

# Misura della luminosità radio di galassie attive

**Stagisti:** Ticca Alice, Vaccari Enrico

**Tutor:** Giroletti Marcello, Righini Simona

## 1. Intro

L'attività in oggetto si è svolta nell'ambito del progetto SperimEstate con la supervisione dei tutor Marcello Giroletti (ricercatore presso INAF-IRA) e Simona Righini (tecnologa presso INAF-IRA), in parte presso l'Area della Ricerca di Bologna e in parte presso la Stazione Radioastronomica di Medicina, dal 26 giugno al 7 luglio dell'anno 2017.

Al giorno d'oggi la radioastronomia è certamente un settore scientifico sperimentale all'avanguardia. Il fascino che essa suscita risiede principalmente nella possibilità di osservare ciò che l'occhio umano mai potrebbe cogliere: l'universo radio.

## 2. Progetto

Lo scopo dell'attività di stage è quello di stimare la luminosità radio di differenti radiosorgenti, attraverso la misura della loro densità di flusso (una grandezza fotometrica che misura la potenza dell'emissione elettromagnetica di una sorgente per unità di superficie e di frequenza) tramite l'antenna parabolica di 32 m della Stazione Radioastronomica di Medicina.

Alle fasi operative del progetto, incentrate sull'osservazione radio e la riduzione e analisi dei dati, sono state premesse alcune lezioni introduttive, dedicate all'illustrazione delle principali proprietà delle radiogalassie, soprattutto dal punto di vista fenomenologico, e delle caratteristiche del radiotelescopio.

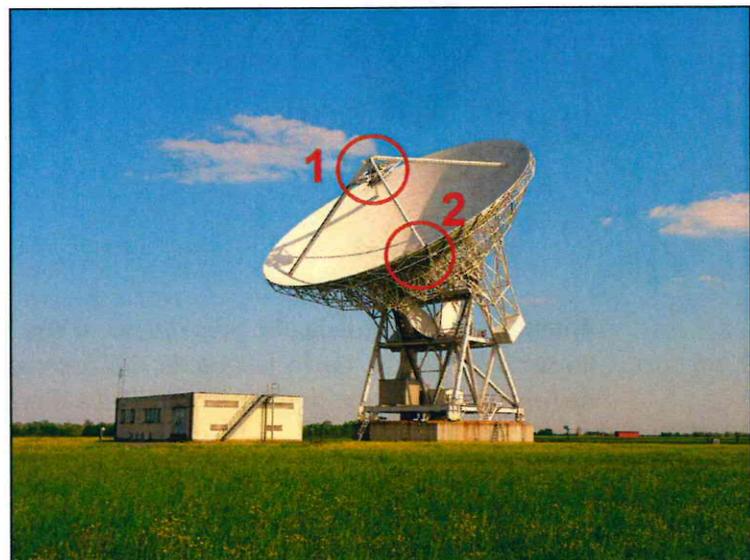
## 3. Osservazioni

L'antenna parabolica della Stazione dispone di due fuochi: uno primario, posto nel fuoco geometrico del paraboloide (vedi Figura 1, 1), e uno secondario, collocato sul paraboloide stesso (vedi Figura 1, 2). Per far convergere i segnali al fuoco secondario si fa uso di un subriflettore, uno specchio che viene posto davanti al fuoco primario.

Ciascun fuoco ospita diversi ricevitori, dispositivi circuitali in grado di convertire segnali elettromagnetici di specifica frequenza in segnali elettrici. Nel nostro caso le bande di frequenza utilizzate sono quelle a 5, 8 e 24 GHz.

Ogni ricevitore ha due uscite separate: due "canali" (o *section*) che forniscono rispettivamente misure del segnale in LCP ("left circular polarization") e RCP ("right circular polarization").

Un'altra componente fondamentale del radiotelescopio è il backend (vedi Figura 2), strumento che si occupa di interpretare e misurare il segnale in ingresso, fornendo i dati relativi. Nel caso del backend analogico "total power" usato per le osservazioni del progetto, esso produce una misura di



**Figura 1**

ampiezza del segnale (in conteggi arbitrari) al variare del tempo. La risposta del backend, durante una scansione attraverso una sorgente puntiforme, corrisponde alla somma di più contributi (vedi Figura 3): principalmente si tratta della componente atmosferica, responsabile della presenza di una baseline idealmente lineare, ma che può anche mostrare un andamento più complesso (dovuto a disomogeneità atmosferiche o variazioni strumentali); e una componente dovuta alla sorgente in osservazione, modellabile con una curva di Gauss.



