

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Fisica

Studio della connessione tra l'emissione gamma e radio nel blazar 3C 273

Relatore:
Chiar.mo Prof.
Gabriele Giovannini

Presentata da:
Davide Pedini

Correlatore:
Dott. Filippo D'Ammando

Anno Accademico 2017/2018

"Quarantadue!" urlò Loonquawl. "Questo è tutto ciò che sai dire dopo un lavoro di sette milioni e mezzo di anni?"

"Ho controllato molto approfonditamente," disse il computer, "e questa è sicuramente la risposta. Ad essere sinceri, penso che il problema sia che voi non abbiate mai saputo veramente qual è la domanda."

Indice

Introduzione	iii
1 I Nuclei Galattici Attivi	1
1.1 Modello standard degli AGN	1
1.2 Diversi tipi di AGN	3
1.2.1 AGN Radio-Quiet	3
1.2.2 AGN Radio-Loud	4
1.3 Meccanismi di Emissione	7
1.3.1 Radiazione di sincrotrone	7
1.3.2 Processo di <i>Inverse Compton</i>	8
1.4 Effetti Relativistici	9
2 Presentazione del lavoro svolto	13
2.1 Il <i>blazar</i> 3C 273	14
3 Studio dell'emissione in banda gamma	17
3.1 Fermi	18
3.1.1 Large Area Telescope	18
3.1.2 I cataloghi di AGN realizzati grazie a Fermi	22
3.2 Analisi dei Dati Fermi	23
3.2.1 I Task utilizzati nell'analisi	25
3.3 Selezione e risultati dell'analisi γ della sorgente 3C 273	28
4 Studio dell'emissione in banda radio	31
4.1 Submillimeter Array	32
4.2 Atacama Large Millimeter Array	33
5 Discussione e conclusioni	35
A Dati γ	39
B Dati Radio	43

Introduzione

Nel 1963 Maarten Schmidt si accorse che la sorgente 3C 273, di cui stava studiando le righe spettrali, non era una stella, ma un oggetto mai osservato prima, molto distante ed estremamente brillante, successivamente chiamato *blazar*. Questi oggetti sono considerati tra le sorgenti più energetiche dell'intero universo. La loro grande luminosità deriva da processi fisici di natura non termica che li porta ad avere emissione lungo tutto lo spettro elettromagnetico. Per comprendere la morfologia e i processi di emissione di queste sorgenti sono state fatte numerose osservazioni a diverse frequenze.

Questo lavoro si concentra sulle osservazioni dell'emissione in banda γ ed in banda radio del *blazar* 3C 273. Le osservazioni radio vengono fatte grazie ai radiotelescopi e ai radiointerferometri, mentre le osservazioni dell'emissione in banda γ sfruttano i telescopi in orbita. Un enorme contributo allo studio delle alte energie è stato dato dal lancio del satellite *Fermi* nel 2008, che ha portato a un notevole aumento della sensibilità dei dati ottenuti del cielo γ .

Nel presente lavoro di tesi si analizzeranno i dati γ , raccolti dal *Large Area Telescope* a bordo di *Fermi*, del *blazar* 3C 273 durante i primi 7 anni e mezzo di osservazione. Questi dati verranno poi confrontati coi dati raccolti in banda radio dell'emissione della sorgente, raccolti coi radiointerferometri SMA e ALMA, nello stesso periodo di tempo, per vedere il rapporto che lega le emissioni nelle diverse bande.

Il primo capitolo descriverà le caratteristiche degli AGN, la loro classificazione, i processi di emissione che ne contraddistinguono lo spettro e gli effetti relativistici che possono entrare in gioco nella loro osservazione.

Nel secondo capitolo verrà data una breve introduzione al lavoro svolto e verranno descritte le principali caratteristiche del *blazar* 3C 273.

Il terzo capitolo riguarda il cielo visto nei raggi γ . Verranno descritti il satellite *Fermi*, le sue componenti e i cataloghi di sorgenti redatti dalle sue osservazioni. Dopodiché si passerà alla descrizione del metodo di analisi dei dati, con relativi risultati.

Nel quarto capitolo vengono brevemente descritti i radiotelescopi, il loro funzionamento ed i radiointerferometri per raccogliere i dati radio usati nella Tesi.

Nel quinto capitolo infine verranno confrontate le curve di luce ottenute in banda radio e γ , commentando l'esito del lavoro.

Capitolo 1

I Nuclei Galattici Attivi

Nell'universo osservabile sono presenti più di 100 miliardi di galassie, di diverse forme e dimensioni, contenenti da poche decine di milioni fino a migliaia di miliardi di stelle. Di queste galassie, meno dell'1% presenta intensa attività dovuta ad un nucleo compatto e brillante, noto come Nucleo Galattico Attivo (AGN).

Queste galassie sono caratterizzate da un'elevata luminosità integrata sulle varie bande energetiche ($10^{42} - 10^{48} \text{ erg s}^{-1}$), molto maggiore di quella delle galassie ordinarie, e concentrata principalmente nel nucleo, il quale è, da solo, migliaia di volte più brillante della galassia ospite. La grandissima energia emessa dagli AGN non può provenire dalla fusione nucleare che alimenta le stelle o dai processi termici di polvere e gas interstellare, ma deriva da processi fisici di origine non termica, quali l'emissione di sincrotrone e il processo di *Inverse Compton*. Questa energia è emessa lungo tutto lo spettro elettromagnetico, ma, a differenza delle galassie normali, l'emissione delle galassie attive è molto intensa soprattutto in banda radio ed in banda X.

I nuclei galattici attivi sono considerati tra le fonti di radiazione più potenti dell'intero universo, per questo motivo sono le uniche sorgenti persistenti ancora visibili a distanze di miliardi di anni luce (ly^1). La loro osservazione permette quindi di ottenere informazioni sulle origini del nostro universo.

1.1 Modello standard degli AGN

Nonostante le varie tipologie di AGN siano molto diverse tra loro, vi sono alcune caratteristiche che li accomunano. Lo studio dei fenomeni di emissione degli AGN ha portato negli anni alla formulazione di un modello standard che approssima, quanto più possibile, la loro struttura. Lo schema della struttura di un AGN è mostrato in Figura 1.1.

Secondo questo modello, al centro della galassia attiva è presente un buco nero estremamente massiccio (SMBH), di massa compresa tra 1 milione e 10 miliardi di mas-

¹1 ly $\approx 9.461 \cdot 10^{15}$ m

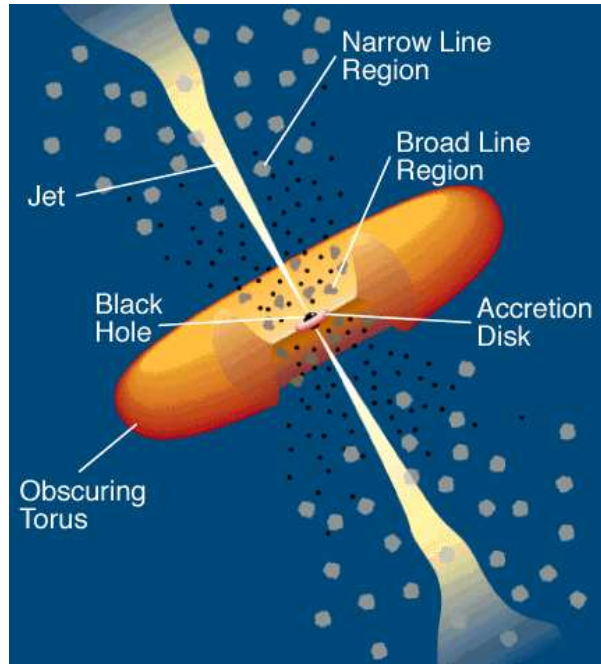


Figura 1.1: Rappresentazione della struttura di un AGN.

se solari (M_{\odot} ²); l'immensa quantità di energia gravitazionale che viene liberata dalla materia che vi cade all'interno è la fonte principale della luminosità dell'AGN.

La materia che circonda il buco nero ne viene attratta, perdendo momento angolare, a causa di processi viscosi o turbolenti. Questo porta alla formazione di un disco sottile che circonda il buco nero. L'enorme velocità delle particelle in caduta sul buco nero da origine a varie forme di instabilità fluide e magnetoidrodinamiche, con dissipazione dell'energia rotazionale accumulata nella caduta in energia termica ed emissione di radiazione.

Nello spettro di molti AGN è osservabile il cosiddetto blue bump, un'emissione di corpo nero a temperature dell'ordine di 10^5 - 10^6 K con picco nell'ultravioletto associabile ad emissione termica. Tutto il processo, chiamato accrescimento, può avere un'efficienza fino a circa il 40%, nel caso di buco nero massimamente rotante.

