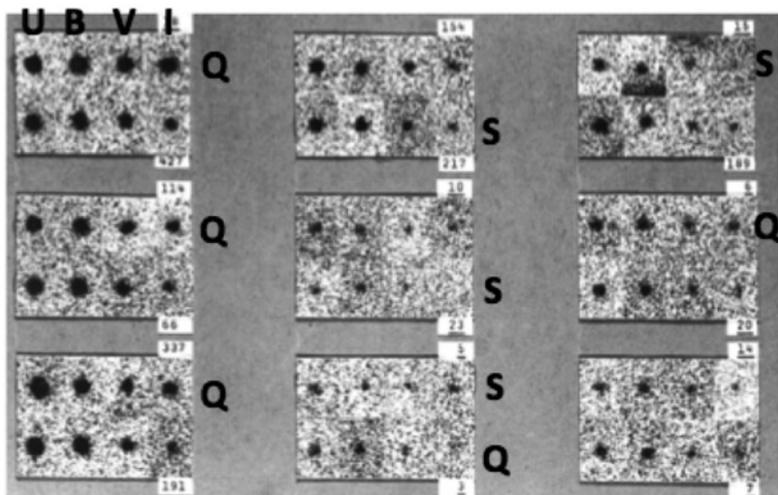


Figura 3. Esempio di immagini in quattro bande (U, B, V, I) di alcuni oggetti, tutti con eccesso ultravioletto ma con diversa emissione nell'infrarosso (queste immagini, prodotte per tutti gli oggetti stellari con eccesso ultravioletto, venivano colloquialmente chiamate *domino* da Alessandro e collaboratori). La Q indica oggetti classificati come candidati quasar sulla base della presenza dell'eccesso infrarosso; la S indica invece oggetti classificati come candidati stelle.

proposte di combinare questi due eccessi per meglio distinguere i quasar dalle immagini delle stelle calde. Sandage immediatamente realizzò la bellezza, nella sua semplicità, di quell'idea, concludendo che *“avrebbe dovuto spararsi per non averci pensato prima lui stesso”*. Prese il telefono e immediatamente prenotò un *“run”* di tre notti al telescopio di 48 pollici del Palomar per Alessandro, per ottenere delle lastre nella banda infrarossa da combinare con quelle già esistenti in bande più blu.

Appena ottenuta questa lastra infrarossa, paragonandola con le lastre nelle bande più blu, Alessandro ebbe immediatamente la conferma che, a parità di colore U-B, ci sono alcuni oggetti che mostrano un chiaro eccesso infrarosso. Ne selezionò alcuni (Fig. 3) che furono poi osservati spettroscopicamente da Lynds e praticamente tutti (16/17) furono confermati come quasar senza nessuna contaminazione di stelle (**Braccesi**, Lynds e Sandage 1968).

Tornato in Italia al termine della borsa di studio con le preziose grandi lastre del telescopio Schmidt del Palomar (36 cm × 36 cm), Alessandro dovette affrontare il problema di misurare le magnitudini degli oggetti. Viste le grandi dimensioni di quelle lastre, non era un problema semplice e non esistevano strumenti che lo potessero fare con la precisione necessaria. Alessandro risolse il problema usando un microfotometro a iride disegnato da lui stesso e che si rivelò eccezionalmente stabile. Iniziò quindi il lavoro e negli anni successivi pubblicò due articoli (**Braccesi e Formiggini** 1969, **Braccesi, Formiggini e Gandolfi** 1970), uno in cui presentò il catalogo e i colori dei

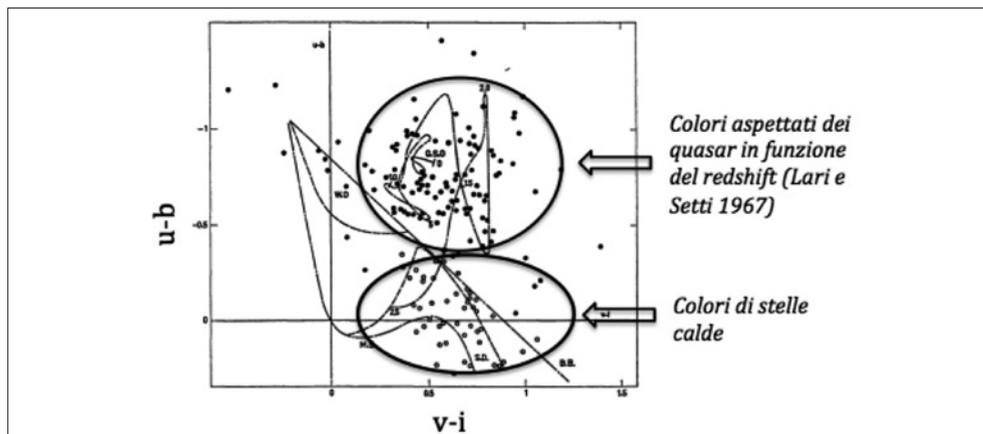


Figura 4. Diagramma colore-colore ($u-b$ verso $v-i$) dei candidati quasar di Braccesi. In questo diagramma i candidati quasar occupano una regione diversa da quella occupata dalle nane bianche (wd) a causa dell'eccesso infrarosso (da Braccesi e Formigini 1969).

candidati quasar selezionati sull'intero campo di 36 gradi quadrati coperti dalle lastre (Fig. 4) e l'altro con un risultato fondamentale sulla relazione numero - magnitudine per i quasar basato sui suoi candidati. Alessandro trovò che la pendenza dei conteggi dei quasar in funzione della magnitudine fino a $m_B < 19.4$ è molto ripida e concluse che *"A steep value of the $\log N - \log S$ relation is interpreted as showing the existence of a cosmological evolution for the objects (i.e. either they were more frequent, or with larger absolute magnitudes, in the past)"*. Questa fu la prima evidenza di evoluzione cosmologica dei quasar radio-quieti, che Alessandro confrontò con quella ricavata l'anno precedente da Maarten Schmidt per un campione di quasar selezionati sulla base della loro forte emissione radio (campione 3C), concludendo che le due evoluzioni erano in ottimo accordo fra di loro.

Negli anni successivi Alessandro e i suoi collaboratori continuarono la loro analisi approfondita delle lastre del Palomar e nel 1980 pubblicarono un'altra importante coppia di articoli. Nel primo (**Formigini, Zitelli, Bònoli e Braccesi** 1980) veniva presentato un campione di circa 300 candidati quasar selezionati nella regione centrale delle lastre (1.72 gradi quadrati) fino a una magnitudine di $m_B \sim 20$; nel secondo (**Braccesi, Zitelli, Bònoli e Formigini** 1980) questo campione, con una densità di $\sim (25-30)$ quasar/gradi quadrati, veniva confrontato con altri campioni a magnitudine più brillante, confermando una relazione $\log N - m$ molto ripida, consistente con una forte evoluzione in densità della funzione di luminosità dei quasar.

Questi due campioni di quasar radio-quieti di Braccesi (uno completo a $m_B \sim 19.4$ su 36 gradi quadrati, e uno completo a $m_B \sim 20$ su 1.72 gradi quadrati) furono per parecchi anni i campioni di quasar selezionati in ottico meglio studiati a queste magnitudini.

3. La radiazione di fondo X e i quasar: dai primi anni Sessanta alla fine degli anni Ottanta

All'inizio degli anni Sessanta ci fu anche un'altra scoperta che poi si sarebbe strettamente intrecciata con quella dei quasar: la scoperta della radiazione di fondo X o, in inglese, *X-Ray Background* (XRB) (Giacconi *et al.* 1962), avvenuta nel 1962 attraverso osservazioni, effettuate con un razzo, che avevano lo scopo di rivelare l'emissione X dalla Luna. Invece quelle osservazioni (Fig. 5) rivelarono sia la prima sorgente di raggi X esterna al sistema solare (Sco X1⁵) sia una radiazione diffusa osservata da tutte le direzioni del cielo.

Negli anni successivi nuove osservazioni da palloni, razzi e, successivamente, da satelliti caratterizzarono sempre meglio le proprietà dell'XRB (intensità, forma spettrale, isotropia) e quasi subito nacque una disputa sull'origine di questa radiazione. Parecchi astronomi sostenevano che questa radiazione fosse veramente diffusa e fosse dovuta all'emissione di gas caldo che si supponeva permeasse l'Universo; questa ipotesi trovava supporto nel fatto che la forma spettrale dell'XRB fosse ben rappresentata con un modello di emissione termica con una temperatura di circa 40 keV. Ad esempio, un gruppo di astronomi del Goddard Space Flight Center (Marshall *et al.* 1980) scriveva che "*Although the XRB could be comprised of a class of strongly evolving sources such as QSOs [...] the measured spectrum strongly suggests emission from a diffuse, hot gas*". Altri pensavano che l'XRB fosse invece dovuto alla combinazione dell'emissione da singoli oggetti "puntiformi" non rivelati singolarmente e in numero sufficientemente alto da dare l'impressione di una radiazione diffusa.

Gli astronomi bolognesi hanno contribuito in modo significativo a questo dibattito. Già nel 1973, quando solo un quasar (3C273) era stato rivelato nella banda X, **Setti** e Woltjer (1973) suggerirono che i quasar potevano produrre una gran parte della radiazione di fondo X osservata. Nel loro articolo si legge "*to date only 3C 273 has been observed in the 2–10 keV interval. Adopting a constant ratio of optical to X-ray luminosity for all quasistellar objects, including the radio-quiet ones, the predicted background due to QSOs down to $m_B = 19.4$ would be 13%. Extrapolating to fainter magnitudes, QSOs may well suffice to account for most of the observed background*". Ovviamente, gli autori riconoscevano che non è facile raggiungere conclusioni sicure sulla base delle proprietà di un singolo oggetto e quindi concludevano "[...] *but a definite conclusion has to await data on a larger sample of QSO*".

Alcuni anni dopo, quando la statistica sui quasar rivelati in banda X era aumentata di un fattore 4 (4 quasar invece di uno...), **Setti** e Woltjer (1979) fecero un passo in più e, dando ormai per dimostrato che i quasar contribuiscano una frazione significativa dell'XRB, usarono questi dati per invertire l'argomento: "*Quasars probably account for*

⁵ Sco X1, la più brillante sorgente X in tutto il cielo dopo il Sole, è un sistema binario, cioè composto da due stelle, la cui emissione X è prodotta da materia calda che accresce su una delle due stelle, una stella di neutroni.

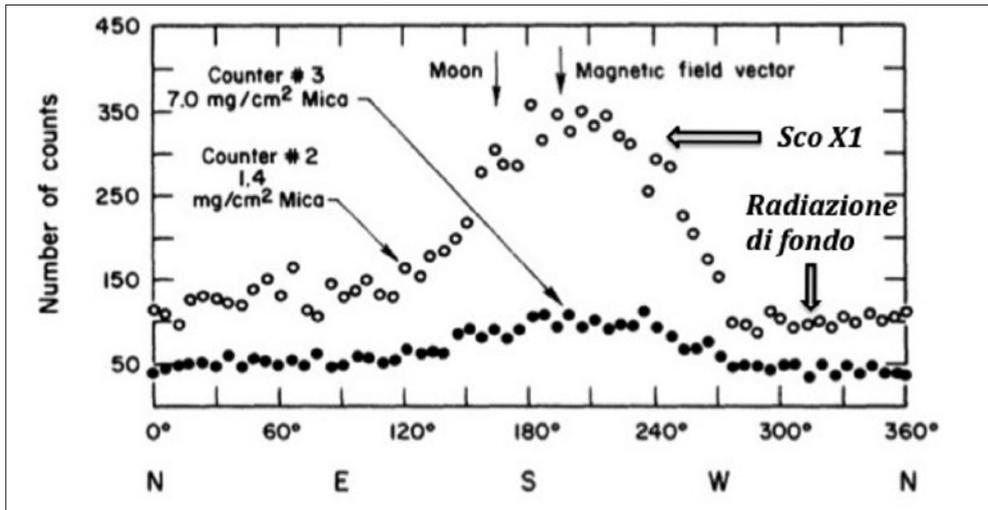


Figura 5. Emissione X in funzione della posizione nel cielo misurata con uno strumento a bordo di un razzo nel 1962. Le frecce indicano l'emissione da Sco X1 e quella della radiazione diffusa, ben al di sopra del livello di zero dei conteggi (da Giacconi *et al.* 1962).

more than half of the total XRB flux. Data on the X-ray emission from quasars and on the XRB provide strong limitations on the number counts of quasars. In particular, we find that the $\log N - \log S$ relation should level off significantly at $B = 20$ ". Per la prima volta le poche informazioni che si avevano sulle proprietà dell'emissione X dei quasar venivano usate non solo per stimare il loro contributo all'XRB, ma anche per prevedere l'andamento dei conteggi di quasar che si sarebbe dovuto osservare con survey ottiche a magnitudini più deboli di quelle studiate fino allora!