Figura 2

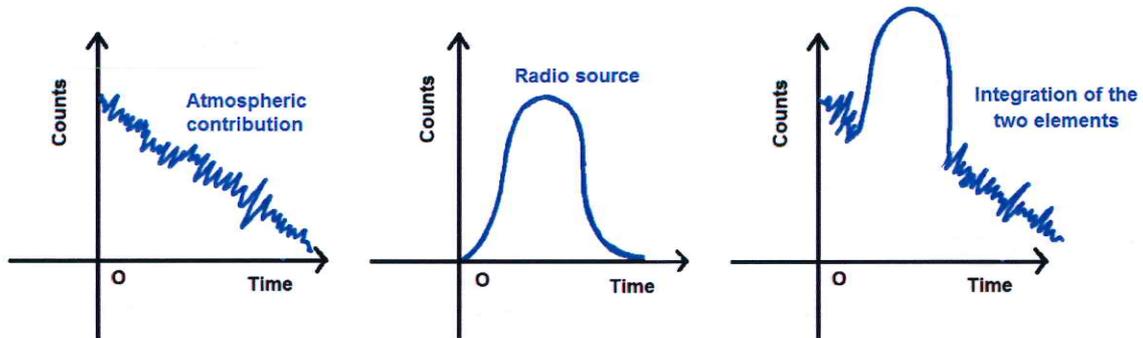


Figura 3

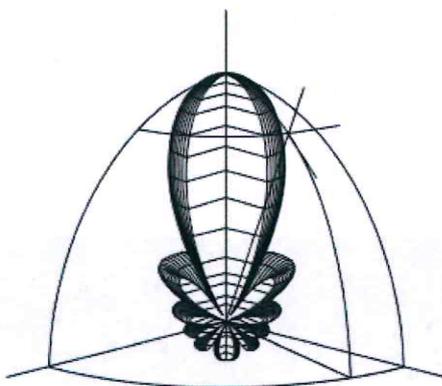


Figura 4

La larghezza del fascio principale (*primary beam*), che corrisponde alla risoluzione angolare delle nostre osservazioni, ossia l'angolo minimo sotto il quale il sistema ottico è in grado di distinguere un dettaglio, varia in funzione della frequenza (vedi Figura 4). La legge che regola tale andamento è ( $\lambda$  è la lunghezza d'onda,  $D$  il diametro dell'antenna):

$$\theta \propto \frac{\lambda}{D}$$

Antenne ad alto guadagno presentano anche lobi laterali di altezza minore (*secondary beam*) che limitano in piccola parte la qualità dell'osservazione, in quanto, sebbene la sensibilità maggiore dell'antenna sia comunque orientata nella direzione di puntamento, sono rilevati segnali anche nelle altre direzioni.

L'identificazione di qualsiasi sorgente sulla sfera celeste avviene mediante una coppia di coordinate che possono fare riferimento a due sistemi diversi: uno riferito all'osservatore e al suo orizzonte locale (sistema Orizzontale: Azimuth ed Elevazione) e uno solidale alla sfera celeste (sistema Equatoriale: Ascensione Retta e Declinazione).

L'antenna rileva il segnale dalle diverse sorgenti effettuando *cross-scan*, scansioni a velocità costante costituite da quattro *subscan*: due in Declinazione e due in Ascensione Retta (vedi Figura 5).



Figura 5

### 3.1. Preparazione

La preparazione delle osservazioni è avvenuta in diverse fasi.