Allontanandosi dal SMBH si trovano le *broad-line region* (BLR), delle regioni di gas e polvere molto dense ($n \sim 10^9$ - 10^{11} particelle su cm^2) e in rapido movimento (con velocità tipiche di $5000 \text{ km} \cdot s^{-1}$), sotto l'effetto dell'attrazione gravitazionale del buco nero. Queste regioni sono formate da materiale fotoionizzato e sono caratterizzate da righe di emissione in ottico ed ultravioletto, allargate a causa dell'effetto *Doppler*.

A distanze maggiori dal nucleo ci sono le *narrow-line region* (NLR), dove nubi di gas con velocità tipiche minori (circa $1000 \text{ km} \cdot s^{-1}$) producono righe di emissione più strette.

² $1 M_{\odot} \approx 1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$

Questa regione è caratterizzata da una bassa densità ($\sim 10^4$ - 10^5 particelle su cm^2), la quale permette la formazione di righe proibite, che vengono soppresse in regioni più dense da processi collisionali.

Gli AGN presentano solitamente anche un toro di polvere che si trova a circa un parsec (pc^3) dal nucleo. Trovandosi distante dal disco di accrescimento, le velocità della materia sono ridotte e la densità di particelle molto minore. La materia si distribuisce così in una regione più ampia, formando una sorta di ciambella attorno al nucleo.

Se il buco nero ruota attorno al proprio asse, allora è in grado di accelerare il gas circostante ed espellerlo dal nucleo sotto forma di getti, collimati con l'asse di rotazione del buco nero. Le particelle che costituiscono i getti vengono espulse a velocità prossime a quelle della luce, dando origine a radiazione di sincrotrone per lo più in banda radio. Nelle sorgenti più potenti i getti arrivano ad emettere anche nelle bande ottiche e X, fino ai raggi gamma.

Secondo il *modello unificato* alla base dei differenti tipi di AGN vi è lo stesso meccanismo di emissione. Il fatto che questi oggetti appaiano diversi tra di loro dipende da alcuni fattori, come la massa del buco nero, la morfologia della galassia ospitante, l'efficienza di accrescimento e l'angolo di inclinazione rispetto al quale vengono osservati.

1.2 Diversi tipi di AGN

Si possono suddividere le galassie attive in due classi principali, confrontando l'intensità dell'emissione in banda radio e l'intensità dell'emissione in banda ottica. Gli AGN con un rapporto radio-ottico $R_{r-o} < 10$ vengono chiamati *AGN Radio-Quiet* (RQ), mentre quelli con un rapporto $R_{r-o} > 10$ sono chiamati *AGN Radio-Loud* (RL).

1.2.1 AGN Radio-Quiet

Gli AGN RQ vengono ulteriormente suddivisi in:

- Galassie *Seyfert*;
- *Radio Quiet Quasar*

Galassie *Seyfert*

Le galassie di tipo *Seyfert*(Sy), nome dovuto al loro scopritore Carl Seyfert, sono state le prime galassie ad essere identificate come AGN, poiché possiedono un nucleo compatto e luminoso ($\simeq 10^{40}$ erg/s), e rappresentano la fase attiva delle galassie a spirale.

Furono inizialmente suddivise in due categorie distinte: le *Seyfert-1* (Sy1) e le *Seyfert-2* (Sy2). Negli spettri delle Sy1 si osservavano righe permesse molto larghe, indicando

³¹ $pc \approx 3.08 \cdot 10^{15} m$

velocità tipiche dell'ordine di 10^4 km s^{-1} , e righe proibite più strette. Nelle Sy2 le righe dello spettro si presentano tutte relativamente strette, associabili a velocità minori di 10^3 km s^{-1} , quindi prodotte in regioni più esterne.

Successivamente, a seguito di molte osservazioni, fu formulato un modello unificato per le galassie *Seyfert*. Secondo tale modello non c'è differenza tra i due tipi di galassia, cambia solo l'angolo di osservazione: nelle Sy2 le BLR e quindi l'emissione ad esse associata è oscurata dal toro di polvere, lungo la nostra linea di vista, mentre l'emissione delle NLR resta visibile. Nelle Sy1 la BLR non è oscurata. Questo porta alla presenza delle sole righe strette nello spettro delle Sy2, mentre quelle larghe sono visibili solo in luce polarizzata.

Le Galassie *Seyfert* sono forti sorgenti in banda infrarossa e, alcune volte, in banda X, mentre possiedono una debole emissione radio.

Radio Quiet Quasar

Una particolare classe di AGN sono i *quasar* (quasi-stellar radio source). Questi oggetti, scoperti inizialmente come potenti sorgenti radio, presentano una controparte ottica luminosa e puntiforme, e per questo inizialmente creduti stelle. I *quasar* sono caratterizzati da uno spettro fortemente spostato verso il rosso; ciò implica una loro distanza dalla terra di miliardi di anni luce e una luminosità 1000 volte maggiore di quella delle normali galassie, dell'ordine di $10^{13} L_{\odot}$ ⁴.

La famiglia dei *quasar* si divide in due classi principali: i *Radio Quiet Quasar* (RQQ) e i *Radio Loud Quasar* (RLQ). I RQQ, chiamati così poiché hanno un'emissione radio molto debole, rappresentano la versione più luminosa delle galassie *Seyfert*. Il loro spettro è molto simile a quello delle loro controparti meno luminose e differisce soltanto per quanto riguarda le righe strette, generalmente più deboli di quelle allargate.

1.2.2 AGN Radio-Loud

Gli AGN RL vengono suddivisi in tre categorie principali:

- Radiogalassie;
- *Radio Loud Quasar*;
- *Blazar*;

Radiogalassie

Le radiogalassie sono un gruppo di AGN che presenta una forte emissione radio, circa 10 volte maggiore di quella ottica. Questi oggetti sono associati quasi sempre a galassie ellittiche giganti, di cui rappresentano la fase attiva.

⁴ $L_{\odot} \approx 3.84 \cdot 10^{33} \text{ erg/s}$

Le caratteristiche spettrali (spettro a legge di potenza) e di polarizzazione (elevato grado di polarizzazione lineare) indicano che la radiazione emessa dalle radio galassie è principalmente radiazione di sincrotrone.

Le principali componenti delle radiogalassie sono:

nucleo centrale: regione compatta e luminosa.

getti: si originano e dal nucleo e sono manifestazioni visibili di particelle ad alta energia che alimentano i lobi.

hot spot: regioni compatte e brillanti che si trovano alle estremità dei getti.

radiolobi: strutture opposte che si estendono per migliaia di anni luce simmetricamente rispetto alla galassia ottica. Dai lobi si origina la maggior parte della radiazione di una radiogalassia.

A seconda delle dimensioni, della morfologia e della potenza di emissione vengono suddivise in Fanaroff-Riley di tipo 1 e tipo 2, dal nome dei due scienziati che per primi proposero questa classificazione.

Le radiogalassie sono molto più estese rispetto alle galassie ottiche e possono raggiungere distanze dell'ordine del Megaparsec. L'emissione di queste sorgenti non dura però a lungo, esse rappresentano solo una frazione della vita della galassia stessa.

Radio Loud Quasar

I *Radio Loud Quasar*, ossia i *quasar* che emettono fortemente in banda radio, hanno un comportamento simile ai RQQ. Si differenziano da essi per la presenza di un getto, visibile in banda radio e ottica, per le righe di emissione strette e larghe e per l'emissione di raggi X, assieme a quella radio e nucleare.

Blazar

I *blazar* sono galassie attive altamente energetiche, molto variabili e luminose. Vengono associate anch'essi a galassie ellittiche giganti, sono caratterizzati da uno spettro piatto in banda radio, e da una forte emissione in banda X e gamma. La particolarità di questi oggetti è che, secondo il modello unificato, i loro getti formano un angolo di vista molto piccolo (vicino a 0 gradi). Quindi *blazar* con proprietà simili possono apparire molto diversi per piccole variazioni dell'inclinazione del getto rispetto alla linea di osservazione. A causa degli effetti relativistici prodotti dalla velocità del plasma che costituisce i getti (la quale è circa il 99% della velocità della luce) questi ci appaiono diversi l'uno dall'altro. Il getto in avvicinamento appare più luminoso e spostato verso il blu, il getto in allontanamento appare più fioco e spostato verso il rosso.