Le informazioni sulle proprietà dell'emissione X dei quasar cambiarono significativamente alla fine degli anni Settanta con il lancio del satellite "Einstein" il primo telescopio per raggi X con capacità di *imaging*, e quindi ottima risoluzione spaziale, e una sensibilità due ordini di grandezza migliore dei telescopi precedenti. In poco tempo il numero di quasar rivelati in banda X salì ad alcune centinaia e i dati di "Einstein" rivoluzionarono le nostre conoscenze delle proprietà in banda X dei quasar.

Gli astronomi bolognesi ebbero una parte di primo piano anche in questi studi. Ad esempio, in **Zamorani, ... Maccacaro, ... et al.** (1981), a valle delle osservazioni con "Einstein" di un centinaio di quasar, sia *radio-loud* che *radio-quiet*, si concludeva che:

- l'emissione X è una proprietà generale dei quasar (79 detezioni/107 osservazioni);
- esiste una correlazione fra la luminosità radio e quella X, nel senso che "*For a given optical luminosity, the average X-ray emission of radio-loud quasars is ~ 3 times higher than that of radio-quiet quasars*" (Fig. 6);
- la luminosità X aumenta meno che linearmente con la luminosità ottica ($L_x \propto L_{\text{opt}}^{0.7}$) e quindi il rapporto fra L_x (corona) e L_{opt} (disco) decresce all'aumentare della luminosità ottica;

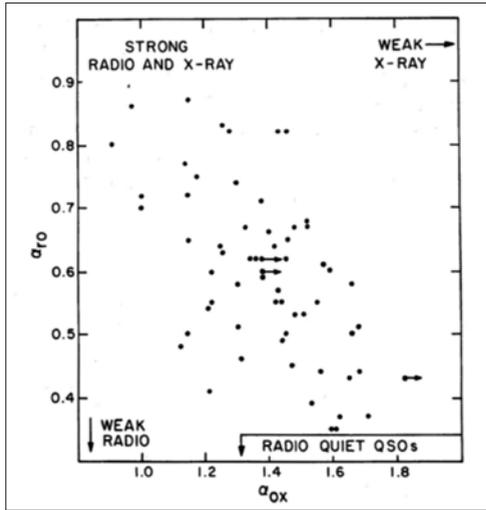


Figura 6. Relazione fra le luminosità radio, ottiche e X dei primi quasar osservati con “Einstein” (da Zamorani et al. 1981).

- d) l’emissione X dei quasar, come supposto in precedenza, costituisce in effetti una componente dominante dell’XRB (“[...] ~ 30% of the observed X-ray background is contributed by quasars brighter than $m_B < 20$, while much of the remainder can be contributed by still fainter quasars”);
- e) per evitare di eccedere la radiazione di fondo osservata, è necessario che, come già suggerito da **Setti** e Woltjer (1979) “the optical log N - m_B relation for quasars cannot be extrapolated much beyond $m_B \sim 20$ with the steep slope used to characterize optical source counts at brighter magnitudes”.

Quasi contemporaneamente, **Bònoli, Braccesi, Marano, Merighi e Zitelli** (1980), rianalizzando le immagini degli oggetti con eccesso ultravioletto del campione originale di Braccesi, trovarono che una frazione di essi appariva estesa in un’immagine profonda e con ottimo *seeing* presa al telescopio da 48 pollici del Palomar. Assumendo che questi oggetti non fossero quasar, trovarono nei loro dati un’indicazione di appiattimento della relazione conteggi – magnitudine già a $m_B \sim 20$, consistente con le conclusioni di **Setti** e Woltjer (1979) e **Zamorani et al.** (1981), e stimarono un contributo di ~ 60% da parte dei quasar all’XRB.

In aggiunta a fornire informazioni nella banda X per quasar già noti, le osservazioni con “Einstein” rivelarono in banda X anche centinaia di altre sorgenti che si trovavano nei campi puntati dal telescopio. L’identificazione ottica e la caratterizzazione di queste sorgenti (*Einstein Medium Sensitivity Survey*) fu un lavoro enorme, guidato anch’esso da astronomi bolognesi, Maccacaro e Gioia. In due articoli dei primi anni Ottanta (**Maccacaro, ... Gioia, ... Zamorani et al.** 1982 e **Maccacaro, Gioia e Stocke** 1984) si presentarono risultati importanti per i quasar selezionati in banda X e il loro rapporto con la radiazione di fondo, trovando che:

- a) i nuclei galattici attivi sono la classe dominante di questa survey (“*The Einstein*

Observatory medium sensitivity sample of extragalactic sources is dominated by active galactic nuclei (AGNs – quasars or Seyfert galaxies), while samples selected at higher fluxes and higher energies are dominated by clusters of galaxies”);

- b) la pendenza della relazione $\log N - \log S$ per questi AGN selezionati in banda X è ripida, consistente con l’evoluzione osservata in ottico e radio;
- c) l’evoluzione cosmologica e la funzione di luminosità di un campione di ~ 60 AGN selezionati in X suggeriscono che questi oggetti contribuiscono ~ 80% della radiazione di fondo a 2 keV (*“The simultaneous determination of the cosmological evolution and of the X-ray luminosity function of AGNs is then used to estimate the contribution to the extragalactic diffuse X-ray background. Using the best fit values for the evolution of AGNs and for their volume density, it is found that they contribute ~80% of the 2 keV diffuse X-ray background”*).

La produzione della radiazione di fondo X era quindi questione risolta con i dati di “Einstein”? In realtà non era proprio così, dato che a metà degli anni Ottanta c’erano ancora parecchi sostenitori dell’importanza del contributo termico da gas diffuso per la produzione dell’XRB. Per controbattere questa posizione, Giacconi e **Zamorani** (1987) mostrarono che, sottraendo all’XRB il contributo delle sorgenti già note, l’XRB residuo non è più ben rappresentato da un puro spettro termico (Fig. 7) e, con una dimostrazione “per assurdo” conclusero che:

If the “residual” is due to diffuse thermal gas emission, some Comptonization is required to flatten the emitted spectrum. This requirement implies a very stringent upper limit (of the order of 1 pc or less) to the size of these thermally emitting regions which

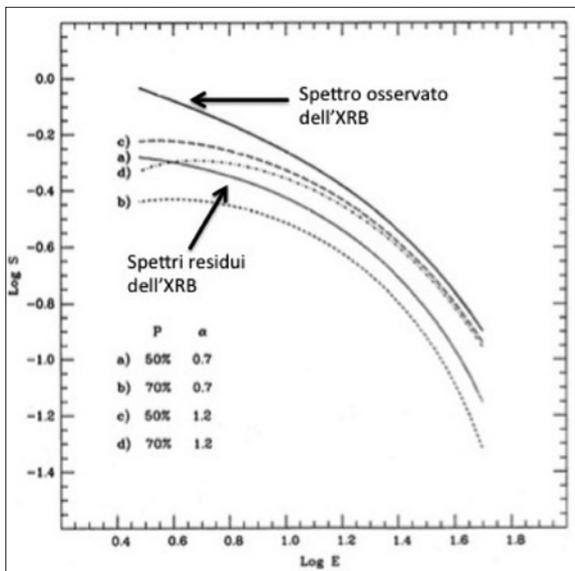


Figura 7. Intensità osservata dell’XRB in funzione dell’energia e di quattro possibili spettri dell’XRB residuo dopo la sottrazione degli spettri di sorgenti già note (da Giacconi e Zamorani 1987).

are therefore reduced to compact sources. Thus the working hypothesis that a significant fraction of the residual X-ray background is due to truly diffuse processes is shown to be inconsistent with our assumption.

L'unica soluzione possibile è quindi che anche l'XRB "residuo" sia prodotto da sorgenti puntiformi.

Restava però ancora un problema: lo spettro medio osservato degli AGN nella banda di energia 2-10 keV è diverso, più ripido di quello dell'XRB. Ancora una volta la soluzione a questo problema fu proposta da **Setti** e Woltjer (1989), i quali suggerirono che combinando spettri di AGN con diverso assorbimento a bassa energia è possibile ottenere uno spettro risultante con una pendenza più piatta di quella intrinseca dei quasar e consistente con quella dell'XRB (*"Recent unified theories of AGN predict the existence of numerous AGN with low energy cutoff in the 10 KeV range. The resulting spectrum of the XRB produced by all AGN may easily reproduce the observed spectrum. This removes the main obstacle against theories in which most of the XRB is due to AGN"*).

Più o meno negli stessi anni ci fu, ancora una volta a Bologna, un significativo progresso anche nel campo dei conteggi ottici di quasar a magnitudini deboli.

All'inizio degli anni Ottanta era stato montato al telescopio di 3.6 m dell'ESO il "triplet adapter", che produceva immagini "corrette" su un campo di quasi 1 grado quadrato al fuoco primario del telescopio. Marano decise di usare questa opportunità per selezionare candidati quasar in un campo, che divenne poi noto come *Marano field*, usando contemporaneamente tre diversi criteri di selezione: diagrammi colore-colore, spettri con *grism* e variabilità. Un esempio di ciascuna di queste selezioni è mostrato in Fig. 8.

L'uso combinato di diversi criteri di selezione produsse una lista di candidati quasar altamente completa fino a $m_B \sim 22.0$, due magnitudini più deboli del limite del

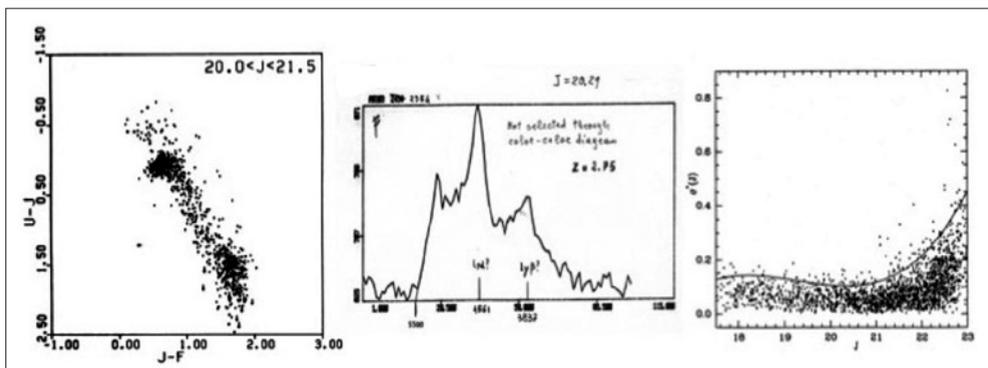


Figura 8. Un diagramma colore-colore (a sinistra), uno spettro preso con il *grism* (al centro; con una nota a mano, in cui si dice che questo oggetto non era stato selezionato dal diagramma colore-colore) e un diagramma che mostra un indice di variabilità in funzione della magnitudine (a destra; gli oggetti variabili (e quindi candidati quasar) sono quelli sopra la curva; da Cimatti, Zamorani e Marano 1993).

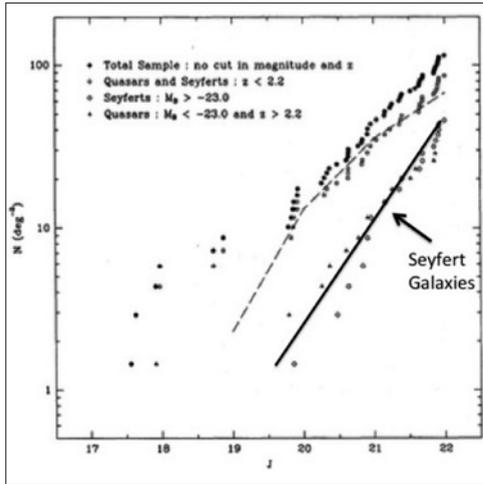


Figura 9. Conteggi in funzione della magnitudine per i quasar nel campo di Marano. La pendenza della retta che corrisponde ai conteggi di quasar deboli (galassie di Seyfert), mostra che anche questi oggetti hanno una forte evoluzione cosmologica.

campione di Braccesi, e questi candidati vennero poi osservati spettroscopicamente per confermare la loro natura di quasar e misurarne la distanza (*redshift*). I risultati di questo lavoro (Marano, Zitelli e Zamorani 1988; Zitelli, Mignoli, Zamorani, Marano e Boyle 1992) dimostrarono che effettivamente a magnitudini deboli ($m > 20$) i conteggi si appiattiscono, come richiesto dai vincoli dell'XRB (“[...] these data confirm the relatively flat slope at faint magnitudes of the total counts of all the quasars, with no cut in absolute magnitude”), e, per la prima volta, si videro chiare evidenze di evoluzione cosmologica anche per i nuclei galattici attivi di bassa luminosità (*Seyfert galaxies*; Fig. 9), che fino allora non si erano potuti studiare a grandi distanze, suggerendo una continuità nelle proprietà evolutive dei quasar classici più luminosi e di questi nuclei galattici attivi meno luminosi (“The slope of the $\log N - m$ relation for low-luminosity objects ($M_B > -23.0$) is steeper than the Euclidean value, thus suggesting also for them a substantial cosmological evolution”).