#### 3.1.1. Sorgenti

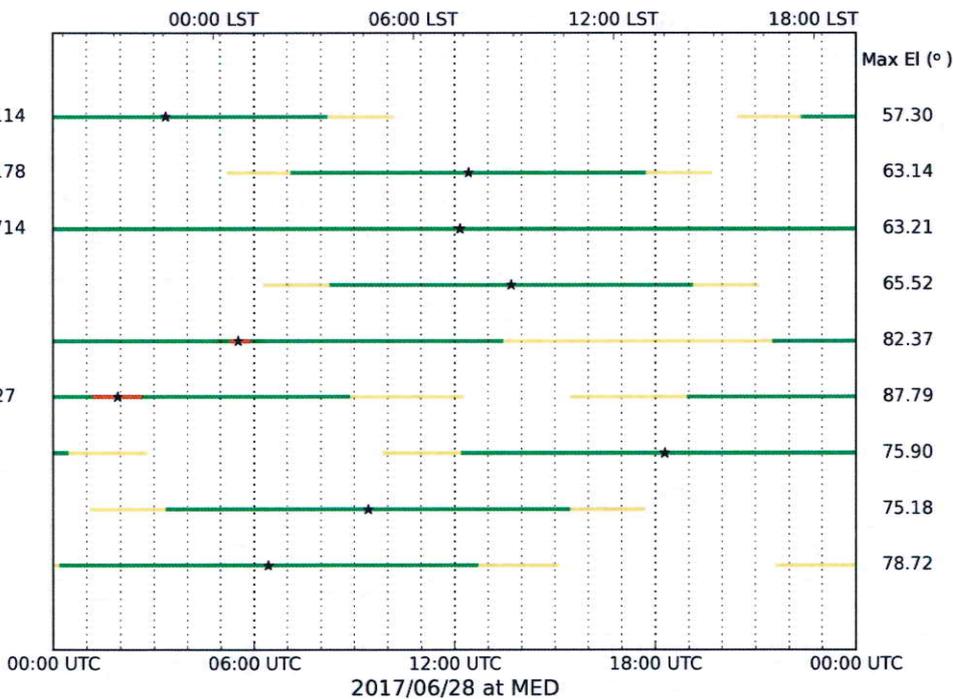
L'obiettivo principale della nostra indagine è quello di misurare la luminosità di un campione di radiosorgenti (di seguito chiamate anche col nome di "targets"), corpi celesti la cui densità di flusso è tuttavia variabile nel tempo. Considerando inoltre che il radiotelescopio fornisce dati relativi alla densità di flusso in conteggi (privi di unità di misura, dunque puramente arbitrari), si rende necessario ricorrere a particolari e rare sorgenti celesti, la cui densità di flusso risulta pressoché costante nel tempo. In radioastronomia si parla di "calibratori", delle vere e proprie candele campione. La tabella A ordina per Ascensione Retta crescente le radiosorgenti (calibratori e target) che ci sono state fornite all'inizio dello stage. I dati contenuti in essa sono stati presi direttamente da due differenti database online: NED (<https://ned.ipac.caltech.edu/>) e SIMBAD ASTRONOMY (<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>).

TABELLA A								
SORGENTE	RA	DEC	TIPO	CALIBRATORE (C) O TARGET (T)	Densità di flusso in letteratura (NED)			Osservabile in sessione?
					@5 GHz (Jy)	@8 GHz (Jy)	@22-23 GHz (Jy)	
3C 20	00h43m08,80s	+52d03m35,00s	Galaxy	T	4,15	8,00	0,90	Y
3C 48	01h37m41,30s	+33d09m35,00s	Quasar	C	5,50	3,33	1,23	Y
3C 123	04h37m04,38s	+29d40m13,82s	Galaxy	C	16,21	10,60	3,52	Y
0716+714	07h21m53,45s	+71d20m36,40s	Quasar	T	0,97	0,60	1,30	Y
0735+178	07h38m07,39s	+17d42m19,00s	Quasar	T	2,20	3,60	3,20	Y
OJ 287	08h54m48,87s	+20d06m30,60s	Quasar	T	2,61	3,86	5,40	Y
3C 286	13h31m08,29s	+30d30m32,96s	Quasar	C	7,43	5,36	2,30	N
NGC 7027	21h07m01,50s	+42d14m12,00s	Pl. Nebula	C	5,51	0,75	5,5	N
2230+114	22h32m36,41s	+11d43m50,90s	Quasar	T	3,65	3,40	2,15	N

### 3.1.2. Visibilità

Come esercizio di preparazione all'osservazione ci è stato anzitutto chiesto di verificare quali delle sorgenti fornite fossero visibili nell'arco di tempo a nostra disposizione. La fascia oraria prevista per le osservazioni è stata dalle 11:00 alle 15:30 di tre differenti giorni. Abbiamo dunque utilizzato CASTIA (<http://www.ira.inaf.it/Observing/castia/site/>), un tool online che richiede in input l'elenco dei target in analisi, la data di osservazione, l'osservatorio di riferimento, e produce un diagramma (vedi Figura 6) che mostra le fasce di osservabilità delle sorgenti indicate. È necessario sottolineare che l'antenna parabolica, per ragioni strumentali e dipendenti dall'atmosfera, è in grado di ricevere segnale in modo ottimale solo in un intervallo angolare che va dai 20 agli 80 gradi di elevazione. Infatti sotto i 20 si ha un guadagno molto basso e un contributo atmosferico troppo alto dovuto allo spessore dell'atmosfera, mentre sopra agli 80 l'antenna non riesce più ad eseguire scan veloci.

Dalla nostra ricerca è emerso che due sorgenti non erano compatibili con gli orari di osservazione: il calibratore NGC 7027 (visibile dalle ore 04:45 alle 11:00) e il target 22 30+114 (visibile dalle ore 00:30 alle 10:00).