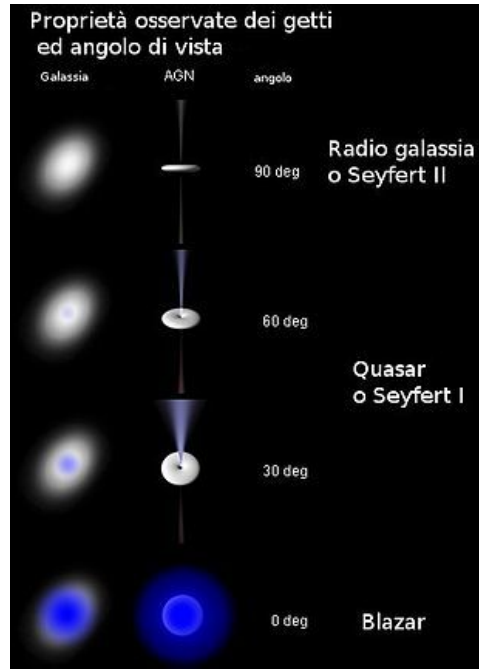


Figura 1.2: Classificazione degli AGN in base all'angolo di osservazione.

I *blazar* possono essere suddivisi in due tipi: gli oggetti di tipo *BL Lacertae* (BL Lac), contraddistinti da una quasi completa mancanza di righe di emissione nello spettro ottico ed UV, e i *Flat Spectrum Radio Quasar* (FSRQ) più luminosi, i quali appartengono ai RLQ. Questa differenza è dovuta alla diversa efficienza dell'accrescimento di materia.

Una delle caratteristiche principali e necessarie a descrivere un *blazar*, e più generalmente un AGN, è la *Spectral Energy Distribution* (SED) (Figura 1.3), definita come la densità di flusso in funzione della frequenza. La SED tipica dei *blazar* presenta due componenti: la prima componente si osserva in corrispondenza della banda radio, IR e ottica, ed è dovuta a radiazione di sincrotrone, emessa da elettroni relativistici. La seconda componente si osserva in banda X e gamma ed è provocata da fotoni a bassa energia, diffusi a frequenze maggiori (e quindi a energie maggiori) per il processo di *inverse Compton*.

In base alla frequenza in cui si presenta il picco della prima componente possiamo dividere i *blazar* in tre categorie. Se la frequenza del picco è $< 10^{14}$ Hz allora si parla di *blazar* a bassa frequenza, se è compresa tra 10^{14} Hz e 10^{15} Hz, si parla di *blazar* a frequenza intermedia, se infine la frequenza del picco è $> 10^{15}$ Hz allora si parla di un *blazar* ad alta frequenza.

Per individuare correttamente un *blazar* è quindi indispensabile riuscire a studiarne lo spettro nella sua interezza, dalla banda radio alla banda gamma.

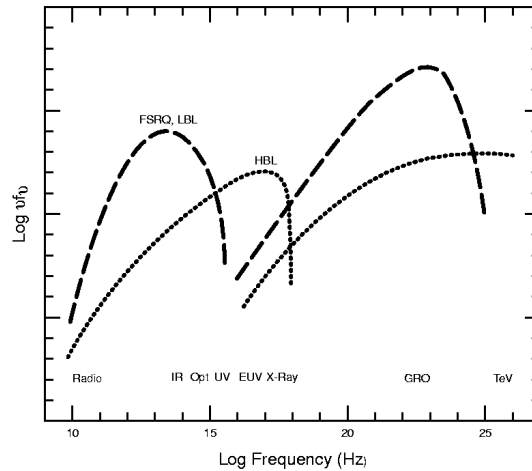


Figura 1.3: Esempio di SED dei Blazar

1.3 Meccanismi di Emissione

Alla base dell'estrema luminosità osservata da parte delle galassie attive delle galassie attive vi sono processi di emissione di varia natura, la cui conoscenza è fondamentale per lo studio e la comprensione di queste sorgenti. In particolare, i processi fisici grazie ai quali gli AGN appaiono così luminosi sono principalmente due:

- *Radiazione di sincrotrone;*
- Processo di *Inverse Compton.*

1.3.1 Radiazione di sincrotrone

La radiazione di sincrotrone è una radiazione elettromagnetica causata dall'interazione fra particelle cariche, solitamente elettroni, e campo magnetico. Questa radiazione si genera dagli elettroni che, viaggiando a velocità prossime a quelle della luce, vengono costretti da un campo magnetico a muoversi lungo una traiettoria curva attorno alle linee di forza del campo (Figura 1.4). Maggiore è la velocità delle particelle minore è la lunghezza d'onda della radiazione emessa.

A causa degli effetti relativistici la radiazione non viene emessa su tutto l'angolo solido, bensì all'interno di un cono di apertura $\alpha \propto 1/\gamma$ (γ rappresenta il fattore di Lorentz) lungo la direzione del moto.

Attraverso la formula di *Larmor* si possono esprimere le perdite di energia dell'elettrone. Allora la potenza emessa sarà:

$$P = \frac{4}{3} \sigma_T c U_B \gamma^2 \beta^2 \quad (1.1)$$

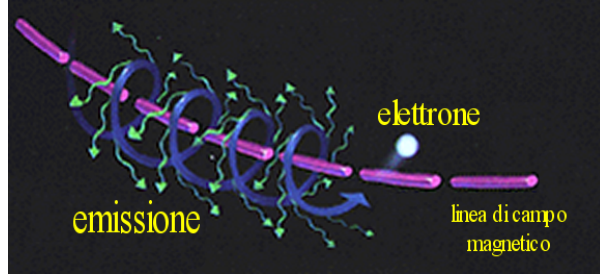


Figura 1.4: Rappresentazione del processo di emissione di sincrotrone.

dove σ_T rappresenta la sezione d'urto Thomson e U_B la densità di energia magnetica. La distribuzione di energia degli elettroni che originano la radiazione può essere rappresentata da una legge di potenza come:

$$N(\gamma) = N_0 \gamma^{-p} = N(E) \frac{dE}{d\gamma} \quad \gamma_{min} < \gamma < \gamma_{max} \quad (1.2)$$

Per ottenere l'emissività prodotta dagli elettroni bisogna integrare su γ il prodotto tra $N(\gamma)$ e la potenza di un singolo elettrone, dividendo per 4π . Il risultato ci da:

$$\varepsilon(\nu, \theta) = N_0 B^{\frac{(s+1)}{2}} \nu^{-\frac{(s-1)}{2}} \quad [erg \quad cm^{-3} s^{-1} sr^{-1}] \quad (1.3)$$

La distribuzione di energia degli elettroni produce uno spettro di emissione a legge di potenza con i due indici spettrali legati tra loro. Se indichiamo con δ l'indice spettrale della radiazione, avremo che:

$$\varepsilon(\nu) \propto \nu^{-\delta} \quad (1.4)$$

dove $\delta = (s - 1)/2$.

1.3.2 Processo di *Inverse Compton*

Quando un elettrone relativistico di altissima energia interagisce con un fotone si origina il processo di *Inverse Compton* (IC). Si ha quindi un passaggio di energia dall'elettrone al fotone che viene diffuso a frequenze maggiori, a spese dell'energia cinetica dell'elettrone. Il trasferimento di energia dall'elettrone al fotone si ha quando l'elettrone ha energia cinetica sufficientemente elevata rispetto a quella del fotone, $\gamma m_e c^2 \gg h\nu$, dove m_e è la massa a riposo dell'elettrone ($9.1 \cdot 10^{-28}$ g), c è la velocità della luce, h è la costante di Planck ($6.6 \cdot 10^{-27}$ erg · s) e γ è il fattore di Lorentz.

Si può calcolare la potenza emessa dal processo considerando una distribuzione isotropa di fotoni diffusi da una distribuzione isotropa di elettroni:

$$\frac{dE}{dt} = \sigma_T c \gamma^2 \left(1 + \frac{\beta^2}{3}\right) U_r \quad (1.5)$$

dove U_r rappresenta la densità di energia della radiazione prima dell'interazione e $\beta = v/c$ e' la velocità in termini della velocità della luce.

Per calcolare l'energia totale persa dagli elettroni bisogna quindi sottrarre l'energia che i fotoni avevano prima della diffusione pari a $\sigma_{TC}U_r$, l'energia persa risulta:

$$P_c(\gamma) = \frac{4}{3}\sigma_{TC}\gamma^2\beta^2U_r \quad (1.6)$$

Come per la radiazione di sincrotrone possiamo allora trovare l'emissività del processo, assumendo che la distribuzione di energia degli elettroni segua una legge di potenza (1.2). L'emissività sarà allora:

$$\varepsilon_c(\nu_c) = \frac{1}{4\pi}m_e c^2 P_c(\gamma) N(\gamma) d\gamma \quad (1.7)$$

dove ν_c è la frequenza di cut-off, oltre la quale non avviene più emissione. Sostituendo diventa:

$$\varepsilon_c(\nu_c) = \frac{1}{4\pi} \frac{(4/3)^\delta}{2} \sigma_{TC} N_0 \frac{U_r}{\nu_0} \left(\frac{\nu_c}{\nu_0}\right)^\delta \quad (1.8)$$

dove ν_0 rappresenta la frequenza osservata.