Come i campioni di Braccesi, anche questo campione di quasar deboli è rimasto per anni uno dei principali campioni di riferimento di nuclei galattici attivi selezionati in ottico.

4. La radiazione di fondo X e i quasar: venti anni dopo

Dopo i risultati di parecchie e sempre più potenti missioni X che si sono succedute nel corso degli anni, come, ad esempio, Rosat, XMM e Chandra, oggi le nostre conoscenze sul contributo dei quasar all'XRB sono molto più precise e dettagliate e ancora una volta astronomi bolognesi sono stati all'avanguardia in questo campo e, sviluppando l'idea iniziale suggerita da Setti e Woltjer (1979), hanno prodotto un modello “definitivo” per la produzione dell'XRB in un ampio intervallo di energia combinando l'emissione di vari tipi di AGN.

Gilli, Comastri e Hasinger (2007) trovarono che:

The integrated emission of the Compton-thin AGN population is found to underestimate the XRB flux at about 30 keV, calling for an additional population of extremely obscured (Compton-thick) AGN... Therefore a population of heavily obscured – Compton-thick – AGN, as large as that of moderately obscured AGN, is required to fit the residual background emission.

Come mostrato in Fig. 10, il modello proposto in quell'articolo dimostra in modo convincente che si può riprodurre in modo quasi perfetto la forma e l'intensità dell'XRB combinando varie popolazioni di quasar, con diversi livelli di assorbimento, e usando per ciascuna di esse la corrispondente forma spettrale.

Nello stesso anno (2007) venne pubblicato anche un importante contributo di astronomi bolognesi allo studio dell'evoluzione cosmologica dei quasar selezionati in ottico. Dalla prima *survey* spettroscopica (VVDS) effettuata al *Very Large Telescope* (8 metri di diametro) dell'ESO con lo spettrografo VIMOS, che permetteva di ottenere spettroscopia simultanea nella banda ottica di centinaia di oggetti, si ottenne un campione completo di quasar spettroscopici fino a magnitudine molto debole ($m < 24$), senza nessuna selezione morfologica o spettroscopica. In questo modo furono rivelati come quasar anche oggetti che sarebbero sfuggiti alla selezione di candidati quasar usando i criteri di selezione tradizionali, come ad esempio la selezione in colore.

Con questi dati, che raggiungevano una magnitudine più debole di qualunque altra *survey* spettroscopica precedente, **Bongiorno, Zamorani, Gavignaud, Marano et al.** (2007) poterono misurare (pannello di sinistra in Fig. 11) la parte debole della funzione di luminosità dei quasar fino a *redshift* ~ 4.0 , che fino ad allora non era nota, e, per la prima volta dall'analisi di campioni di quasar selezionati in ottico, trovarono che il picco della densità spaziale dei quasar si sposta significativamente verso *redshift* più bassi per oggetti con luminosità più bassa (pannello di destra in Fig. 11). Questa scoperta, che confermava un andamento simile che si era trovato per le funzioni di luminosità X per quasar selezionati in banda X, rappresentò un vincolo importante per i modelli di evo-

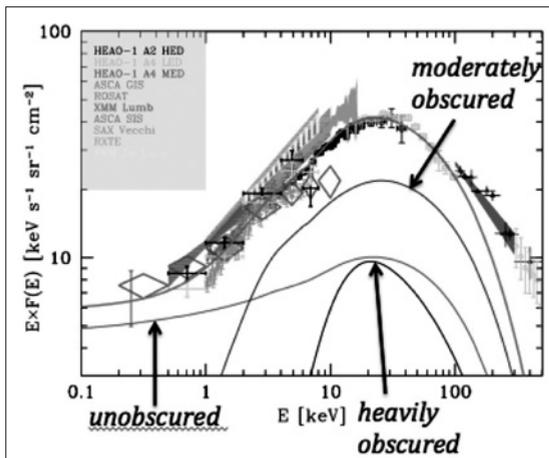


Figura 10. L'XRB misurato nell'intervallo di energia da meno di 1 keV a più di 100 keV e le predizioni del modello di Gilli, Comastri e Hasinger (2007) per il contributo a tale radiazione da parte di diverse classi di quasar (non oscurati, moderatamente oscurati e fortemente oscurati) (da Gilli et al. 2007).

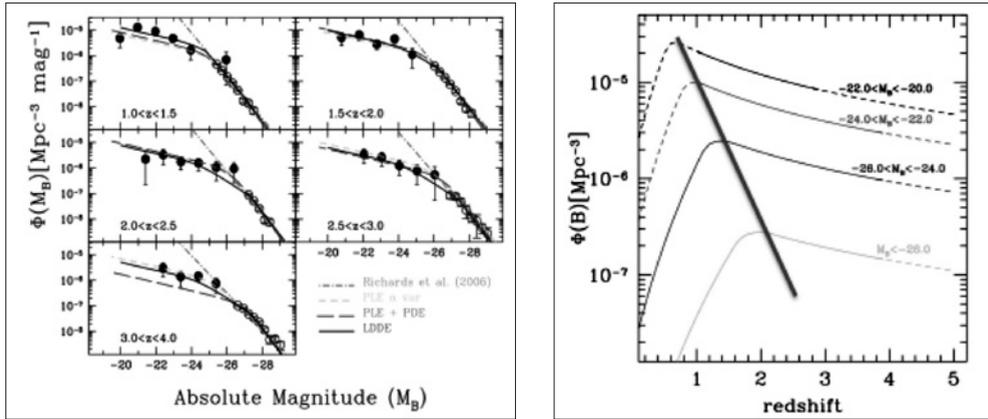


Figura 11. Funzione di luminosità in vari intervalli di *redshift* dei quasar deboli osservati nella survey VVDS (a sinistra); evoluzione con il *redshift* delle funzioni di luminosità per quasar con diversa magnitudine assoluta (a destra) (da Bongiorno *et al.* 2007).

luzione cosmologica dei quasar (gli oggetti più brillanti evolvono più rapidamente, in tempo cosmico, di quelli più deboli).

Questi risultati più recenti mostrano una continuità nel corso dei decenni dell'eccellenza della "scuola bolognese" nei campi dello studio dei quasar selezionati in banda ottica (e non solo) e dell'XRB e questa continuità lascia ben sperare per futuri contributi importanti in questi campi da parte dei nostri giovani.

Bibliografia

- Bongiorno A. *et al.*, 2007, *Astron. Astrophys.*, 472, 443.
 Bònoli F. *et al.*, 1980, *Astron. Astrophys.*, 90, L10.
 Braccesi A., Lynds R., Sandage A., 1968, *Astrophys. J. Lett.*, 152, 105.
 Braccesi A., Formiggin L., 1969, *Astron. Astrophys.*, 3, 164.
 Braccesi A., Formiggin L., Gandolfi E., 1970, *Astron. Astrophys.*, 5, 264.
 Braccesi A. *et al.*, 1980, *Astron. Astrophys.*, 85, 80.
 Braccesi A., 1997, *Mem. Soc. Astron. It.*, 68, 521.
 Cimatti, A., Zamorani G., Marano B., 1993, *Mon. Notes R. Astron. Soc.*, 263, 236.
 Formiggin L., Zitelli V., Bònoli F., Braccesi A., 1980, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 39, 129.
 Giacconi R. *et al.*, 1962, *Phys. Rev. Lett.*, 9, 439.
 Giacconi R., Zamorani G., 1987, *Astrophys. J.*, 313, 20.
 Gilli R., Comastri A., Hasinger G., 2007, *Astron. Astrophys.*, 463, 79.
 Lari C., Setti G., 1967, *Il Nuovo Cimento B*, 52, 507.
 Maccararo T. *et al.*, 1982, *Astrophys. J.*, 253, 504.
 Maccararo T., Gioia I.M., Stocke J. T., 1984, *Astrophys. J.*, 283, 486.
 Marano B., Zitelli V., Zamorani G., 1988, *Mon. Notes R. Astron. Soc.*, 232, 111.
 Marshall F.E. *et al.*, 1980, *Astrophys. J.*, 235, 4.

- Matthews T.A., Sandage A.R., 1963, *Astrophys. J.*, 138, 30.
Sandage A.R., 1965, *Astrophys. J.*, 141, 1560.
Schmidt M., 1963, *Nature*, 197, 1040.
Schmidt M., 1983, in *Serendipitous Discoveries in Radio Astronomy*, Proceedings of a Workshop held at the National Radio Astronomy Observatory, Green Bank, West Virginia on May 4, 5, 6 1983, edited by K. Kellermann, B. Sheets, (NRAO, Green Bank, WV, 1984) pp. 171-174.
Setti G., Woltjer L., 1973, in *IAU Symp. 55, X- and Gamma-Ray Astronomy*, edited by H. Bradt, R. Giacconi (Reidel, Dordrecht) p. 208.
Setti G., Woltjer L., 1979, *Astron. Astrophys.*, 76, L1.
Setti G., Woltjer L., 1989, *Astron. Astrophys.*, 224, L21.
Zamorani G. *et al.*, 1981, *Astrophys. J.*, 245, 357.
Zitelli V. *et al.*, 1992, *Mon. Notes R. Astron. Soc.*, 256, 349.
Zwicky F., Zwicky M.A., 1971, *Catalogue of Selected Compact Galaxies and of Post-eruptive Galaxies* (Zwicky, Guemligen (BE), Switzerland).

L'Astrofisica Stellare nella Torre dell'Osservatorio dal 1950 al 1990

*Flavio Fusi Pecci**

Ci sono tanti modi diversi di descrivere in poche pagine la storia di una avventura che si snoda in oltre 40 anni. Man mano che si pensa a come farlo, ci si rende conto che invece occorrerebbero centinaia di pagine, perché si tratta di ripercorre idee, eventi, innovazioni, scelte, errori e successi, storie di persone, di amici e colleghi che a volte non sono più fra noi.

Ho scelto allora di trattare molto schematicamente quattro punti che mi sembra possano tracciare il cammino di un ampio gruppo di ricercatori che, senza cadere nella vanagloria, ha creato nel tempo una “Scuola di Astrofisica Stellare classica bolognese” apprezzata a livello nazionale e internazionale.

In sintesi, gli aspetti fondamentali che hanno consentito questo sono stati:

- sviluppi strumentali (nuovi telescopi, terra-spazio, rivelatori, ecc.);
- apertura e accesso a grandi strumenti e istituzioni internazionali;
- innovazione nei processi di trattamento e analisi dati;
- interazione forte e continua teoria-osservazioni.

Vediamo quindi di descriverli in ordine temporale, avendo come linea guida gli sviluppi strumentali succedutisi negli anni e l'evoluzione del quadro teorico di riferimento che potrà essere colto più approfonditamente nell'intervento parallelo di Alvio Renzini in questo stesso contesto.

Tantissime persone, inclusi i tanti studenti – con le attività legate alle tesi – e coloro che hanno tenuto seminari, visite e incontri, hanno contribuito a forgiare questo gruppo.

Come sempre, le citazioni di cose e persone sono gravemente incomplete e mi scuso da subito con chiunque non si senta adeguatamente (o addirittura per nulla) menzionato o per la omissione di interi temi, ricerche, risultati, ecc.

* INAF-OAS, Osservatorio di Astrofisica e Scienza dello Spazio, Bologna, e SAI

1. Anni 1940-1960. Stazione osservativa Loiano: Telescopio ZEISS 60 cm

Ricercatori: Guido Horn D'Arturo, Leonida Rosino (Piero Tempesti, Paolo Maffei, ... tecnici Aldo Galazzi, Armandino Gherardi).