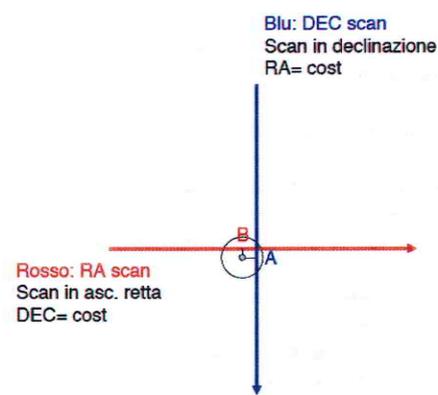
**Figura 6**  
 Diagramma di visibilità sorgenti  
**LEGENDA:**  
 - Visibilità ottimale  
 - Sorgente oltre 80 gradi di EL  
 - Sorgente tra 0 e 20 gradi di EL

### 3.1.3. Preparazione schedule

L'esecuzione delle osservazioni presuppone la preparazione della cosiddetta "schedula", un insieme di file di testo contenenti istruzioni per il setup dell'antenna, del ricevitore e del backend, nonché la sequenza di operazioni di scansione sulle varie sorgenti. A questo scopo, si devono percorrere alcuni passi:

- Dopo aver individuato il campione di sorgenti da analizzare, per ognuna delle bande di interesse, definire il numero di scansioni e la loro durata per ottenere un buon rapporto segnale/rumore (S/N);
- Realizzare le schedule, che contengono le istruzioni che vengono inviate al sistema di controllo, con uno strumento software chiamato "basie".

Per poter procedere è necessario compilare due differenti file per ogni banda di osservazione: un file "configuration" (informazioni per il setup del telescopio, ovvero ricevitori e backend, e configurazioni spaziali delle scansioni) e un file "targets" (sequenza delle sorgenti, specificando il numero di cross scan da eseguire su ciascuna di esse). In particolare, per le alte frequenze, nel file "targets" è opportuno inserire i comandi per l'esecuzione di cross scan di tipo "point" (vedi Figura 7), pre-scansioni che consentono di misurare localmente gli offset di puntamento comunicarli al sistema, che provvede ad implementarli nell'acquisizione successiva. Il recupero degli errori di puntamento dovrà essere tanto migliore quanto più sarà elevata la frequenza di osservazione, ossia quanto più sarà stretto il beam dell'antenna.



**Figura 7**

Con basie sono stati quindi generati i file di schedula, successivamente copiati sulla macchina di osservazione tramite connessione ssh da terminale, un insieme di programmi che consentono di stabilire connessioni a sistemi o server remoti in modo sicuro.

Per poter effettuare le osservazioni è necessario stabilire un collegamento via VNC, un programma che permette di scambiare dati a distanza e operare su un desktop remoto.

### 3.2. Esecuzione

L'esecuzione delle osservazioni avviene mediante una interfaccia utente costituita da diverse finestre testuali, che consentono di monitorare lo status dei diversi dispositivi impiegati e di inviare comandi al sistema di controllo dell'antenna.

#### 3.2.1. ESCS (Enhanced Single-dish Control System)

Per avviare la schedula abbiamo utilizzato ESCS, il sistema di controllo della parabola, cui abbiamo fornito una serie di comandi preliminari tramite il terminale "operatorInput".

Spiegazione comandi	Banda C	Banda X	Banda K
<b>Impostazione banda e fuoco di riferimento</b>	setupCCCL	setupXXP	setupKKC
<b>Regolazione oscillatore locale</b>	setLO=4900	N.D.	setLO=23400
<b>Regolazione larghezza di banda</b>	Default	Default	setSection=[n],*,1200,*,*,*,*
<b>Scelta del canale di riferimento</b>	device=0	device=0	device=1
<b>Verifica dell'intensità del segnale</b>	getTpi	getTpi	getTpi
<b>Regolazione dell'intensità (900-1000 valori ottimali)</b>	setAttenuation=[n], [dB]	setAttenuation=[n], [dB]	setAttenuation=[n], [dB]
<b>Avvio della schedula</b>	startSchedule=bandaC.scd,1	startSchedule=bandaX.scd,1	startSchedule=bandaK.scd,1
<b>Sospensione della schedula</b>	stopSchedule	stopSchedule	stopSchedule
<b>Posizione di parcheggio dell'antenna</b>	antennaPark	antennaPark	antennaPark

#### 3.2.2. Visualizzazione grafica con IDL

Per poter osservare in tempo reale i segnali rilevati dall'antenna abbiamo lanciato un software specifico, IDL.