Lo spettro di potenza sarà sempre descritto da una legge di potenza con $\delta = (p - 1)/2$. Infine, integrando su tutte le possibili frequenze dei fotoni incidenti si ottiene:

$$\varepsilon_c(\nu_c) \propto N_0 \nu_c^{-\delta} \int \frac{U_r(\nu) \nu^\delta}{\nu} d\nu \quad [erg \quad cm^{-3} s^{-1} sr^{-1}] \quad (1.9)$$

dove $U_r(\nu)$ è la densità di energia della radiazione che descrive il campo dei fotoni diffusi. Diverse sorgenti astrofisiche presentano fenomeni spiegabili tramite il processo di sincrotrone ed IC, è quindi importante studiare questi meccanismi di emissione per la ricerca astrofisica attuale.

1.4 Effetti Relativistici

Per comprendere fino in fondo le caratteristiche degli AGN è necessario studiare gli effetti relativistici che entrano in gioco quando il moto delle sorgenti è relativistico. La comprensione di questi effetti infatti permette di interpretare correttamente le proprietà fisiche delle galassie attive. Proprio a causa degli effetti relativistici un gruppo di sorgenti fisicamente omogenee possono apparire come diverse, dalle osservazioni effettuate.

Effetto Doppler relativistico

Consideriamo un sistema formato da una sorgente di radiazione elettromagnetica in movimento con velocità $v = \beta c$ rispetto ad un osservatore. Nella trattazione relativistica

dell'effetto *Doppler* bisogna considerare la dilatazione dei tempi, dovuta al movimento. A causa di questo fenomeno il periodo T_o dei segnali ricevuti dall'osservatore è diverso dal periodo T_s della radiazione emessa, tale che:

$$T_o = T_s \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} \quad (1.10)$$

Se la sorgente si sta allontanando, e:

$$T_o = T_s \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}} \quad (1.11)$$

Se la sorgente si sta avvicinando.

Dal periodo possiamo trovare la differenza di frequenza, considerando che $\nu = 1/T$.

Più in generale se consideriamo un osservatore fermo e una sorgente che si muove lungo una direzione che forma un angolo θ con la congiungente sorgente – osservatore, la frequenza del segnale ricevuto sarà:

$$\nu_o = \nu_s \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \beta \cos \theta} \quad (1.12)$$

ponendo $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$ si ottiene:

$$\nu_o = \nu_s \frac{1}{\gamma(1 - \beta \cos \theta)} = \nu_s D \quad (1.13)$$

dove $D = \frac{1}{\gamma(1 - \beta \cos \theta)}$ è il *fattore Doppler* relativistico.

Se la sorgente si sta avvicinando, avremo che $D > 1$ quando $\beta > 0$ e quindi, $\nu_o > \nu_s$, se invece si sta allontanando avremo $\nu_o < \nu_s$.

Questo effetto è chiamato effetto *Doppler* relativistico.

Doppler boosting

Anche la luminosità bolometrica⁵ viene modificata a causa dell'effetto *Doppler*. Per riuscire a calcolare la differenza tra la luminosità osservata (L_o) e la luminosità emessa dalla sorgente (L_s) è necessario tenere conto di alcune trasformazioni relativistiche:

Trasformazione dell'energia: L'energia dei fotoni, nel sistema di riferimento dell'osservatore sarà:

$$h\nu_o = h\nu_s D \quad (1.14)$$

Che produce una variazione di L_o di un fattore D .

⁵La luminosità bolometrica viene definita come l'energia irradiata su tutto lo spettro per unità di tempo.

Trasformazione dei tempi: L'intervallo di tempo in cui l'osservatore riceve il segnale dt_o è minore dell'intervallo di tempo in cui viene emesso dt_s . In particolare:

$$dt_o = \frac{dt_s}{D} \quad (1.15)$$

Questo porta un'ulteriore modifica alla luminosità di un fattore D .

Trasformazione degli angoli: L'angolo solido entro cui l'osservatore riceve la radiazione $d\Omega_o$ è minore dell'angolo solido entro cui viene emessa $d\Omega_s$:

$$d\Omega_o = \frac{d\Omega_s}{D^2} \quad (1.16)$$

Il che porta la luminosità a variare un altro fattore D^2 .

Come effetto complessivo delle trasformazioni relativistiche si ha che la luminosità varia, secondo la legge:

$$L_o = L_s \times D^4 \quad (1.17)$$

Dalla (1.17) si capisce come piccole variazioni di D portano a un notevole incremento o a una notevole diminuzione della luminosità osservata.

Questo effetto, chiamato *Doppler boosting*, è accentuato per angoli θ molto piccoli e a velocità relativistiche della sorgente. Un esempio di questo particolare effetto è l'asimmetria apparente dei getti relativistici degli AGN. Il getto in avvicinamento appare notevolmente più luminoso del getto in allontanamento, il quale risulta difficile da individuare.

Redshift

Attraverso lo studio dello spettro di emissione dei corpi celesti si possono ricavare numerose informazioni su di essi. Lo spettro elettromagnetico di questi oggetti non è continuo, ma presenta delle righe spettrali a lunghezze d'onda ben definite. Quando, osservando queste righe, risultano spostate verso lunghezze d'onda maggiori rispetto a quelle ottenute in laboratorio, si parla di spostamento verso il rosso o *redshift*, quando sono spostate su lunghezze d'onda minori si parla di spostamento verso il blu o *blueshift* (Figura 1.5).

Lo spostamento verso il rosso (*redshift*) è quindi il fenomeno per cui la frequenza di un'onda elettromagnetica quando è osservata (ν_o) è più bassa della frequenza dell'onda quando è stata emessa (ν_e). Ciò accade quando la sorgente si muove allontanandosi dall'osservatore.

Matematicamente, lo spostamento verso il rosso è definito dalla formula:

$$\frac{\nu_e - \nu_o}{\nu_o} = z \quad (1.18)$$

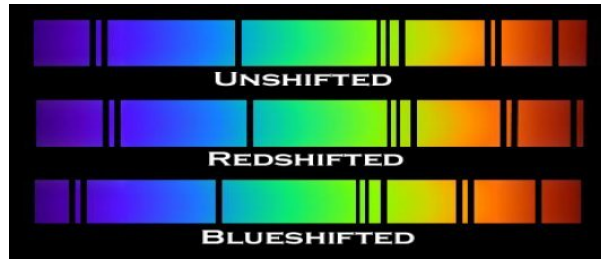


Figura 1.5: Esempio di *redshift* e di *blushift*

Dove z è un numero puro. Se la sorgente si sta allontanando si ha un *redshift* ($z > 0$), se la sorgente si sta avvicinando si ha un *blushift* ($z < 0$). La diminuzione della frequenza della radiazione corrisponde ad un incremento della sua lunghezza d'onda:

$$\frac{\lambda_o - \lambda_e}{\lambda_e} = z \quad (1.19)$$

dove λ_o rappresenta la lunghezza d'onda misurata dall'osservatore e λ_e è la lunghezza d'onda emessa dalla sorgente.

Capitolo 2

Presentazione del lavoro svolto

Dalle variazioni dei flussi emessi a varie frequenze di un AGN è possibile ottenere informazioni sulla natura della sorgente. Per prima cosa si possono capire quali meccanismi di emissione entrano in gioco, questi risultano essere principalmente radiazione di sincrotrone, e processo di *Inverse Compton*. Inoltre osservando le variazioni dei flussi si possono vedere i periodi di maggiore e minore intensità della sorgente, alle diverse frequenze. Per ognuna di esse si può poi stilare una curva di luce, ossia un grafico che mostra l'andamento della luminosità di una sorgente in funzione del tempo. Le curve di luce sono di fondamentale importanza per lo studio degli AGN, infatti, confrontando curve di luce a diverse frequenze si possono trovare delle correlazioni fra le emissioni in diverse bande spettrali di una sorgente.

Per molto tempo si è cercata una relazione tra i flussi di radiazioni a bassa energia (onde radio, infrarosso) e i flussi altamente energetici (raggi X e γ).

Comparando poi i dati di emissione in banda gamma di 599 AGN, raccolti da Fermi con segnali radio a 8.4 GHz provenienti da migliaia di AGN si è scoperto come, in queste sorgenti, esista una relazione tra il flusso di radiazione radio, a bassa energia, e quella gamma, ad alta energia. Questa connessione è data dalla presenza di un getto relativistico, tipico dei *blazar*, proveniente dal SMBH al centro delle galassie attive.