Tecniche e ricerche base:

- fotometria fotografica su lastre, analisi fotometrica a occhio e con *blink* comparatore;
- fotometria di ammassi stellari, stelle variabili (in particolare Catalogo RR Lyrae - Rosino).

2. Anni 1960-1975. Stazione osservativa Loiano: Telescopio ZEISS 60 cm

Ricercatori: Corrado Bartolini, Pierluigi Battistini, Angelo Bonifazi, Adriano Guarnieri, Adalberto Piccioni.

Tecniche e ricerche base:

- fotometria fotoelettrica monocanale e multicanale (ad es. 6 fotometri fotoelettrici, Piccioni);
- fotometria ed evoluzione di: stelle variabili, stelle binarie, binarie emittenti raggi X, A0535+26 identificato a Loiano-Bologna con HDE 245770, subnane calde e stelle magnetiche, stelle novae, oggetti stellari peculiari.

3. Anni 1974-1976. Stazione osservativa Loiano: costruzione e inaugurazione del Telescopio G.D. Cassini, 152 cm

Personale coinvolto a vario titolo e a vari livelli: Alessandro Braccesi, Pierluigi Battistini, Francesco Saverio Delli Santi, Giuseppe Mannino.

Altri: Bonoli, Marano, Fusi Pecci, Bartolini, Guarnieri, Piccioni, Bonifazi, Cacciari, Zitelli, Bendinelli, Dall'Olmo, Delpino, Zavatti, Parmeggiani, Federici, ecc., e i tecnici: Volta, Tinti, Innocenti, Sbarbati, Cavallo, Oculi, Ciattaglia, Muzi, Mezzini, Salomoni ecc., e gli assistenti notturni: Gualandi, Bruni, Cretella, Bernabei, Tessicini, Delogu, Inarta, Serra, ecc.

Grazie al contributo assolutamente innovativo e geniale di chi lo ha progettato e costruito, questo telescopio è stato per alcuni anni assolutamente all'avanguardia nel settore dell'ottica astronomica e, se si fosse trovato in un sito di altissima qualità (cioè con valori di *seeing* eccezionali, anche 10 volte migliori come ad esempio a Mauna Kea – Hawaii), avrebbe consentito di ottenere osservazioni e risultati formidabili per quei tempi. Si tratta infatti di un telescopio che, seppure di modeste dimensioni, unisce *grande campo perfettamente corretto e grande risoluzione spaziale*, cosa allora non facilmente disponibile nel mondo.

Caratteristiche del Telescopio G.D. Cassini:

- lastra fotografica 25 × 25 cm;

- campo corretto: 72 arcmin! Ritchey – Chretien;
- scala: 17arcsec/mm, con pixel-CCD da 15 micron: 0.51 arcsec/px;
- con 2 ore di posa e *seeing* < 1".5 a volte $\leq 1''$;
- magnitudine V limite > 21.5 – 22.

4. Anni 1975-1980. Stazione osservativa Loiano: Telescopio G.D. Cassini, 152 cm

Tecniche, ricerche, persone:

- osservazioni su lastra fotografica a grande campo e alta risoluzione spaziale;
- spettroscopia e fotometria fotografica su lastre scansionate con il PDS;
- fotometria fotografica di Ammassi Globulari;
 - galassia: Carla Cacciari, Flavio Fusi Pecci;
 - M31 Galassia di Andromeda: Pierluigi Battistini, Fabrizio Bonoli, Alessandro Braccesi, Carla Cacciari, Federico Delpino, Luciana Federici, Flavio Fusi Pecci, Bruno Marano, Gianluigi Parmeggiani, ecc.;
- fotometria fotoelettrica multicanale, spettroscopia, ecc.: Corrado Bartolini, Angelo Bonifazi, Adriano Guarnieri, Adalberto Piccioni.

4.1 Fotometria, identificazione, spettroscopia controparti X, gamma, Stelle binarie e variabili

Agli inizi degli anni Sessanta e, in particolare nel 1964-65, Pierluigi Battistini e Corrado Bartolini hanno condotto ricerche e fotometria fotografica sulle lastre, anche di archivio, su due ammassi globulari per la ricerca di RR Lyrae.

In seguito, grazie al fondamentale contributo allo sviluppo tecnologico legato alla fotometria fotoelettrica dato dall'ingresso nel gruppo di Adalberto Piccioni, si è aperta una nuova attività di ricerca, iniziata sul finire degli anni Sessanta, che culminerà negli anni successivi nella osservazione della prima controparte ottica di un lampo gamma GRB 980228 e nella collaborazione con lo Special Astrophysical Observatory (Russia) e, successivamente, nella costruzione del fotometro TORTORA (Piccioni, Bartolini, Greco, Guarnieri *et al.*), con cui è stata condotta quella che ancora oggi rimane al mondo l'unica osservazione ottica ad alta risoluzione temporale, simultanea all'evento esplosivo gamma denominato GRB 080319b [1].

Negli anni 1970-80, soprattutto con il Telescopio Zeiss da 60 cm, sono state condotte da Corrado Bartolini, Angelo Bonifazi, Adriano Guarnieri e Adalberto Piccioni vaste campagne osservative (oltre 100 notti per anno). In particolare, con i 6 fotometri fotoelettrici costruiti da Adalberto Piccioni sono state studiate numerose stelle binarie a eclisse, binarie emittenti raggi X (in particolare la sorgente A0535+26, identificata a Loiano con la stella HDE 245770), subnane calde e stelle magnetiche.

In parallelo, dal 1976, con il Telescopio Cassini da 152 cm, sono state condotte ricerche spettroscopiche e fotometriche (con il fotometro a 2 teste appositamente costruito da Adalberto Piccioni) dei medesimi oggetti. Adriano Guarnieri è riuscito a fotografare la prima controparte ottica di un lampo gamma GRB 980228, successo consentito dalla partecipazione importante e assidua alla grande collaborazione internazionale creatasi a livello mondiale dopo la scoperta di queste nuove poderose sorgenti che hanno aperto un nuovo scenario nella ricerca astrofisica.

4.2 Fotometria con tecnica delle “scansioni e deconvoluzione mono e bi-dimensionale”

Un grande problema nell'analisi di qualsiasi immagine di sorgenti celesti è costituito dalla deconvoluzione, ossia dalla ricostruzione dell'informazione contenuta nell'immagine che si ottiene sul rivelatore, a valle del sistema atmosfera-telescopio, ma nascosta dagli effetti di deteriorazione.

Il gruppo di ricerca formato da Orazio Bendinelli, Gianluigi Parmeggiani e Franco Zavatti ha lavorato per anni, con grande capacità e abnegazione, su questo tema, oggettivamente molto complesso, con notevoli risultati.

In sintesi, ha studiato la formazione e acquisizione di immagini astronomiche degradate dagli effetti strumentali e dalla turbolenza atmosferica; ha determinato la funzione di risposta strumentale totale (*Point Spread Function*, PSF, vedi seguito) relativa a immagini astronomiche acquisite da terra e dallo spazio; ha usato tecniche di ricostruzione delle immagini viste come *problema inverso* e con la loro stabilizzazione, usando la regolarizzazione di Tichonov per sistemi lineari mal condizionati. Questo ha permesso l'estrazione di caratteristiche fisiche rilevanti dalle immagini. Notevole è stato anche il contributo dato all'analisi delle prime immagini del *Hubble Space Telescope* (HST), con particolare riguardo allo studio della PSF del telescopio nella sua prima versione (quella con i noti difetti ottici). Una prima relazione relativa al *fitting* della PSF è stata presentata nel 1988, all'Assemblea Generale dell'Unione Astronomica Internazionale (IAU) svoltasi nella sede dello *Space Telescope Science Institute* (Baltimora).

Nel corso degli anni, il gruppo ha sviluppato pacchetti software relativi alla deconvoluzione delle immagini astronomiche basati su di un algoritmo di regolarizzazione multi-gaussiano, con risultati paragonabili a quelli ottenuti da algoritmi consolidati come quello di Richardson-Lucy e della *Maximum Entropy Method* (MEM), anche se con una maggiore facilità di utilizzo. Con questa tecnica sono quindi state studiate sorgenti stellari, ammassi stellari (galattici e nella Galassia di Andromeda), nuclei di galassie (M32, M31, NGC 3379, ecc.) e quasars. In particolare, le deconvoluzioni applicate alle immagini HST di vari ammassi globulari in M31 hanno consentito di dimostrare per la prima volta l'esistenza di ammassi cosiddetti *post-core collapse* anche in M31 [2].

5. Anni 1980-1985. Accesso verso “i nuovi grandi telescopi mondiali”

Agli inizi degli anni Ottanta, grazie alla grande crescita dell'intera comunità astronomica nazionale e al lavoro scientifico-politico, in particolare di Franco Pacini e Giancarlo Setti, ma non solo, l'Italia ha avuto accesso ai nuovi grandi telescopi della *European Southern Observatory* (ESO) e anche a quelli di altre nazioni e comunità scientifiche internazionali. Ovviamente il discorso sarebbe lungo e complesso e notizie ben più ampie al riguardo possono essere trovate nell'intervento di Giancarlo Setti in questo convegno.

In quegli stessi anni, come dettagliato in seguito, si è anche aperto per il gruppo *l'accesso allo spazio* con il lancio nel 1978 del satellite ESA IUE. L'opportunità di osservare nell'ultravioletto (UV), invisibile da terra, ci ha fatto capire infatti, semmai ce ne fosse stato bisogno, che l'accesso a ogni *nuova finestra* apriva un *nuovo e più ampio panorama*, che non potevamo non cercare di esplorare.

Mi limito qui a elencare schematicamente l'impatto formidabile che questa *apertura al mondo* ha avuto sulle attività mie e delle persone con cui ho avuto l'onore e il piacere di collaborare in questi anni.

5.1 Accesso a ESO (NTT, 3.6 m, 2.2 m, ecc. Chile) + KPNO (USA), SAO (URSS), CFHT (Hawaii)

Tecniche e metodologie di osservazione, analisi dati, interpretazione innovative:

- fotometria e astrometria di stelle in campi densi (ammassi globulari, in particolare) con rivelatori CCD, digitali e con risposta lineare;
- fotometria bidimensionale con nuovissima tecnica legata alla determinazione sperimentale direttamente sulla matrice osservata della *Point Spread Function*;
- osservazioni multi-banda estese dall' Ultravioletto (UV) fino all'Infrarosso (IR-HJK);
- confronto e test dei modelli evolutivi stellari e galattici verso la *cosmologia stellare*;
- evoluzione chimica, confronto delle osservazioni fotometriche e spettroscopiche con i modelli teorici per stelle singole, galassie, sintesi di popolazioni stellari singole e multiple.

La Point Spread Function e il Package Romafot: un breve “amarcord”

È cosa nota da decenni che le onde elettromagnetiche emesse da una sorgente astronomica, che tramite il telescopio arrivano su un rivelatore sotto forma di fotoni, si distribuiscono sul rivelatore stesso in una figura usualmente chiamata *Point Spread Function* (PSF). Tale figura contiene intrinsecamente in sé, e riporta quantitativamente punto per punto, tutte le proprietà e le caratteristiche dell'intero sistema ottico usato nell'osservazione, oltre quelle dell'atmosfera nel suo complesso (se effettuata da terra) che tendono a mascherarle, specialmente in modeste condizioni di *seeing*.

Questo aspetto, con le sue reali enormi potenzialità informative, non è mai stato utilizzato nelle misure fotometriche classiche fino agli anni Settanta, perché fatte a occhio

o con il fotometro a iride, che misuravano l'immagine stellare nella sua integrità. Come conseguenza, specialmente nei campi stellari densi (come negli ammassi globulari) il problema dell'affollamento e sovrapposizione delle singole immagini (detto *blending*) limitava pesantemente sia la qualità delle misure fotometriche e astrometriche, sia la completezza del campione delle stelle misurabili rispetto a quello reale. Inoltre, avendo le stelle magnitudine molto diversa, oggetti poco brillanti si mescolavano o addirittura sparivano nelle ali degli oggetti più luminosi.

In questo contesto, però, emergeva una caratteristica fondamentale: *tutti gli oggetti osservati con lo stesso sistema ottico, nelle stesse osservazioni, hanno la stessa Point Spread Function*, a meno di aberrazioni sistematiche che, peraltro, possono essere mappate e studiate.