Spiegazione	Comandi
<b>Nome utente</b>	ssh -X students@192.167.189.54
<b>Password</b>	*****
<b>Lanciare il software</b>	idl
<b>Compilare codice (compilatore)</b>	.r fitslook
<b>Avviare programma di visualizzazione</b>	fitslook



### 3.2.3. Caratteristiche delle bande

★ Banda C (5 GHz):

- Codice antenna: CCC (le prime due lettere indicano la banda, l'ultima il fuoco);
- Ricevitore collocato nel fuoco secondario-cassegrain;
- Poco sensibile all'umidità atmosferica;
- Altamente disturbata dalle interferenze locali;
- Noise basso.

★ Banda X (8 GHz):

- Codice antenna: XXP (le prime due lettere indicano la banda, l'ultima il fuoco);
- Ricevitore collocato nel fuoco primario;
- Poco sensibile all'umidità atmosferica;
- Interferenze radio meno impattanti;
- Noise ridotto.

★ Banda K (18-26 GHz):

- Codice antenna: KKC (le prime due lettere indicano la banda, l'ultima il fuoco);
- Ricevitore collocato nel fuoco secondario-cassegrain;
- Disturbato in modo considerevole dalle condizioni atmosferiche;
- Interferenze pressoché assenti;
- Noise accettabile.

### 3.2.4. Noise

Il noise (o rumore) è un insieme di segnali di origine aleatoria che vanno a sommarsi al segnale utile da studiare. Questo è prodotto essenzialmente dalla strumentazione utilizzata. Esiste una formula che permette di calcolare il noise ( $\sigma$ ) in funzione della temperatura del sistema ( $T_{sys} = T_{ricevitore} + T_{cielo} + T_{noise} + T_{spillover}$ ), della larghezza della banda in esame e del tempo.

$$\sigma = \frac{T_{sys}}{\sqrt{t \Delta \nu}}$$

**Temperatura del sistema**  
**Tempo e frequenza**

Come si può notare, a parità di temperatura di sistema e frequenza, una diminuzione del noise si ottiene aumentando i tempi di acquisizione o la larghezza di banda.

### 3.2.5. Logbook delle sessioni osservative

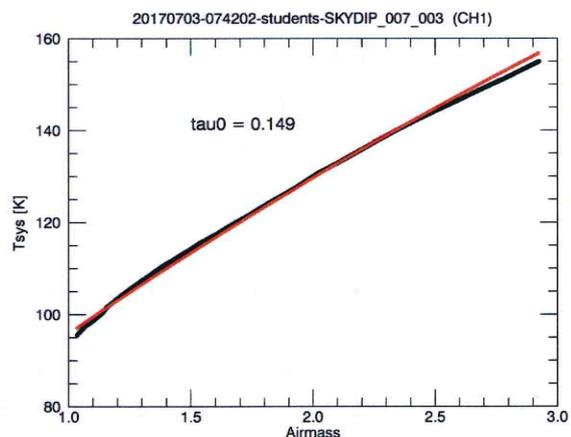
- MERCOLEDÌ 28/06/17:  
Preparazione schedule e osservazioni in banda X. Sospensione immediata della schedula causa violento temporale. Dati ottenuti scartati perché non attendibili.
- GIOVEDÌ 29/06/17:  
Inizio osservazioni in banda K. Interruzione immediata della schedula causa forti folate di vento.
- LUNEDÌ 03/07/17:  
Osservazioni in banda C e K e ripetizione in banda X. Dati ottenuti con successo e utilizzati per la successiva analisi.

## 4. Analisi dati

### 4.1. Offset di puntamento, curve di guadagno, opacità atmosferica

Durante la riduzione dati è necessario considerare alcuni fattori che in vario modo influenzano le misure. Essi devono essere compensati, per quanto possibile, al fine di ottenere misure quanto più plausibili: gli errori di puntamento (già corretti durante le scansioni stesse), le variazioni dell'opacità atmosferica (in tal caso vengono effettuate scansioni specifiche chiamate SKYDIP - vedi Figura 8 - che consentono di stimare il contributo dell'umidità) e le deformazioni gravitazionali dell'antenna stessa durante le rilevazioni (non eliminabili a Medicina in quanto la parabola non dispone di ottiche attive).

Bisogna anche prestare attenzione alla scelta dei calibratori di flusso, che devono trovarsi ad una distanza apparente non troppo elevata dai target, così da non ottenere misurazioni sfalsate dovute a disomogeneità dell'atmosfera, soprattutto in condizioni meteo variabili.