Diversi studi hanno poi rivelato come questa correlazione valga sia nel caso che la sorgente osservata appartenga alla categoria delle BL Lac, sia che appartenga alla categoria dei FSRQ. Infatti molte sorgenti γ rilevate da Fermi sono state associate a *blazar* che emettono anche in banda radio.

Questo lavoro di tesi è focalizzato sull'analisi dei dati in banda gamma collezionati dal satellite Fermi per la sorgente 3C 273 nell'arco di 7 anni e mezzo, dal 5 Agosto del 2008 al 26 Marzo del 2016.

I dati raccolti sono stati poi comparati con i dati radio raccolti da 100 GHz a 345 GHz da ALMA ed SMA nello stesso arco di tempo; tali dati radio sono riportati nelle tabelle di cui all'Appendice B.

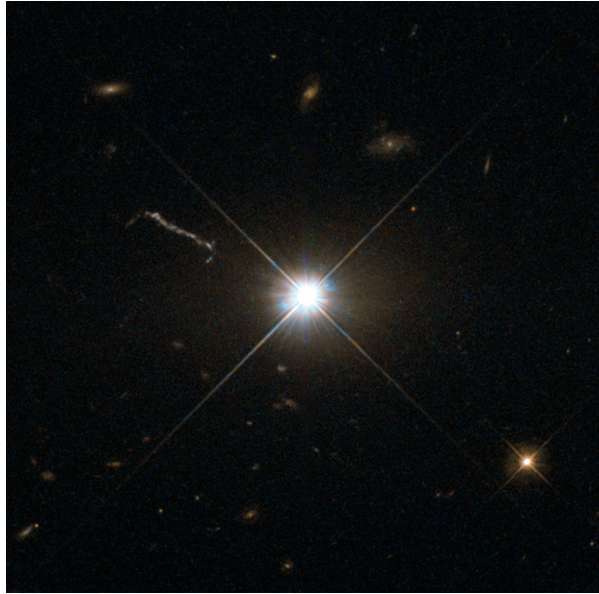


Figura 2.1: Immagine di 3C 273 in banda ottica.

2.1 Il *blazar* 3C 273

3C 273, chiamato così poiché corrisponde al 273° oggetto del *Third Cambridge Catalog of Radio Sources* (3C), è stato il primo *quasar* ad essere identificato all'inizio degli anni sessanta. Questo *quasar*, posizionato nella costellazione della Vergine, è sicuramente uno dei più famosi di questi oggetti. Si tratta infatti del *quasar* più brillante del cielo (magnitudine apparente $m \sim 12.8$, magnitudine assoluta $M \sim -26.7$) e uno dei più vicini alla terra (distanza ~ 750 Mpc). Il *quasar* risiede al centro di una galassia ellittica gigante (grandezza ~ 30 arcosecondi). Come molti altri AGN, anche 3C 273 risulta molto più luminoso della galassia che lo ospita, infatti questa galassia ha una magnitudine apparente $m = 16$.

Studiando le righe di emissione in banda ottica, nel 1963 l'astronomo tedesco Maarten Schmidt scoprì come questa sorgente si stesse allontanando ad una velocità di 44.000 km/s . Oggi, grazie alle migliori tecnologie si è stabilita una velocità di allontanamento di $\sim 48.000 \text{ km/s}$, equivalente ad un redshift di $z = 0.158$.

3C 273 possiede delle caratteristiche particolari, a differenza della maggior parte dei *quasar*, presenta dei getti brillanti, lunghi ~ 200.000 ly, visibili in banda ottica, radio e X. Dalle osservazioni fatte dal *Chandra X-Ray Observatory* si notano diverse particolarità nei getti del *quasar*. Questi getti presentano delle regioni compatte di maggiore emissione intervallate da regioni di emissione più debole, visibili in Figura 2.2.

Le particolari proprietà di questa sorgente hanno spinto gli astronomi a molte nuove osservazioni, non solo in banda radio e ottica, che hanno evidenziato come questo *quasar*

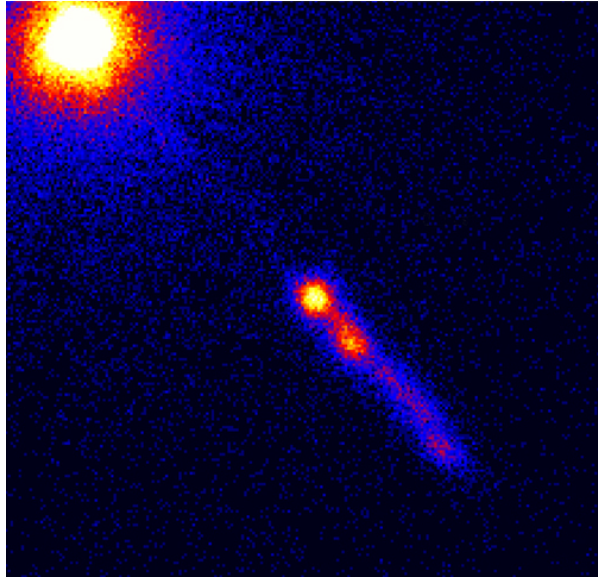


Figura 2.2: Immagine del getto di 3C 273 in banda X.

sia un'intensa sorgente in banda infrarossa, UV, X e γ . Da queste osservazioni si è scoperto come la luminosità di 3C 273 varia su brevi intervalli di tempo (molto minori di un anno). Ciò ha portato a pensare che la grande energia emessa da questa sorgente provenga da una regione relativamente piccola di spazio (< 1 ly).

Questo oggetto mostra, oltre ai getti visibili in banda ottica e radio, tutte le caratteristiche tipiche dei *quasar* ad alta luminosità: uno spettro radio piatto nel nucleo, una grande e rapida variabilità in tutti i range di energia osservati, e un'emissione di radiazione UV molto prominente, il così detto *blue bump*. Il contributo di questa componente, nelle SED, inizia a dominare il sincrotrone nella banda ottica.

Grazie alle osservazioni fatte dal telescopio a raggi X a bordo del satellite Beppo-SAX è stato stimato che la massa del SMBH al centro di 3C 273 sia $\sim 1 \cdot 10^9 M_{\odot}$. Dalla massa è stata poi stimata la sua grandezza, che è dell'ordine di $\sim 10^{12}$ m. Infine, dalla luminosità emessa, è stato possibile stimare la quantità di materia che cade all'interno del buco nero, pari a $\sim 1 M_{\odot}$ all'anno.

3C 273 venne studiato per la prima volta in banda γ da COS-B, in due periodi di quattro settimane di osservazione, nel Giugno del 1976 e nel Giugno del 1978. Fu misurato un flusso di circa $0.6 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ ph}$ e non furono osservate variazioni nell'intensità di emissione. Le successive osservazioni fatte da EGRET hanno rivelato come nel periodo tra Giugno e Ottobre del 1991 il flusso della sorgente fosse minore di quando venne misurato da COS-B. Il flusso misurato a Giugno era circa $3 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ ph}$ per energie più grandi di 100 MeV, mentre quello misurato a ottobre era anche inferiore.

3C 273 è stato inserito nei cataloghi di *Fermi* a partire dal 1LAC, il primo catalogo degli

AGN visti da Fermi nel periodo Agosto 2008 - Giugno 2009. A partire dal 5 Settembre 2008 il *Large Area Telescope* montato a bordo del satellite ha osservato un forte flusso provenire da una sorgente consistente con 3C 273, a partire dal 5 Settembre del 2008. Le prime misurazioni diedero un valore del flusso di $3 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{ph}$ per energie maggiori di 100 MeV, valore più alto di quello misurato da EGRET e COS-B. Il modo di raccogliere i dati di *Fermi* permette di monitorare costantemente l'emissione γ di 3C 273, questo ha permesso di vedere come all'inizio del 2009 il *blazar* è entrato in una fase di grande brillantezza caratterizzata da rapidi aumenti dell'emissività in tempi brevi, fino a picchi di $1 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{ph}$.

Per riuscire a descrivere in modo esaustivo la sorgente è necessario comprendere appieno le interazioni fra le sue componenti, attraverso numerose osservazioni a diverse frequenze e attraverso lo studio delle variazioni dei flussi emessi in diverse bande dello spettro elettromagnetico.

Capitolo 3

Studio dell'emissione in banda gamma

I raggi gamma (γ) rappresentano la banda più energetica dell'intero spettro elettromagnetico e l'indagine di tale radiazione può permetterci di comprendere alcuni dei processi più potenti dell'universo. Per questo motivo osservare le emissioni alle alte energie è considerato di fondamentale importanza per lo studio delle sorgenti extragalattiche.