Nella mia tesi di laurea (1973) ho utilizzato delle lastre fotografiche, prese al Telescopio Schmidt del Palomar da Alessandro Braccesi per altri studi, per fare la fotometria bicolore delle stelle singole di due ammassi globulari galattici (M3 e NGC 5466). Come si può vedere in Fig.1, le immagini delle stelle sono costituite da una striscia sistematica di immagini collegate in sequenza, frutto del fatto che nel sistema ottico era stato inserito un *Prisma di Racine*. Molto schematicamente, questo produceva sub-immagini spettrali, scalate ai vari ordini, dello stesso oggetto. È importante allora notare che, come conseguenza, *tutte le stelle subivano questo trattamento e tutte nello stesso modo sistematico*. Di conseguenza, la PSF-multiplo di ogni oggetto è identica, seppure diversamente graduata in magnitudine in funzione della luminosità di ogni stella.

Questo fatto, mi portò a pensare che, se fossimo riusciti a mappare e descrivere la PSF in modo dettagliato e quantitativo, avremmo potuto sfruttare questa conoscenza per

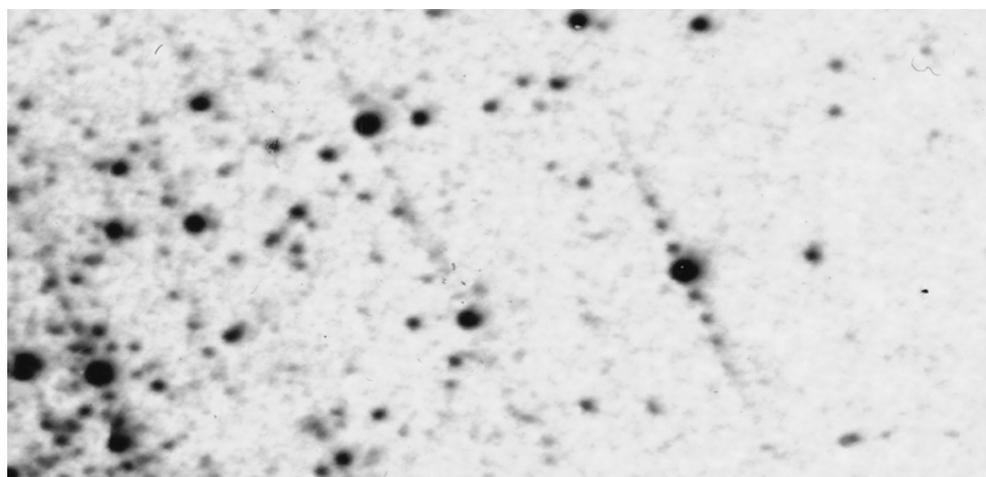


Figura 1. Immagine parziale ingrandita di una area dell'ammasso globulare NGC 5466 sulle lastre del Palomar, in cui si evidenzia l'impatto sull'immagine di ogni stella della presenza del *Prisma di Racine* nel cammino ottico, che produce sistematicamente in tutte delle sub-immagini multiple.

misurare e distinguere le varie componenti di un “aggregato di stelle” che formavano un *blending* multiplo.

Purtroppo io, allora, non avevo le capacità tecniche, matematiche e informatiche per costruire questo nuovo strumento fotometrico.

Poco dopo, però, grazie all'intervento di Vittorio Castellani, incuriosito da questi discorsi, ho avuto la fortuna e il piacere di incontrare Roberto Buonanno e Carlo Corsi, giovani colleghi coetanei all'Osservatorio di Roma Monte Mario, che invece non solo avevano queste capacità, ma, anzi, avevano già pensato per proprio conto che la strada da percorrere era quella di fare delle scansioni delle immagini sulle lastre e riprodurre con delle funzioni matematiche note, al meglio, la descrizione della PSF così ricavata. In fondo un sistema non molto diverso nella sostanza da quello su cui lavoravano con tecniche e metodi diversi il gruppo bolognese citato sopra.

Così nel giro di pochi mesi, nel 1977, posero le basi e crearono il primo *Package Romafot* (unico al mondo, allora) in grado di fare una fotometria multi-dimensionale e multi-oggetto, partendo dalle scansioni delle immagini sulle lastre. Poco tempo dopo (inizi anni Ottanta), nel momento in cui si è passati dalle lastre fotografiche ai rivelatori digitali (a *pixel*) con risposta lineare, e quindi alla disponibilità diretta dalle osservazioni delle “matrici fotometriche digitali” delle stelle, si è di fatto aperta una *nuova era per la fotometria*. Questo ha rappresentato una svolta nella nostra attività scientifica e nella nostra amicizia. Il *Package Romafot*, inventato e costruito a Roma da Roberto Buonanno, Carlo Corsi, Giacinto Iannicola, Guido Buscema, è stato rapidamente reinventato/duplicato e via via migliorato ovunque, e costituisce ancora oggi una delle tecniche base per la fotometria stellare.

Un progetto emblematico: il Catalogo degli Ammassi Globulari nella Galassia di Andromeda Pierluigi Battistini, Fabrizio Bonoli, Alessandro Braccesi, Carla Cacciari, Federico Delpino, Luciana Federici, Flavio Fusi Pecci, Bruno Marano, Maria Lucia Malagnini, Roberto Buonanno, Carlo Corsi, Gianluigi Parmeggiani... tantissimi altri in seguito.

Come detto, l'accesso a nuovi strumenti e a nuove tecniche, unito al progredire passo-passo di osservazioni e teoria, ha consentito a tutti noi “stellari a Bologna” di programmare e condurre tanti progetti di ricerca integrati e lunghi nel tempo che, fra l'altro, hanno portato ad attivare collaborazioni e scambi con una grande quantità di ricercatori in tutti il mondo, ai massimi livelli internazionali del nostro settore scientifico e non solo. Questo ultimo aspetto, oltre a essere decisivo per le opportunità e i risultati ottenuti, ha avuto anche un effetto formidabile nella formazione non solo nostra, ma anche di un grande numero di studenti che si sono poi rivelati negli anni, più aperti e più bravi di noi e che hanno portato e stanno portando ai risultati che onorano ancora oggi la scuola stellare bolognese.

Fra i tanti progetti partiti negli anni Settanta, e che durano ancora oggi, sono partico-

larmente legato a quello centrato sulla scoperta e studio approfondito degli Ammassi Globulari nella Galassia di Andromeda – M31. Questo perché è, secondo me, *un esempio virtuoso di sintesi di osservazioni Multi-telescopi, Multi-banda, Multi-tecniche, Multi-analisi, Multi-interpretazioni.*

In estrema sintesi:

- *Telescopi utilizzati:* G.D. Cassini, 152 cm, Loiano, TIRGO 1.5 m (Italia-Svizzera), Schmidt Tautenburg, (Germania) 2 m, Mt. Palomar Schmidt (USA), Kitt Peak NO (USA) 4 m, Soviet SAO (URSS) 6 m, UKIRT (Hawaii) 4 m, satellite UV - IUE (ESA) e, in seguito negli anni, Telescopio Nazionale Galileo – TNG (Canarie) 4 m, Large Binocular Telescope-LBT 2 m × 8 m (Arizona), Satellite X Einstein, Hubble Space Telescope (HST), Satellite UV - GALEX, ecc.
- *Tecniche utilizzate:* Ricerca, identificazione e selezione, astrometria di precisione, fotometria fotografica e CCD multicolore (FUV + UBVRIJHK), morfologia e parametri strutturali, spettroscopia per misure di abbondanze chimiche e velocità radiali,

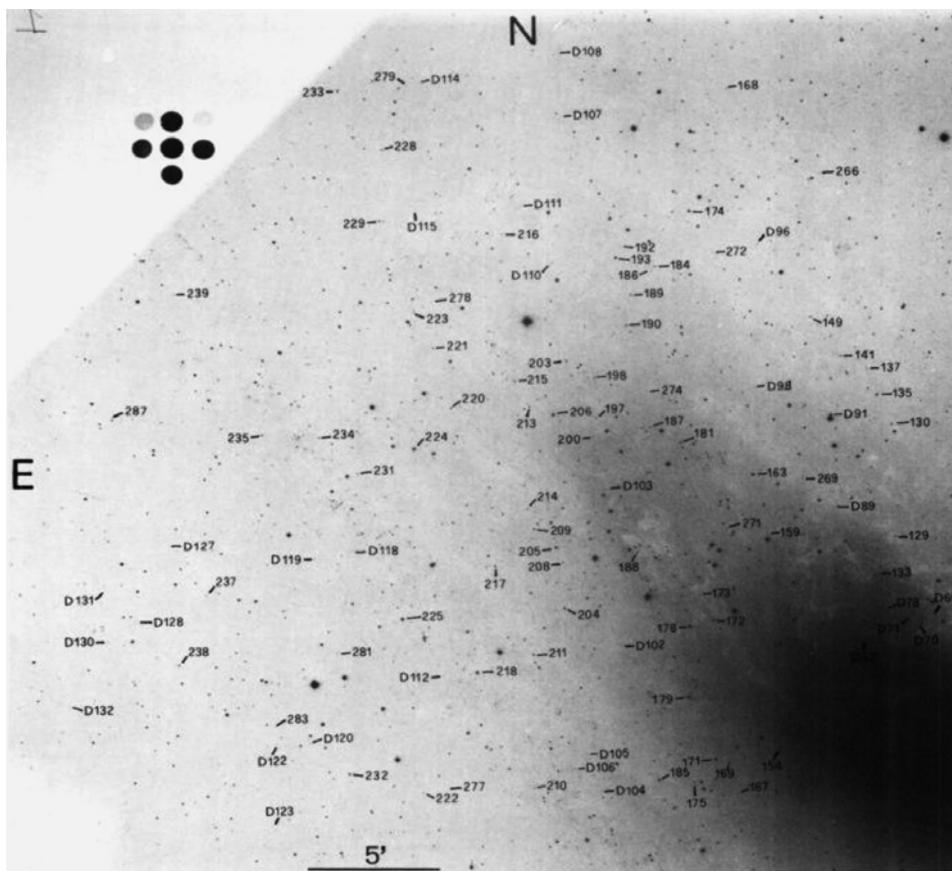


Figura 2. Esempio di campo osservato con la camera a grande campo del Telescopio Cassini da 152 cm di Loiano con indicazione dei candidati ammassi trovati [3].

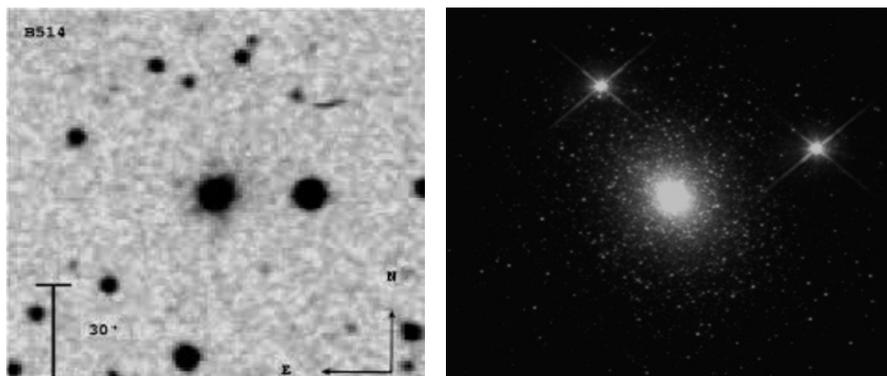


Figura 3. Sulla sinistra: esempio di un ammasso globulare in M31 (oggetto a sinistra in centro nella foto, circondato da una lieve nebulosità, che lo distingue dalla stella vicina della nostra Galassia di pari luminosità apparente sulle lastre di Loiano). A destra: un ammasso globulare in M31, osservato circa 20 anni dopo con lo *Hubble Space Telescope* (ne abbiamo osservati e studiati così decine, facendo la fotometria delle singole stelle).

stima della massa totale di M31, identificazioni di sorgenti X e controparti ottiche, osservazioni con a HST integrate e di stelle singole negli ammassi stessi, ecc.

Questo lavoro ponderoso e, per tanti aspetti entusiasmante, ha coinvolto in oltre 40 anni decine di persone, producendo oltre 150 articoli scientifici sulle riviste internazionali più quotate e un catalogo generale, tuttora di riferimento e utilizzato a livello mondiale, che può essere trovato nel sito: <http://www.bo.astro.it/M31/> dove si possono trovare citazioni e riferimenti complessivi. In ricordo di Pierluigi e Alessandro, che ci hanno lasciati, mi limito a citare il primo articolo della lunga serie: Battistini *et al.* [3] (Fig. 2).