**Figura 8**

## 4.2. Riduzione dati con CAP

I dati acquisiti sono stati ridotti mediante l'uso di una serie di programmi (scritti nel linguaggio IDL) prodotti dai tutor, collettivamente chiamati CAP (Cross-scan Analysis Pipeline).

### 4.2.1. Misura della densità di flusso delle sorgenti

L'analisi dati si basa su cinque step fondamentali, da ripetere per ciascuna banda (C, X, K):

1. SEPARA, separazione dei dati ottenuti per frequenza;
2. FLAGGING, analisi qualitativa dei dati e scelta di quelli da utilizzare per l'analisi ;
3. RUNCALIB, procedura che, tramite funzioni matematiche, integra tutti i subscan dei calibratori selezionati precedentemente ed esegue un fit costituito da una gaussiana e una baseline lineare o di terzo grado, eliminando le interferenze di tipo "spike", come quelle dovute al radar a 8GHz in uso presso l'Aeroporto di Bologna (vedi Figura 9, si notino i residui che, nel caso di una sorgente forte come 3C123, mostrano le tracce dovute ai lobi secondari, non modellati dal fit);
4. C2JTIMELINE, funzione che consente di ottenere il valor medio o l'interpolazione lineare dei fattori di conversione  $c2Jy = S(Jy)/A(\text{cnt})$  ottenuti dai vari calibratori;
5. RUNTARGET, procedura che opera sui target come al p.to 3, calcolando però direttamente la densità di flusso delle sorgenti ( $S(Jy) = c2Jy \cdot A(\text{cnt})$ ).

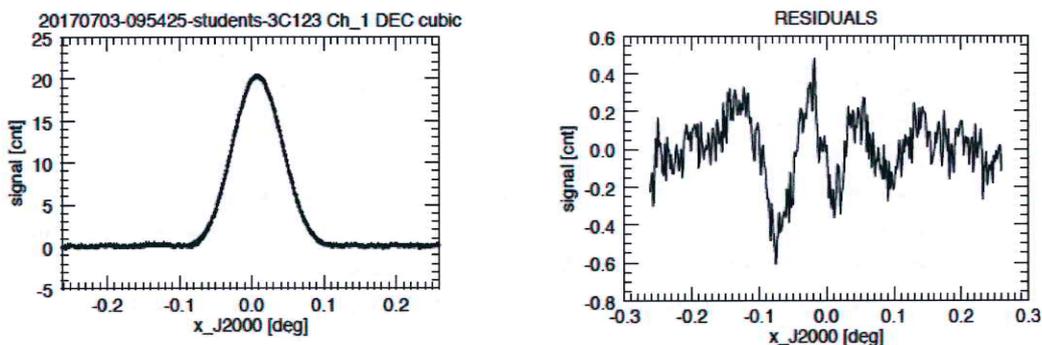
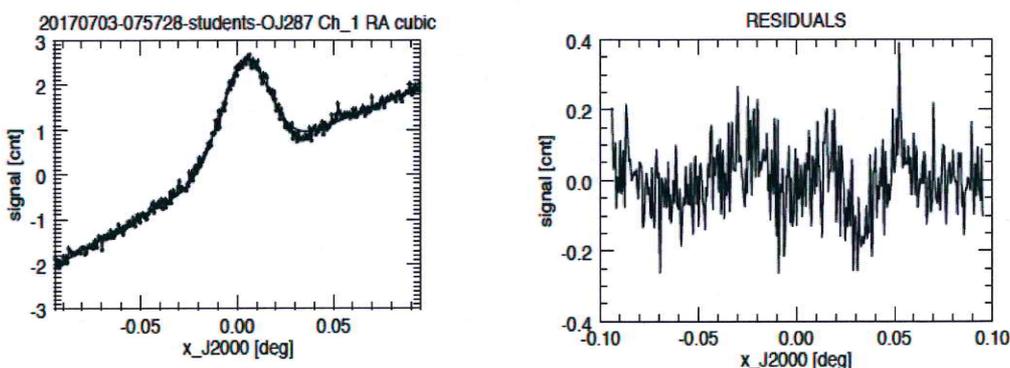


Figura 9



#### 4.2.2. Calcolo degli indici spettrali

A questo punto è necessario spendere due parole riguardo alle caratteristiche fisiche delle sorgenti studiate. Nella maggior parte dei casi si tratta di Quasar (Quasi-Stellar Radio Source), ovvero nuclei galattici attivi che hanno un'intensa attività radio. Nel nostro caso per ragioni strumentali dovute al beam dell'antenna, essi si presentano come sorgenti puntiformi, per cui la luminosità rilevata è la somma di tutte le radio-onde emesse dalla sorgente in ogni sua parte.