Dato che l'atmosfera terrestre è opaca alle radiazioni al di sopra di 10 eV^1 , per poter osservare direttamente la radiazione γ bisogna utilizzare dei rivelatori, posti su dei satelliti, in orbita nello spazio.

Il primo segno di emissione γ dallo spazio è avvenuta nel 1965 grazie al telescopio *Explorer XI*. Da allora sono iniziate numerose missioni volte a studiare in modo sempre più approfondito il cielo γ , attraverso tempi di osservazione sempre più lunghi e strumenti più sofisticati. Il lancio del satellite COS-B, il 9 agosto 1975, da parte dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) ha portato, dopo 6 anni di osservazione, al primo catalogo di sorgenti γ , tra cui la prima sorgente extragalattica rivelata, il *quasar* 3C 273. Successivamente, nel 1991, è stato lanciato il satellite *Compton Gamma Ray Observatory* (CGRO) che ha portato in orbita il telescopio EGRET. Grazie a questo strumento, che ha operato ad energie tra i 20 MeV e i 30 GeV garantendo una buona risoluzione angolare, è stata realizzata la prima *survey* del cielo γ in un range che va dai 30 MeV ai 10 GeV. EGRET è rimasto in orbita fino al 2000, rivelando l'esistenza di un centinaio di nuove sorgenti γ puntiformi, alcune delle quali non ancora identificate, e mostrando un cielo in banda γ ricco e dinamico.

Una delle ultime missioni è stata organizzata nel 2007 dall'Italia, che ha lanciato in orbita il telescopio *Astro-rivelatore Gamma a Immagini Leggero* (AGILE).

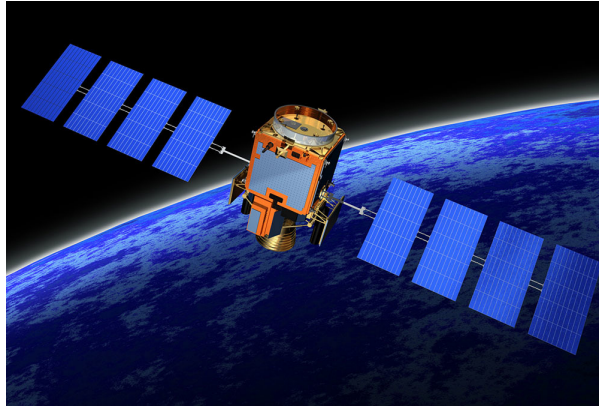


Figura 3.1: Rappresentazione del satellite Fermi.

3.1 Fermi

Il maggior contributo dato allo studio delle alte energie è derivato dal lancio del *Fermi Gamma-ray Space Telescope (Fermi)* (Figura 3.1) l'11 giugno del 2008, grazie alla collaborazione delle agenzie spaziali di Stati Uniti, Italia, Francia, Giappone e Svezia. Questo satellite, dotato di tecnologie all'avanguardia, è ora in orbita attorno alla terra, alla distanza di ~ 565 km, inclinato di 25.6° rispetto all'equatore. *Fermi* riesce a osservare una grande porzione di cielo, circa il 20%, ogni 2 orbite attorno alla terra (~ 6 ore), e garantisce una sensibilità molto maggiore rispetto ai telescopi precedenti, permettendo uno studio delle emissioni γ molto più approfondito.

La sua strumentazione comprende: il *Gamma-ray Burst Monitoring (GBM)*, un rivelatore di lampi gamma, dedicato allo studio dei fenomeni transienti in un intervallo di energia fra gli 8 keV e i 40 MeV, e il *Large Area Telescope (LAT)*.

3.1.1 Large Area Telescope

Il LAT, è un telescopio montato a bordo di *Fermi* che può captare radiazione in un range di energie comprese tra i 20 MeV e fino a circa 1 TeV. Dovendo acquisire molti dati in poco tempo questo telescopio è caratterizzato da un tempo morto molto breve, ossia il tempo che impiega lo strumento dopo una misurazione ad essere pronto ad effettuarne un'altra, una buona risoluzione energetica (10%) e un'ampia area di raccolta di circa 8000 cm^2 a 1 GeV che gli permette di avere un'elevata sensibilità.

Il LAT, come i telescopi lanciati prima di lui, è un telescopio a conversione di coppia; ciò significa che sfrutta il principio della produzione di coppia $e^+ - e^-$ per rilevare i raggi γ altamente energetici. Questo processo si verifica quando la radiazione con energia superiore a 30 MeV interagisce con la materia. In tale situazione si ha che un fotone

¹1 eV = $1,602 \cdot 10^{-19}$ J

fortemente energetico ($E > 2m_e c^2$) interagisce in maniera anelastica con un nucleo atomico, portando alla creazione di una coppia particella-antiparticella, ognuna delle quali possiede metà dell'energia del fotone.

La struttura del LAT è costituita da 16 torri identiche, quattro per lato, con un'area di 40 cm^2 e un'altezza di 40 cm. Ognuna di esse è formata da un tracciatore a strisce di silicio e fogli di tungsteno ad alta risoluzione, da un calorimetro a base di cristalli di cesio e da un sistema di controllo dati (TEM). All'esterno delle torri è presente uno schermo anti-coincidenza (ACD) formato da 89 piastrelle di scintillatore plastico, sensibile alle particelle cariche. L'ACD compie una prima selezione delle particelle incidenti, essendo in grado di rilevare solo i raggi cosmici. La struttura principale è rappresentata da 16 celle di alluminio, mentre alla base dello strumento si trova il sistema di acquisizione e trigger (DAQ).

Qualsiasi fotone incidente passa inizialmente attraverso lo schermo e successivamente attraverso il tracciatore, che essendo composto da materiale pesante (il tungsteno ha un alto numero atomico) permette di convertire il fotone nella coppia $e^+ - e^-$ (Figura 3.2). Il percorso della coppia elettrone-positrone viene rivelato dalla parte sensibile del tracciatore, formata da 18 piani perpendicolari costituiti dalle sottili strisce di silicio; infine la loro energia è misurata dal calorimetro negli ultimi due piani della torre, privi di fogli di tungsteno.

I calorimetri posti in ogni torre sono formati da 8 piani, ognuno costituito da 12 barre di ioduro di cesio perpendicolari l'una all'altra e da una coppia di fotodiodi. Sono fondamentali perché in grado di individuare con molta precisione tra i fotoni che attraversano i macchinari quelli ad alta energia che formano le coppie $e^+ - e^-$, distinguendoli da quelli provenienti da altri raggi cosmici, che vengono scartati. Le informazioni provenienti dal calorimetro e dal tracciatore sono utilizzate per determinare la traiettoria delle tracce all'interno del LAT e da queste risalire alla sorgente del raggio γ incidente.

Nonostante l'ottima strumentazione di cui è fornito *Fermi* si va incontro a numerosi problemi nel cercare di rilevare e localizzare le varie sorgenti γ . Oltre alla difficoltà di distinguere i raggi gamma che formeranno le coppie $e^+ - e^-$ dagli altri raggi cosmici vi è un'ulteriore difficoltà nel cercare di isolare le sorgenti dal rumore di fondo. Inoltre, il metodo di tracciamento elettrone-positrone per risalire alle sorgenti comporta una grande incertezza nell'individuare la loro posizione corretta. Questa incertezza può arrivare a ~ 10 arcominuti o maggiore, il che rende difficile capire quale sorgente all'interno di questa regione emetta radiazione γ .

Ricostruzione degli eventi nel LAT

Il processo di ricostruzione degli eventi elabora i dati provenienti dai rivelatori del satellite per ricostruire le caratteristiche dell'evento (energia e tracce) producendo per ogni evento una serie di dati, utilizzata poi nella successiva analisi.

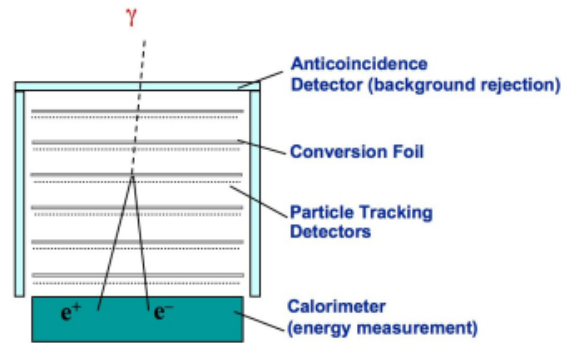


Figura 3.2: Fotone incidente e produzione di coppia elettrone e positrone.