Dato il numero di ricercatori che hanno dato il proprio contributo, non è possibile citarli tutti, ma mi fa molto piacere ricordare che tutto questo negli anni non è stato solo un programma di ricerca, ma anche (e forse soprattutto) *una storia di amicizia e stima* fra i tanti che hanno avuto la fortuna di potersi dedicare a una attività di formazione e ricerca come quella che ha caratterizzato me e l'intero progetto.

5.2 IUE una nuova finestra aperta e Hipparcos (e poi... GAIA)

L'interesse per l'UV è cominciato verso gli inizi degli anni Ottanta, quando Carla Cacciari lavorava a VILSPA (Madrid) al progetto *International Ultraviolet Explorer* (IUE) dell'ESA. Grazie alla novità della finestra spettrale aperta e alle prestazioni assolutamente eccellenti di IUE (peraltro protrattesi a lungo nel tempo) sono state ottenute le prime osservazioni nell'intervallo 115-320 nm di ammassi globulari extragalattici (in M31 e LMC), di una *blue compact galaxy* (NGC1705) con alto tasso di formazione stellare, di stelle *UV-bright* e di *Horizontal Branch* in ammassi globulari galattici e stelle di Popolazione II della Galassia per definirne le proprietà e migliorare lo studio di sintesi di popolazioni stellari non risolte.

Approssimativamente nello stesso periodo, in particolare con Carla Cacciari, Flavio Fusi Pecci e Gisella Clementini (unitasi al gruppo negli anni Ottanta), è iniziato il coinvolgimento nel progetto del satellite Hipparcos, in operazione poi nel periodo 1989-93, che produrrà la prima *survey* astrometrica *all-sky* (120 000 stelle fino a mag 12) di grande accuratezza (milli-arcsec) e aprirà la strada al progetto GAIA, messo in orbita a fine 2013, che sta producendo astrometria al micro-arcsec per un miliardo e mezzo di oggetti *all-sky* fino a mag 20. Grazie a questo, l'attuale impegno e lavoro svolto a Bologna su GAIA (ad esempio da Paolo Montegriffo) è di primaria importanza e vasto, e vede coinvolti a vario titolo quasi una decina di ricercatori, con risultati impressionanti per qualità e impatto sulle conoscenze della struttura, formazione, dinamica ed evoluzione della Galassia e dell'intero suo sistema di satelliti.

Studio delle stelle variabili (in particolare Cefeidi-RR Lyrae) come indicatori di distanza

Da sempre uno dei problemi fondamentali dello studio e conoscenza dell'universo è quello di determinare le distanze degli oggetti osservati e, di conseguenza, definire una scala delle distanze (e dei tempi) quanto più accurata e affidabile possibile. Senza entrare in dettagli, le stelle variabili Cefeidi (e in particolare le variabili RR Lyrae, ovunque si trovino) occupano un ruolo centrale.

Come si è visto, partendo dalle osservazioni di Leonida Rosino, condotte durante la guerra –sfruttando il cielo buio di allora a Loiano – le osservazioni e lo studio delle RR Lyrae ha rappresentato per il gruppo bolognese un filone di ricerca importante e continuo fino ancora a oggi. Carla Cacciari e Gisella Clementini, hanno avuto e hanno tuttora un ruolo centrale e di grande rilievo internazionale in questo settore specifico. Importanti studi sono stati condotti negli anni con Flavio Fusi Pecci, Luciana Federici, Eugenio Carretta (allora studente in tesi di laurea) e altri. Una vasta serie di articoli sono stati pubblicati in collaborazione con ricercatori quali Robert Dickens, Allan Sandage, Jan Lub, Mike Feast e altre indiscusse autorità internazionali in materia.

Lo studio delle variabili per la definizione della scala delle distanze, esteso nel tempo con i nuovi strumenti da terra e dallo spazio, a M31, le Nubi di Magellano e altre galassie del Gruppo Locale con l'avvento di HST, ha infine portato alla spettacolare *survey* e studio delle variabili con GAIA, coordinata oggi da Gisella Clementini.

6. Anni 1985-1990... Verso Hubble Space Telescope e oltre

Il sotto-gruppo stellare legato più specificamente allo studio dell'evoluzione stellare e alle sue applicazioni/implicazioni si è via via allargato alla partecipazione di tanti colleghi italiani e stranieri e a tanti studenti e dottorandi di ricerca che hanno dato un grandissimo contributo a tutte le attività. Da un punto di vista strategico e di prospettiva per gli anni successivi, fino ancora a oggi, l'impegno che più ha caratterizzato

questo periodo è stato certamente legato al coinvolgimento importante con *Hubble Space Telescope* (HST) – in fase di preparazione, messo in orbita ad aprile 1990 – di numerose persone dell'Osservatorio di Bologna con una attività svolta sia presso *Space Telescope Science Institute* (Baltimore): Carla Cacciari (ESA *resident astronomer*), Gisella Clementini (ESA *grant*), Angela Bragaglia (ESA *summer student*), Monica Tosi (ESA *visiting scientist*); sia a Bologna con un assiduo lavoro di approfondimento su prestazioni, programmi, progettazione e simulazioni di osservazioni, svolto in particolare da Alvio Renzini, Flavio Fusi Pecci e Francesco Ferraro e Angela Bragaglia (allora intraprendenti dottorandi di ricerca). Questo coinvolgimento “totale” nel progetto di HST ha favorito da subito importanti collaborazioni internazionali e una brillante e apprezzata produzione scientifica per oltre 30 anni.

I temi di ricerca di fondo su cui si è lavorato sono stati sostanzialmente centrati su:

- confronto e test dei modelli evolutivi stellari e galattici, *le stelle = coloranti e orologi cosmici*;
- formazione ed evoluzione del sistema degli ammassi globulari e galattici, delle galassie e relativi collegamenti con il contesto cosmologico;
- evoluzione chimica, confronto osservazioni fotometriche e spettroscopiche con modelli teorici e simulazioni basate su metodologie innovative, nate a Bologna;
- studio popolazioni stellari risolte della Galassia, di quella di Andromeda-M31, delle Nubi di Magellano e, progressivamente di tutte le galassie del Gruppo Locale e oltre.

Il “Fuel Consumption Theorem” e la sua controparte osservativa

Come detto nell'introduzione, un punto di forza che ha innervato e caratterizzato negli anni l'attività del gruppo stellare è stata l'interazione continua e approfondita fra gli aspetti teorici e quelli osservativi e strumentali/analisi dati.

Alvio Renzini, indiscusso leader mondiale nell'evoluzione stellare e non solo, traccia nel suo intervento l'evoluzione del filone teorico. Qui sinteticamente è importante mettere in evidenza l'impatto che ha avuto sulla programmazione e realizzazione delle ricerche osservative collegate, la individuazione e definizione del cosiddetto *Fuel Consumption Theorem* da parte di Alvio Renzini e Alberto Buzzoni [4], e poi discusso e applicato concretamente ad esempio nell'articolo di *review* da Alvio Renzini e Flavio Fusi Pecci [5]. Non è possibile descrivere qui il quadro complessivo che emerge da questo approccio molto articolato. Parlando in modo un po' naïf, si può dire questo: *le stelle sono praticamente delle lampade standard e degli orologi cosmici che illuminano e colorano gli ammassi, le galassie, ... l'universo!* Si dirà: bene, come lo fanno? Producendo energia (cioè “bruciando” combustibile) e trasferendo energia (cioè “irraggiando” luce e altro) in modo da regolare il loro raggio (quindi la temperatura fotosferica e, di conseguenza, il loro colore), con fasi evolutive e tempi scala legati alla quantità e tipo di combustibile. In questo contesto, grande importanza ha lo studio del basilare processo di “perdita di

There is a limited number of observable physical quantities that models can predict and that can be compared with observed quantities. Basically, the action is restricted to the following comparisons:

FROM COMPUTER OUTPUTS	↔	FROM OBSERVATIONS
1. Temperatures (T_{eff})	↔	Colors
2. Luminosities (L/L_{\odot})	↔	Magnitudes
3. Durations (t_i)	↔	Star counts (N_i)
4. Surface abundances (X_i)	↔	Line profiles
5. Eigenmode periods	↔	Periods

Figura 4. Tabella quantità “teoriche” versus controparti “osservative”.

massa” delle stelle condotto con un approccio teorico, ma non solo, guidato da Alvio Renzini negli anni Settanta e Ottanta con Carla Cacciari e Flavio Fusi Pecci e poi in seguito con la collaborazione di Alberto Buzzoni, Gisella Clementini, Laura Greggio, Livia Origlia (particolarmente attiva e brillante su questo tema in seguito), e altri.

Sulla base di tutto questo, si ha la griglia di corrispondenze fra quantità teoriche e osservative riportate in Fig. 4 (da A. Renzini e F. Fusi Pecci [5]).

Da ciò consegue una deduzione fondamentale: presa una popolazione stellare semplice quale possono essere considerati (almeno in prima approssimazione, valida fino agli anni Duemila) gli ammassi globulari, allora il numero di stelle che si misurano in ogni fase evolutiva è direttamente proporzionale alla durata della fase stessa e, quindi, al carburante nucleare “bruciato” in quella fase. In pratica, dal punto di vista osservativo, questo si traduce nella cruciale importanza di determinare con la maggiore accuratezza e completezza possibile la cosiddetta funzione di luminosità parziale di ogni fase e totale delle stelle della popolazione stellare in studio.

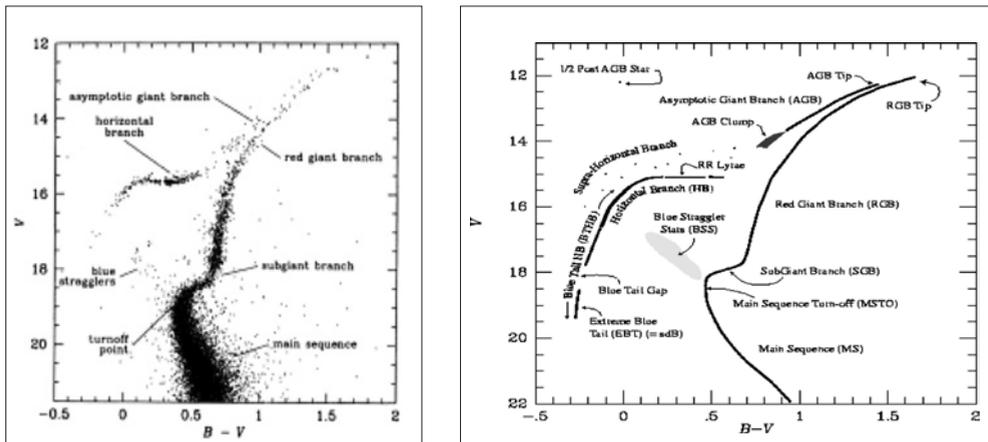


Figura 5. A sinistra: Diagramma Colore-Magnitudine dell’ammasso globulare galattico M3 [6]. A destra: disegno schematico di tracce teoriche che descrivono e interpretano il diagramma osservato.

La tabella sinteticamente riportata in Fig. 4 è stata pertanto la “stella polare” per l’attività di ricerca di tutto il gruppo combinato teoria-osservazioni sulle popolazioni stellari risolte.

Nel tempo, specialmente dopo gli inizi degli anni Novanta, si sono poi aggiunti due altri aspetti: dapprima quello di studiare l’evoluzione chimica e dinamica delle popolazioni stellari (vedi seguito) e, quasi in parallelo, l’interazione fra gli aspetti evolutivi e quelli dinamici sulla vita di una singola stella e/o un sistema binario e, infine, fra le galassie e i loro satelliti (le *streams* mareali, in seguito con il contributo speciale di Michele Bellazzini). Ma la descrizione di questo farà parte di una storia successiva che va temporalmente oltre questo racconto.