Tra le bande di frequenza studiate abbiamo calcolato l'indice spettrale, ovvero l'esponente  $\alpha$  della relazione:

$$S(\nu) = \nu^{-\alpha}$$

che descrive l'andamento della densità di flusso al variare della frequenza. Tale valore indirettamente fornisce informazioni sull'orientamento dei getti emessi dalla sorgente.

Generalmente le radiosorgenti hanno un indice spettrale  $\alpha > 0$ , il che significa che la loro densità di flusso diminuisce con la frequenza. La pendenza dello spettro, tuttavia, varia a seconda dell'orientamento dei getti rispetto all'osservatore: si appiattisce se i getti formano un angolo piccolo con la linea di vista, perché in quel caso - per effetti di amplificazione - l'emissione proveniente dal nucleo, che avviene a frequenze più alte di quella prodotta nei lobi, diventa più rilevante. In poche parole, minore l'angolo formato dai getti con la linea di vista, più "blu" diventano le sorgenti.

Il nostro obiettivo è quello di verificare, caso per caso, se la componente rossa predomina più o meno nettamente su quella blu.

Se  $\alpha$  è grande lo spettro risulta ripido: ciò significa che l'emissione radio dei lobi (colore rosso) è predominante rispetto a quella del nucleo (componente blu più elevata) a causa dell'ampio angolo di vista tra la sorgente e l'osservatore.

Se invece  $\alpha$  è piccolo lo spettro risulta piatto: pertanto l'angolo di vista è molto ridotto e mette in risalto l'attività nucleare, caratterizzata da uno spettro meno rosso (la sorgente è dunque "pseudo-blu").

Di seguito la tabella B mostra le misure delle densità di flusso per ciascuna sorgente e i relativi indici spettrali. A causa della costante presenza di forti interferenze in banda C, non abbiamo potuto utilizzare i dati ottenuti a tale frequenza; li abbiamo sostituiti con densità di flusso a 1,4 GHz prese da NED.

TABELLA B						
SORGENTE	D. flusso (NED) @1,4 GHz (Jy)	Densità di flusso misurata			Indice spettrale	
		@5 GHz (Jy)	@8,4 GHz (Jy)	@24 GHz (Jy)	1,4-8,4 GHz	8,4-24 GHz
3C 20	11,28+/-0,36	[6,2]	2,22+/-0,06	0,74+/-0,16	0,9+/-0,0	1,0+/-0,2
0716+714	0,73+/-0,22	/	1,78+/-0,04	3,44+/-0,23	-0,5+/-0,2	-0,6+/-0,1
0735+178	2,10+/-0,09	/	0,80+/-0,04	0,66+/-0,56	0,5+/-0,0	0,2+/-0,8
OJ 287	2,16+/-0,01	[5,9]	6,79+/-0,06	6,86+/-0,48	-0,6+/-0,0	0,0+/-0,1

#### 4.2.3. Redshift e luminosità assoluta

L'ultima parte della riduzione dati ha riguardato il calcolo della luminosità assoluta in W/Hz delle radiosorgenti, conoscendone la distanza di luminosità in metri (d) e il flusso in Jy (S) da noi rilevato.