La procedura di ricostruzione delle tracce utilizza le informazioni provenienti dal calorimetro e dal tracciatore per ricostruire le tracce prodotte dall'evento all'interno del LAT. Viene calcolata l'energia depositata in ogni cristallo e il punto lungo il cristallo in cui è avvenuto il massimo deposito di energia. Sommando l'energia depositata in tutti i cristalli si ottiene quindi l'energia depositata nel calorimetro.

Le strisce di silicio colpite all'interno del tracciatore vengono riunite in *cluster*² composti da strisce adiacenti. Tramite il calcolo dei momenti della distribuzione energetica all'interno del calorimetro si calcola il centroide³ della distribuzione e il suo asse.

La ricerca delle possibili tracce avviene tramite due procedure diverse a seconda della presenza o no di un deposito significativo di energia nel calorimetro:

- Nel caso di deposito di energia nel calorimetro si assume che il centroide della distribuzione di energia nel calorimetro sia sulla traccia e si vanno quindi a congiungere con il centroide tutti i *cluster* del piano più distante dal calorimetro. Se vicino alla linea congiungente il centroide della distribuzione al potenziale primo hit si trova almeno un altro cluster allora si genera una traccia ipotetica. Questa traccia viene poi popolata associandole i cluster appartenenti ai piani successivi a quello del primo hit. Ad ogni traccia si associa un fattore di qualità che tiene conto: del numero di hit, degli eventuali piani privi di hits e del test del χ^2 .

Una volta generate, le tracce ipotetiche vengono analizzate per determinare la miglior stima della traiettoria e delle caratteristiche della particella che le ha generate, utilizzando un'implementazione del filtro di Kalman⁴. Alla fine del processo vengono elaborate solo le tracce con sufficiente fattore di qualità.

²Il *cluster*, in statistica, rappresenta un gruppo di elementi omogenei in un insieme di dati.

³Il centroide consiste nel punto rappresentativo del cluster.

⁴Il filtro di Kalman è una procedura iterativa lineare che genera un'ottima stima della traiettoria della particella tenendo conto dello scattering multiplo e della risoluzione del rivelatore.

- Nel caso in cui la deposizione di energia all'interno del calorimetro sia nulla o estremamente ridotta, e quindi non sufficiente a cercare la traccia ipotetica, si assume un'energia iniziale $E = 30$ MeV. Si va quindi a congiungere tutti i possibili *cluster* del primo piano di rivelatori con tutti gli hit del secondo piano: se lungo la direzione così ottenuta viene trovato un terzo hit, viene generata una traccia ipotetica. Una volta generata la traccia si procede come nel primo caso.

La ricostruzione dell'energia di un evento si svolge in più fasi ed è connessa al processo di ricostruzione della traccia. Per prima cosa si calcola l'energia depositata in ogni cristallo e la posizione all'interno del cristallo del deposito di energia. Grazie alle energie e alle posizioni si determina il centroide e l'asse della distribuzione di energia. I dati così ottenuti vengono quindi utilizzati in prima analisi per determinare la traccia migliore. Le informazioni ottenute del tracciatore vengono a questo punto utilizzate per migliorare la ricostruzione dell'energia dell'evento, tenendo conto di due effetti che causano errori nella ricostruzione: la perdita di energia dal fondo del calorimetro e il deposito di energia nel tracciatore.

Instrument Response Function

I rilevamenti fatti da *Fermi* non dipendono solamente dall'hardware del LAT ma anche dal processo che calcola i parametri degli eventi osservati e assegna la probabilità che un evento sia un fotone.

Per questo motivo sono importanti le *Instrument Response Function* (IRF), delle funzioni che permettono di descrivere il rapporto tra il flusso di fotoni incidenti e gli eventi rilevati dal LAT. La conoscenza delle IRF permette di stimare la risposta del rivelatore per una sorgente con flusso noto.

Matematicamente le IRF sono espresse come prodotto di tre funzioni:

$$R(E', \varphi'; E, \varphi) = A_{eff}(E, \varphi) P_{PSF}(\varphi'; E, \varphi) D_e(E'; E) \quad (3.1)$$

dove E e φ rappresentano l'energia e l'angolo di inclinazione dei fotoni incidenti, E' e φ' rappresentano l'energia e l'angolo di inclinazione degli eventi misurati.

Le tre funzioni che definiscono l'IRF sono:

Area efficace: è la funzione che tiene conto dell'efficienza di rivelazione;

Dispersione energetica: è la funzione che esprime la densità di probabilità di ricostruire l'energia di un fotone incidente;

Point Spread Function (PSF) è la funzione che esprime la densità di probabilità di ricostruire l'angolo di inclinazione di un fotone incidente.

Le IRF sono determinate grazie a delle simulazioni di Monte Carlo basate sulle risposte del LAT a un fotone incidente di energia E e angolo φ .

3.1.2 I cataloghi di AGN realizzati grazie a Fermi

Uno degli obiettivi principali del satellite *Fermi* è quello di indagare sulle emissioni alle alte energie degli AGN e quindi di localizzare le varie sorgenti gamma presenti nel cielo. Il risultato del lavoro di *Fermi* sono i cataloghi contenenti le sorgenti γ rilevate dal LAT nel corso di vari anni di osservazione.

Nei primi due anni della missione Fermi sono stati redatti 3 cataloghi di sorgenti γ : il *LAT Bright Source List* (BSL), il *first Fermi-LAT catalog* (1FGL), e il *second Fermi-LAT catalog* (2FGL).

BSL Il catalogo BSL è basato sui primi 3 mesi di osservazioni, i quali hanno rivelato 132 sorgenti brillanti con significatività $\geq 10\sigma$ in un intervallo di energia tra 200 MeV e 100 GeV. Tra le sorgenti γ , 106 sono state associate con un alto livello di confidenza con AGN noti. Da questo catalogo è poi stato redatto il *LAT Bright AGN Sample* (LBAS) che rappresenta l'insieme degli AGN brillanti scoperti dal LAT in questo lasso di tempo.

1FGL Questo catalogo è stato redatto in base alle osservazioni compiute da Fermi durante un periodo di 11 mesi. Comprende 1451 sorgenti γ rivelate con significatività $\geq 4\sigma$ in un intervallo di energia tra 100 MeV e 100 GeV. Di queste sorgenti 671 sono state associate a 709 AGN e formano il *First LAT AGN catalogue* (1LAC).

2FGL Il *Fermi LAT Second Source Catalog* (2FGL) nasce come un catalogo di sorgenti puntiformi osservate dal LAT nei suoi primi due anni di attività. Contiene 1873 sorgenti γ osservate in un range di energia compreso tra 100 MeV e 100 GeV, di queste 1170 sono state associate a sorgenti conosciute ad altre lunghezze d'onda. Sulla base delle stesse osservazioni è stato redatto anche il *Second LAT AGN catalogue* (2LAC) che comprende 1017 AGN rivelati con significatività $\geq 4\sigma$.

3FGL e 3LAC

Il catalogo più importante e attualmente più aggiornato di tutte le sorgenti γ scoperte da Fermi è il *Third Fermi LAT source catalog* (3FGL), il quale si basa sulle osservazioni compiute dal telescopio in quasi 4 anni di attività, dal 5 Agosto 2008 al 31 Luglio 2012. Rispetto ai cataloghi precedenti il 3FGL risulta più preciso grazie ad un miglioramento nell'analisi e nella correzione dei dati che permette di risalire più precisamente alla posizione della sorgente.

Il catalogo comprende 3033 sorgenti rivelate con una significatività $> 4\sigma$ in un intervallo di energia tra i 100 MeV e i 300 GeV. Di queste sorgenti quelle identificate con assoluta certezza sono 232. La classe dominante è quella dei pulsar, che contribuiscono con 137 oggetti, seguiti da 38 Flat Spectrum radio quasar e 18 BL Lac. Più di 1100 sorgenti hanno

una possibile controparte a basse energia associabile con un *blazar*, mentre rimangono 992 sorgenti per la quali non si è trovata alcuna associazione plausibile.

Il catalogo *third LAT AGN catalogue* (3LAC) si basa su 3FGL, ed è il catalogo degli AGN più aggiornato attualmente. Contiene 1591 AGN, il 71% in più rispetto a 2LAC, ad una latitudine galattica maggiore ($|b| < 10^\circ$). Il 98% di queste sorgenti sono state identificate come Blazar.

3.2 Analisi dei Dati Fermi

Per analizzare i dati raccolti dal LAT è stato utilizzato il software *Fermi Science Tools* che mette a disposizione gli strumenti base, necessari all'analisi.

Prima di estrarre i files bisogna dare alcune informazioni, ossia la direzione del puntamento del LAT e l'efficienza di osservazione dello strumento.