Un esempio: la fotometria “globale” dell’ammasso globulare galattico M3

A titolo di esempio e senza volere entrare in alcun modo nella spiegazione e nei dettagli, nella Fig. 5 si riporta un esempio/confronto fra il Diagramma Colore-Magnitudine osservato per la popolazione stellare dell’ammasso globulare galattico M3 [6] e il corrispondente diagramma teorico delle varie fasi evolutive che lo interpreta. Come detto, il numero di stelle che si vedono in ogni fase è quindi proporzionale ai tempi impiegati in quella fase e, quindi a cascata, al *fuel* bruciato dalle reazioni nucleari. Questo tipo di confronti, oltre a dare informazioni quantitative sulle proprietà delle singole stelle dell’ammasso e nel suo complesso, consente di fare un *test quantitativo dei modelli evolutivi, fase per fase, che lo interpretano.*

6.1 Verso le sintesi di popolazioni stellari

Questo tema, trattato da Alvio Renzini nel suo intervento, va comunque almeno citato e inserito in questa *mia carrellata un po’ naif* dell’attività del gruppo bolognese, perché è stato proprio dalla interazione virtuosa fra persone di estrazione e cultura teorica e altre più sperimentale e osservativa che si è potuto lavorare e procedere su tanti, vari, ma *complementari* fronti.

Ci si è resi conto infatti presto, ovviamente non primi e non soli nel mondo, che oltre che costruire e verificare la validità dei modelli evolutivi delle stelle, in tutte le loro fasi, diventava sempre più importante *lavorare e costruire una via stellare alla cosmologia*, non solo contribuendo a definire al meglio la scala delle distanze (e, quindi, dei tempi), ma anche (mi scuso per la grossolana schematicità della espressione) utilizzando le stelle come *costituenti (attivi e passivi), orologi e coloranti evolutivi dei grandi aggregati (galassie, ammassi di galassie, ecc.)*.

In questo contesto sono stati molto importanti una serie molto ampia di lavori che hanno aperto la strada a quello che è diventato nel tempo lo *studio teorico e osservativo della sintesi delle popolazioni stellari, ovunque applicato.*

Alvio Renzini, Laura Greggio, Alberto Buzzoni, Monica Tosi e molti altri hanno reso conosciuto e apprezzato a livello internazionale questo filone multiforme. Nella parte che segue e che conclude questo *excursus* (in verità un po’ sconnesso), vengono descritti un po’ più dettagliatamente le parti collegate alla evoluzione chimica e alla storia di for-

mazione delle galassie, con confronti diretti con le osservazioni. Tuttavia, per dare qui almeno un minimo quadro dei tanti collegamenti e di riferimento temporalmente legati a prima del 1990, fra i tanti lavori pubblicati credo sia utile citare, anche per ulteriori referenze: [7] per la stima dell'abbondanza di Elio primordiale, e [8] per lo studio sulla risalita del flusso UV nelle galassie ellittiche. Molti altri importanti lavori in questo contesto sono poi stati condotti e pubblicati da Alberto Buzzoni (poi assunto come ricercatore a Milano) e, nel filone più strettamente teorico-idrodinamico, da Annibale D'Ercole e Roberto Bedogni, ad esempio sulle supernove. Inoltre, per quanto riguarda in particolare le osservazioni legate alla determinazione delle abbondanze chimiche, grande rilevanza ha avuto nel tempo la collaborazione con Raffaele Gratton e Eugenio Carretta (poi ricercatori all'Osservatorio di Padova). Ma la descrizione più ampia di tutto questo esula dal presente testo.

Restando invece più specificamente sul confronto diretto teoria-osservazioni, è importante ricordare che per studiare l'evoluzione delle galassie in modo accurato e moderno, a Bologna, nella *vecchia, cara Torre dell'Osservatorio*, negli anni Ottanta sono stati sviluppati due nuovi metodi numerici:

1. per calcolare modelli multi-zona dell'evoluzione chimica delle galassie, basati sui primi calcoli realistici dei processi di nucleosintesi stellare;
2. per derivare la storia della formazione stellare dai diagrammi colore-magnitudine delle popolazioni stellari risolte.

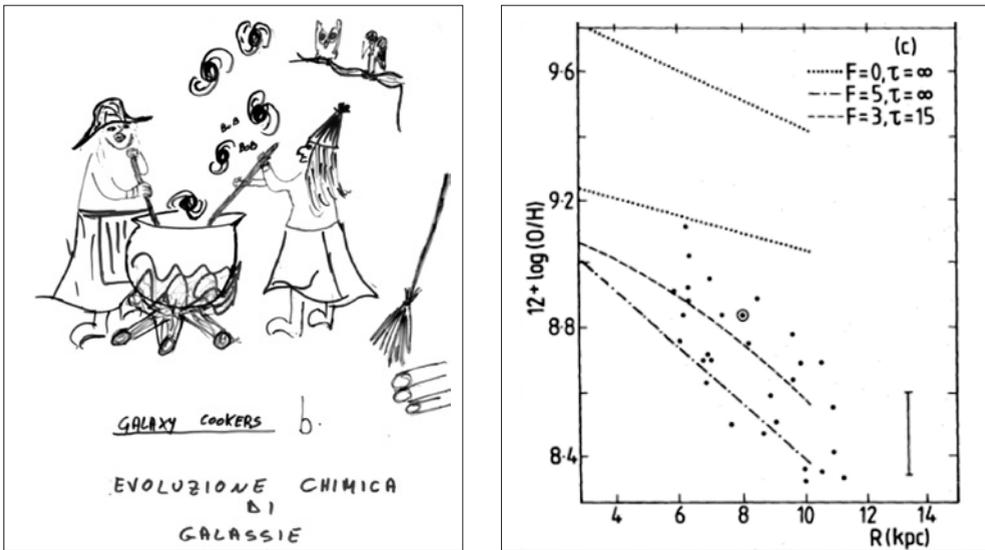


Figura 6. A sinistra lo studio dell'evoluzione chimica delle galassie nella percezione negli anni Ottanta di un professore ordinario di Bologna. A destra la distribuzione dell'abbondanza dell'ossigeno in funzione della distanza dal centro galattico prevista da alcuni modelli (linee) e ricavata da osservazioni del Sole e di regioni HII del disco della Galassia (punti).

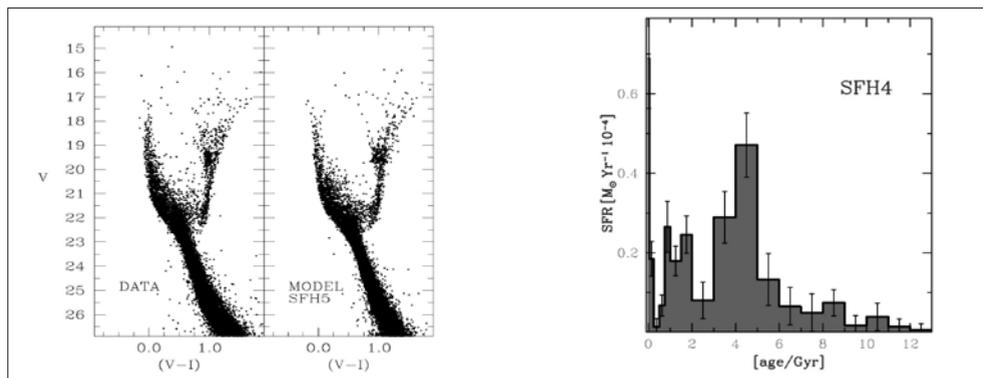


Figura 7. A sinistra il CMD ricavato da osservazioni HST di una regione della Piccola Nube di Magellano, in mezzo il corrispondente CMD sintetico e a destra la risultante storia della formazione stellare (tasso di formazione stellare in funzione del tempo calcolato a ritroso da oggi all'epoca di formazione della Galassia 13.7 miliardi di anni fa). Da Cignoni *et al.* [16].

L'evoluzione chimica delle galassie e confronto con le osservazioni

Il primo fondamentale articolo che mostrò i risultati dei processi di fusione nucleare all'interno di stelle di massa piccola o intermedia per gli elementi chimici più importanti fu pubblicato nel 1981 da Renzini e Voli [9]. L'articolo ebbe un immediato successo planetario e consentì immensi passi avanti nello studio non solo dell'evoluzione stellare, ma anche dell'evoluzione chimica delle galassie. Un secondo studio basilare in questo contesto è stato quello sul *time delay* delle Supernove di tipo Ia, Greggio e Renzini [10] e in seguito Matteucci e Greggio [11]. Grazie a quei risultati importanti, a Bologna vennero sviluppati i primi modelli di evoluzione chimica multi-zona della nostra e di altre galassie vicine di cui osservazioni spettroscopiche fornivano le abbondanze chimiche del mezzo interstellare [12-14]. Quei modelli pionieristici venivano considerati da alcuni come ricette di stregonesche pozioni magiche, ma sono tuttora alla base dei moderni e ben più sofisticati modelli di evoluzione delle galassie (Fig. 6).

La storia di formazione delle galassie e confronto con le osservazioni

Nella seconda metà degli anni Ottanta, in via Zamboni nacque [15] il metodo per derivare le storie di formazione stellare dai Diagrammi Colore-Magnitudine (CMD) delle popolazioni stellari risolte, che ebbe notevole successo internazionale, soprattutto dopo la messa in orbita dell'*Hubble Space Telescope*, che consente di osservare in dettaglio le stelle individuali delle galassie fino a distanze prima impensabili. Il metodo, detto dei *CMD sintetici*, è stato poi ripreso da diversi gruppi in giro per il mondo ed è tuttora il modo migliore per studiare in dettaglio la storia della formazione stellare nella nostra e in galassie fino a 60 milioni di anni luce da noi (Fig. 7).

Ringraziamenti

Il testo, invero un po' disordinato, ma *pensato e scritto di cuore*, include contributi cortesemente inviati da Corrado Bartolini, Carla Cacciari, Gianluigi Parmeggiani e Monica Tosi, che ringrazio per l'amicizia e la pazienza, sintetizzati e rielaborati da me. Insieme a loro *ringrazio davvero sentitamente tutti, e ciascuno singolarmente*, i colleghi italiani e stranieri, gli amici, gli studenti con cui in qualsiasi occasione e per qualsiasi motivo ho collaborato e interagito in questi lunghi anni e nei successivi, fino a oggi. Infine, un grazie particolare a Bruno Marano e all'Accademia delle Scienze per l'invito a ripercorrere questo *viaggio nel tempo* della nostra "Comunità Stellare Bolognese" che tuttora continua forte e incisivo.

Bibliografia

- [1] Racusin J.L. *et al.*, *Nature*, 455 (2008) 183.
- [2] Bendinelli O., Parmeggiani G., Zavatti F., *Astrophys. Space Sci.*, 83 (1982), 239B; *J. Astrophys. Astron.*, 9 (1988), 17; *Astronom. J.*, 99 (1990) 774B.
- [3] Battistini P. *et al.*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 42 (1980) 357.
- [4] Renzini A., Buzzoni A., *Spectral Evolution of Galaxies*, edited by C. Chiosi, A. Renzini, (Reidel, Dordrecht, 1986).
- [5] Renzini A., Fusi Pecci F., *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 26 (1988) 199, e bibliografia ivi inclusa.
- [6] Buonanno R., Buzzoni A., Corsi C.E., Fusi Pecci F., Sandage A.R., *Mem. Soc. Astron. It.*, 57 (1989) 39.
- [7] Buzzoni A., Fusi Pecci F., Buonanno R., *Astron. Astrophys.*, 128 (1983) 94.
- [8] Greggio L., Renzini A., *Astrophys. J.*, 364 (1990) 35.
- [9] Renzini A., Voli R., *Astron. Astrophys.*, 94 (1981) 175.
- [10] Greggio L., Renzini A., *Astron. Astrophys.*, 118 (1983) 217.
- [11] Matteucci F., Greggio L., *Astron. Astrophys.*, 154 (1986) 279.
- [12] Diaz I., Tosi M., *Mon. Notes R. Astron. Soc.* 208 (1984) 365.
- [13] Matteucci F., Tosi M., *Mon. Notes R. Astron. Soc.*, 217 (1985) 391.
- [14] Tosi M., *Astron. Astrophys.*, 197 (1988) 33.
- [15] Tosi M. *et al.*, *ESO Messenger*, 57 (1989), 57; *Astron. J.*, 102 (1991) 951.
- [16] Cignoni M. *et al.*, *Astrophys. J.*, 775 (2013) 83.

L'Astronomia a Bologna: 1960-1990

Astrofisica Teorica in Torre

Alvio Renzini*

1. Gli strumenti del "Teorico" (1960-1990)

Si può dire che l'astrofisica teorica sia cominciata in Torre nel 1968, e che prese poi un qualche slancio nel 1970 con l'istituzione del corso di Astrofisica Teorica, complementare del Corso di Laurea in Astronomia. Esiste uno stereotipo secondo cui al teorico dovrebbero bastare carta e penna, ma in pratica tocca anche fare calcoli complessi e gli anni coperti da questo *Amarcord* hanno visto una notevole evoluzione degli strumenti di calcolo e nel modo di visualizzare i relativi risultati. Forse vale la pena raccontare per sommi capi questi cambiamenti.