$$L = 4\pi \cdot d^2 \cdot S$$

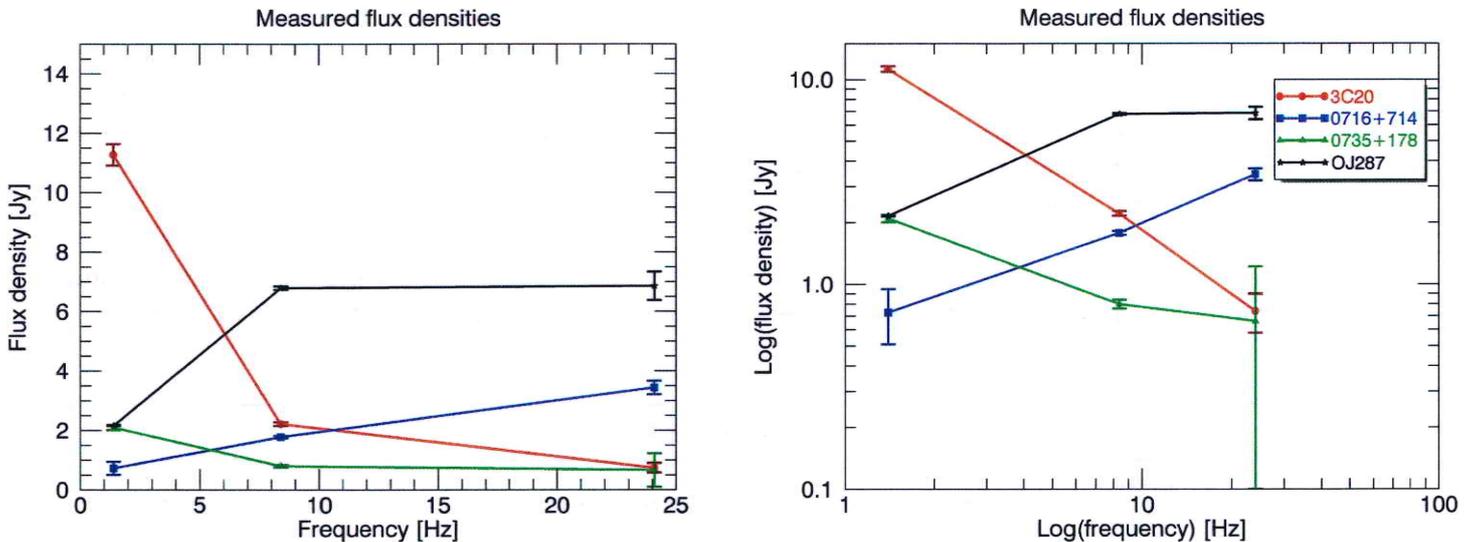
La distanza di luminosità è proporzionale al valore di redshift di ciascuna sorgente. Il redshift è un parametro che dà informazioni circa la distanza di un oggetto cosmico, ottenuto tramite l'analisi delle emissioni in riga provenienti da esso: le radiazioni elettromagnetiche emesse dalla sorgente infatti assumono via via una frequenza minore (nel caso della luce, diventano sempre più rosse).

La tabella C, oltre a riportare il redshift e la distanza di luminosità (ricavati da NED), illustra le differenti luminosità radio dei target ottenute alle frequenze di 8,4 GHz e 24,1 GHz.

TABELLA C						
SORGENTE	Redshift (NED)	Distanza di luminosità (NED) (Mpc)	Densità di flusso misurata		Luminosità radio ( $4\pi \cdot DL^2 \cdot S$ )	
			@8,4 GHz (Jy)	@24 GHz (Jy)	@8,4 GHz (W/Hz)	@24 GHz (W/Hz)
3C 20	0,173185	804	2,22	0,74	1,72E+25	5,72E+25
0716+714	0,300068	1499	1,78	3,44	4,78E+26	9,24E+26
0735+178	0,424651	2256	0,8	0,66	4,87E+26	4,01E+26
OJ 287	0,778681	4726	6,79	6,86	1,81E+28	1,83E+28

## 5. Risultati

Per visualizzare meglio l'andamento spettrale delle sorgenti e ricavarne le debite considerazioni è stato utile inserire i dati in un diagramma flusso-frequenza in scala lineare e logaritmica, prodotto in IDL (vedi Figura 10).



**Figura 10**

Come si può notare dallo spettro ripido, la sorgente più rossa è 3C20, mentre 0735+178 risulta più blu in quanto presenta uno spettro decisamente più piatto. Addirittura, 0716+714 e OJ287 nel tratto 1,4 - 8,4 GHz hanno uno spettro invertito (la seconda sorgente poi si stabilizza). La sorgente OJ287, in particolare, mostra un andamento piuttosto raro: probabilmente la radiogalassia sta entrando in uno stato di attività nucleare intensa, come sembra confermare anche l'andamento della sua brillantezza rilevato da Fermi (telescopio che osserva ad alta energia, nei raggi gamma).

## 6. Conclusioni

Nonostante gli insuccessi iniziali dovuti a condizioni atmosferiche purtroppo non favorevoli alle osservazioni, l'obiettivo dello stage è stato raggiunto in quanto i risultati da noi ottenuti, come ci hanno confermato i nostri tutor, sono in linea con il comportamento atteso per ciascuna sorgente. Non solo, abbiamo anche rilevato un dato sorprendente: la sorgente 0716+714 mostra uno spettro invertito poiché, molto probabilmente, si trova in uno stato fisico molto particolare.

Nel complesso, lo stage di SperimEstate è risultato molto utile in quanto ci ha permesso di avvicinarci ad un settore scientifico per noi di grande interesse e fascino come la radioastronomia, non solo da un punto di vista prettamente teorico, ma anche pratico-sperimentale. Abbiamo infatti avuto l'opportunità di manovrare direttamente l'antenna parabolica della Stazione Radioastronomica di Medicina, realizzando in prima persona le schedule da inviare al sistema di controllo e, con l'aiuto dei nostri tutor, analizzare i dati ottenuti facendo uso di software specifici.