Attorno al 1970 fu istituito il CINECA, e non ricordo come si facessero i calcoli prima di allora. Ma col CINECA arrivò uno dei massimi calcolatori del tempo, un "CDC" dell'omonima Control Data Corporation. Si andava allora a Casalecchio con alcuni chili di schede perforate e in Torre avevamo solo le macchine per perforarle. Un andirivieni continuo a portare *racks* di schede e riportare pacchi di carta: l'*output* del calcolatore si chiamava infatti semplicemente "la carta".

Un decennio circa più tardi arrivarono le macchine più piccole, ma distribuite presso i vari istituti, e sulle nostre scrivanie comparvero i primi terminali a tubo catodico, dapprima collegati al VAX 780 dell'IRA. Più tardi riuscimmo a conquistare un più piccolo VAX 730 tutto nostro, poi sostituito da un VAX 750. Nella metà degli anni Ottanta comparvero i primi PC, mentre al CINECA era arrivato il famoso supercomputer Cray, con la sua fontanella al fluorocarbonio e con cui si interagiva via terminale e nastri magnetici. Di colpo scomparvero le schede e le relative perforatrici. Un'altra vita... E oltretutto coi VAX arrivò per noi (e noi soli fisici e astronomi) la posta elettronica. Si cominciò a ragionare e ben presto il *telex* fu dimenticato.

* Associato all'INFN, Sezione di Padova



Figura 1. La Torre della Specola, Palazzo Poggi, Bologna.

Per tutti gli anni Settanta e primi anni Ottanta una buona fetta del tempo di lavoro se ne andava a fare grafici. Avevamo dei pacconi enormi di carta dai computer del CINECA e i nostri strumenti erano carta millimetrata, matita e temperino fa-punte per averle veramente appuntite. Per fare un grafico partivano ore. Dalla carta millimetrata bisognava poi passare il grafico *in bella*, su carta da lucidi, una specie di carta grigiastra, semitrasparente, che non si vede più in giro da almeno trent'anni. E qui servivano pennini a serbatoio per inchiostro di china, curvilinei e normografo, poi sostituito dai più pratici trasferelli, con tanto di lettere greche e tutto il resto. Le figure a china su carta da lucidi andavano poi appiccicate sui manoscritti battuti a macchina che venivano spediti alle riviste, *air mail*. E infine anche da noi in Torre arrivò il *plotter*, SMONGO e tutto il resto. Una pacchia. Dimenticato all'istante tutto l'armamentario appena menzionato, incluse le lamette da barba per correggere errori sulla carta da lucidi.

2. Qualche risultato scientifico

Nel 1969-70 un primo risultato di rilievo fu trovare che nelle stelle in fase di bruciamento dell'elio la regione centrale rimescolata dalla convezione e dalla semiconvezione è circa doppia di quanto prima ritenuto. L'effetto fu di raddoppiare il tempo di vita in fase di braccio orizzontale per le stelle degli ammassi globulari. Questo comportò ugualmente un raddoppio della stima dell'elio primordiale, da confrontarsi con il corrispondente valore predetto dalla nucleosintesi del Big Bang (AR, FFP, AB). Accanto all'elio primordiale, ci si cimentò anche con la determinazione dell'età degli ammassi globulari, che dava un limite inferiore all'età dell'Universo, attività proseguita anche nel decennio successivo che permise di partecipare attivamente a numerosi *meetings* cosmologici rimanendo pertanto esposti a problematiche più ampie di quelle fin lì praticate in Torre.

Un discreto filone di ricerca di quegli anni riguardò la perdita di massa nelle giganti rosse e i suoi effetti sull'evoluzione stellare. Fu calibrata tramite gli ammassi globulari una relazione empirica del tasso di perdita di massa (tuttora ancora largamente utilizzata), e come risultato fu applicata a una serie di situazioni astrofisiche.

Per esempio, la relazione massa iniziale-massa finale delle stelle, la perdita di massa da parte di supergiganti rosse come precursori delle stelle tipo Wolf-Rayet, a loro volta precursori di supernovae di Tipo I (in seguito denominate Ib e Ic), e infine l'interazione del materiale eiettato da una supernova di Tipo II con il mezzo circumstellare creato dal precedente vento (AR, FFP).

Accanto a questi buoni risultati, vanno anche ricordate alcune frustrazioni, avendo vanamente perso tempo nel tentativo di sviluppare una teoria (*from first principles*) della perdita di massa in giganti rosse, nonché l'infruttuosa caccia al Secondo Parametro controllante la morfologia del braccio orizzontale degli ammassi globulari (AR). Problema questo che verrà risolto da altri trent'anni più tardi. Furono comunque calcolati i flussi acustici generati dalla convezione in giganti rosse come potenziale motore della perdita di massa (CC, AR).

Gli anni Ottanta videro un discreto ampliarsi delle tematiche di ricerca. Si passò dall'evoluzione stellare a quella delle popolazioni stellari, con l'introduzione del cosiddetto *Fuel Consumption Theorem* e sue applicazioni quali ad esempio alla risalita ultravioletta nello spettro delle galassie ellittiche (AR, AB, LG). L'evoluzione delle stelle di AGB, la loro nucleosintesi e il loro ruolo nella formazione delle nebulose planetarie e dei vari tipi di nane bianche fu un altro fruttuoso filone di ricerca (AR, MV), come pure i modelli di evoluzione chimica della nostra Galassia e di altre galassie sia spirali che nane (MT, LG). La distribuzione nei tempi di ritardo delle supernovae di Tipo Ia fu calcolata agli inizi degli anni Ottanta e applicata all'evoluzione chimica delle galassie (LG, AR).

Il ruolo delle instabilità termiche negli involucri stellari nel dar forma ai percorsi evolutivi delle stelle nel diagramma di Hertzsprung-Russell fu chiarito e sviluppato in quegli anni, con l'utilizzo del Cray del CINECA (AR, CR, LG, LF).

Il decennio si chiuse quindi con lo sviluppo di modelli idrodinamici dei flussi gassosi in galassie ellittiche, inclusa l'evoluzione della loro luminosità in raggi X, come derivanti dall'interazione della massa persa dalle stelle con le supernovae di Tipo Ia (AD, LC, SP, AR). Poi, con l'arrivo di Hubble, da teorici si diventò astronomi osservativi.

Le iniziali stanno per:

AB - Alberto Buzzoni; AD - Annibale D'Ercole; AR - Alvio Renzini; CC - Carla Cacciari; CR - Claudio Ritossa; FFP - Flavio Fusi Pecci; LC - Luca Ciotti; LF - Lilia Ferrario; LG - Laura Greggio; MT - Monica Tosi; MV - Marco Voli; SP - Silvia Pellegrini.

3. Altre attività

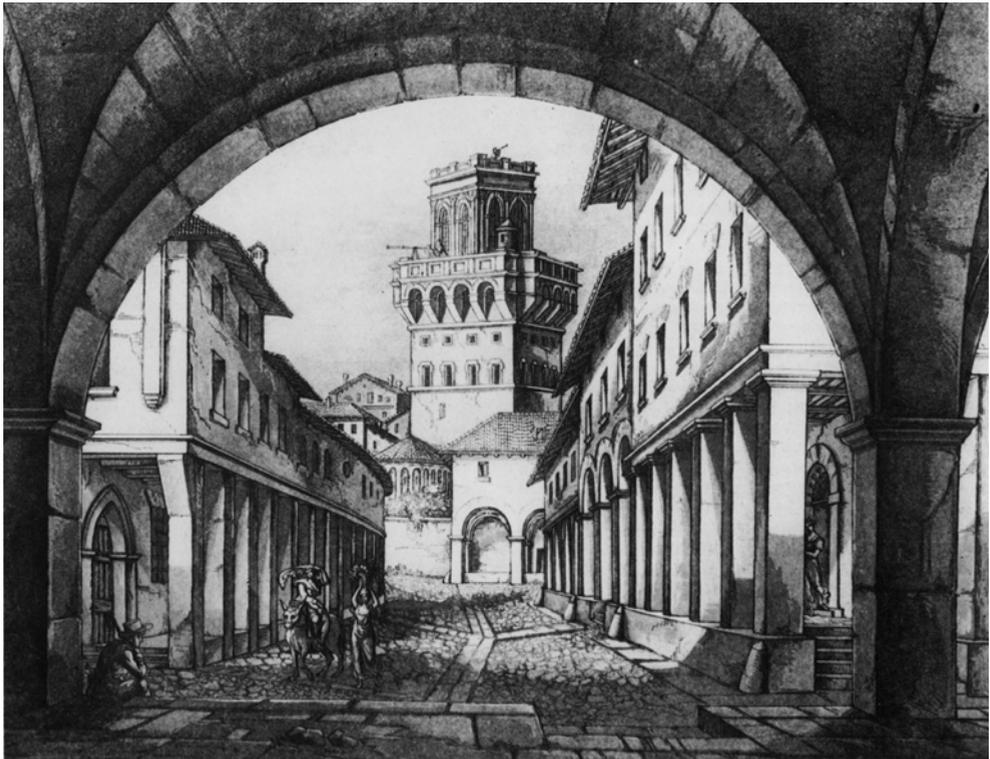
Una delle attività che aiutarono a proiettare la ricerca in Torre a livello internazionale fu l'organizzazione di numerose scuole, poi diventate workshops, presso il Centro di Cultura Scientifica Ettore Majorana di Erice, che qui vengono menzionate:

- 1970, 1972, 1976: Erice Schools on Stellar Astrophysics;
- 1978: Supernovae and Supernova remnants;
- 1980: Physical Processes in Red Giants;
- 1983: Stellar Nucleosynthesis;
- 1985: Spectral Evolution of Galaxies;
- 1986: Stellar Populations (tenutasi presso l'STScI di Baltimore);
- 1988: Towards Understanding Galaxies at Large Redshift;
- 1989: Windows on Galaxies.

Da cui si percepisce un progressivo evolversi degli interessi di ricerca dall'ambito stellare a quello extragalattico.

Infine, sembra opportuno menzionare brevemente il successo riscosso a livello internazionale da molte delle *Nostre Ragazze*, che si sono formate come ricercatrici in Torre e che sono emigrate all'estero contribuendo ad alimentare la *Fuga dei Cervelli*:

- **Alessandra Aloisi**, Deputy Head – Mission Division, STScI, Baltimore;
- **Francesca Romana Boffi**, Deputy Head – Instruments Division, STScI, Baltimore;
- **Paola Caselli**, Director MPE, Garching;
- **Maria Rosa Cioni**, Professor, University of Potsdam;
- **Lilia Ferrario**, Associate Director of Education, Australian National University, Canberra;
- **Claudia Maraston**, Full Professor, University of Portsmouth, Eddington Medal 2018;
- **Letizia Stanghellini**, Associate Astronomer, NOAO, Tucson.



Veduta della Specola da vicolo San Sigismondo in un'incisione di Antonio Basoli del 1824 (Museo della Specola dell'Università di Bologna).

Finito di stampare nel mese di maggio 2020
per i tipi di Bononia University Press

*Accademia delle Scienze
dell'Istituto di Bologna*

L'Accademia delle Scienze, con il patrocinio dell'Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, promuove una serie di incontri volta ad analizzare il percorso scientifico compiuto dalle diverse aree di ricerca dislocate entro il perimetro dell'Alma Mater, nel periodo che corre dai primi anni Cinquanta agli esordi del XXI secolo.

L'intento dell'iniziativa non è quello dell'autocelebrazione di una fase che è stata indubbiamente molto positiva nella vita plurisecolare del nostro ateneo, ma di porre in evidenza gli esiti che ha conseguito la sua ricerca sul piano nazionale e internazionale; le reti scientifiche che intorno a queste attività sono nate e si sono sviluppate; l'attività formativa che ne è seguita; i rapporti con le imprese, le amministrazioni pubbliche e altri comparti della vita civile cittadina e regionale.

Questa ricognizione, che non è solo di memoria, si propone anche l'obiettivo di segnalare i possibili livelli di crescita e di intersezione tra le frontiere della scienza e della tecnologia e le esigenze della vita poiché la ricerca e la formazione sono chiamate a svolgere compiti molto rilevanti nella società della conoscenza.



€ 30,00