I files estratti sono di due tipi:

- LAT *events files* (FT1), si divide in: *photon* ed *extended files*, e contiene tutte le informazioni sui fotoni raccolti dal LAT.
- *spacecraft file* (FT2), contiene informazioni sull'orientamento e la posizione dello strumento, e sulla modalità di osservazione del satellite.

I dati raccolti nel file di eventi sono elaborati dal LAT in modo da identificare il tipo di evento e caratterizzarne i parametri fisici, quali direzione ed energia.

Successivamente viene determinata la qualità di tutti gli eventi, separandoli in diverse classi, selezionate secondo specifici parametri. Ognuna di queste classi è caratterizzata da un set di IRF.

Queste classi sono:

- La *Transient class*, che corrisponde alla classe con minor probabilità di selezionare un fotone astrofisico, poiché segue il criterio di selezione meno restrittivo, possiede un'area efficace di IRF più larga e una maggiore contaminazione di particelle di fondo.
- La *Source class*, che corrisponde a un criterio di selezione intermedio, l'area efficace è minore rispetto alla *Transient class* ma il livello di contaminazione è ancora alto.
- La *Clean class*, che è stata sviluppata per studiare la radiazione di fondo γ extragalattica, infatti soddisfa un livello di selezione molto restrittivo.
- La *Ultraclean class* che rappresenta la classe con maggior probabilità di selezionare un fotone astrofisico, caratterizzata da una PSF più stretta e una minor contaminazione di particelle di fondo.

Inoltre, una seconda serie di parametri qualitativi consentono di affinare la selezione dei dati in base a delle caratteristiche specifiche. Questi parametri dividono ulteriormente i set di dati in sottoinsiemi basati sul livello di conversione, sulla qualità della ricostruzione della posizione e sulla qualità della ricostruzione dell'energia.

Gli eventi possono essere selezionati in una specifica regione di cielo, in un particolare intervallo di energia e in una determinata finestra temporale. Altri criteri di selezione sono necessari per ridurre la contaminazione data dalla radiazione γ proveniente dai raggi cosmici e da sorgenti diverse da quella desiderata.

Likelihood analysis

Per analizzare i dati del LAT, e quindi per rilevare una sorgente, determinare il flusso e fare un modello delle sorgenti γ è necessario utilizzare una tecnica detta *Likelihood analysis*, basata sulla statistica di Poisson. La *Likelihood* L è la probabilità di ottenere dei dati a partire da un modello, nel caso dei dati di Fermi il modello utilizzato sarà la distribuzione di sorgenti γ nel cielo. Dato che il modello migliore ha la più alta probabilità di apparire nei dati si variano i parametri spettrali fino a massimizzare L .

I set di dati di LAT possono essere divisi in un gran numero di *bins*. Ogni *bin* contiene quindi un numero limitato di conteggi. L rappresenta il prodotto di probabilità di osservare i conteggi in ogni *bin*, definito come:

$$L = \prod_k \frac{m_k^{n_k} e^{-m_k}}{n_k!} \quad (3.2)$$

dove m_k è il numero di conteggi predetti dal modello e n_k rappresenta i conteggi osservati. Inserendo nella formula il numero totale di conteggi predetti dal modello $N_{exp} = \sum_k m_k$ diventa:

$$L = e^{-N_{exp}} \prod_k \frac{m_k^{n_k}}{n_k!} \quad (3.3)$$

Quest'equazione è la base per il *binned likelihood*, il metodo per analisi su intervalli temporali molto lunghi.

La *unbinned likelihood* si utilizza invece quando la dimensione del *bin* è infinitesimale, e si analizzano i dati su un breve periodo di tempo.

In questo caso la L diventa:

$$L = e^{-N_{exp}} \prod_k m_k \quad (3.4)$$

Quando L è massimizzata lo è anche il *Test Statistic* (TS), che rappresenta la significatività di ogni sorgente, ed è definito come:

$$TS = -2 \ln \left(\frac{L_{max,0}}{L_{max,1}} \right) \quad (3.5)$$

dove $L_{max,0}$ rappresenta il massimo valore di L per il modello senza sorgente, mentre $L_{max,1}$ rappresenta il massimo valore di L per il modello con la sorgente localizzata in una determinata posizione.

Per avere la maggior accuratezza possibile nell'analisi dello spettro di una sorgente si dovrebbero includere le sorgenti di tutto il cielo osservabile. Dato che questo non è sempre possibile si preferisce includere sorgenti prese da una grande regione di cielo e conteggi da una regione più piccola (ROI). Lo spettro e le posizioni fuori dalla ROI vengono solitamente prese prima da un catalogo.

Per riuscire a massimizzare L è necessario adattare il modello alla *likelihood* variandone i parametri fino a trovare i migliori.

3.2.1 I Task utilizzati nell'analisi

Passiamo ora a descrivere i vari strumenti forniti dal software *Fermi Science Tools* per eseguire un'analisi dei dati LAC.

gtselect

Innanzitutto i dati vanno selezionati in base al tipo di analisi che si vuole eseguire. Dopodiché il tool *gtselect* applica i primi tagli di selezione sui dati, che vengono fatti sul file di eventi FT1. Le selezioni più comuni riguardano l'intervallo di tempo considerato (espresso in MET⁵), l'intervallo di energia, la posizione della sorgente, espressa in funzione dell'ascensione retta (RA) e della declinazione (Dec), la regione di interesse attorno alla sorgente, l'angolo di zenith e il tipo di classe dell'evento.

La scelta dell'angolo di zenith serve a ridurre la radiazione di fondo γ proveniente dalla terra, il massimo angolo possibile è di 100°.

gtmktime

Dopo aver selezionato i dati è necessario selezionare degli intervalli di tempo, in cui il satellite lavorava in condizioni di presa dati standard, e la qualità dei dati raccolti è buona. Per fare questa selezione si usa il tool *gtmktime* che seleziona i set di *Good Time Intervals* GTI usando le informazioni contenute nello *spacecraft file*. In questo modo vengono esclusi i periodi di tempo in cui la qualità dei dati raccolti non è ottimale, a causa dell'orientamento e della posizione dello strumento.

L'espressione di filtro usata dal tool *gtmktime* è:

$$(DATA_QUAL > 0)\&\&(LAT_CONFIG == 1)$$

⁵il software utilizza il *mission elapse time* (MET) come tempo di riferimento, ossia i secondi passati dalla mezzanotte nel 1° gennaio 2001

Dove DATA_QUAL è un parametro che esprime la qualità dei dati e LAT_CONFIG è un parametro che tiene conto della configurazione dello strumento.

gtbin

Il *tool gtbin* ha tre principali funzioni a seconda del compito per cui è usato:

- può trattare lo spettro, discretizzando gli eventi in un singolo spettro o in una serie di spettri sequenziati in funzione del tempo.
- può trattare le energie, in base al tipo di algoritmo scelto si può avere o una discretizzazione lineare o una logaritmica.
- può generare curve di luce dai file di eventi.

Inoltre serve a creare una mappa di conteggi della ROI, sommata su tutte le energie dei fotoni. La mappa può essere sia in 2-D, se si usa l'opzione CMAP, che in 3-D, se si usa l'opzione CCUBE.

gtlcube

Il *tool gtlcube* serve a calcolare il *livetime*, ossia il tempo in cui il satellite si è soffermato sulla regione di cielo interessata. Il calcolo è fatto in funzione della posizione nel cielo e dell'angolo di *off-axis*, l'angolo di inclinazione tra la direzione della sorgente e la normale allo strumento.

gtexpcube2

Il *tool gtexpcube2* permette di generare una mappa di esposizione, che grazie al *livetime* stimato con *gtlcube* calcola l'esposizione per ogni posizione del cielo

gtsrcmaps

Il *tool gtsrcmaps* convolve le componenti del modello della sorgente con la IRF dello strumento per una data osservazione. Per questo necessita di due file di dati in input, una mappa dei conteggi, creata con *gtbin*, una mappa di esposizione, creata con *gtexpcube2*.

gtlike

Per l'esecuzione del *tool gtlike* è necessario scegliere tra diversi algoritmi, chiamati ottimizzatori, necessari a massimizzare la *likelihood*. Questi algoritmi determinano i parametri spettrali di *best fit* ma non i parametri spaziali.

Gli ottimizzatori sono 5, tra questi i più utilizzati sono:

DRMNFB è efficiente nel ricercare il massimo della funzione ma fornisce delle incertezze sui parametri non affidabili.

MINUIT determina accuratamente i parametri fornendo anche delle accurate incertezze.

Questi due ottimizzatori vengono spesso usati insieme.

Una volta completato, il *gtlike* genera 2 tipi di file in output: *results.dat* che rappresenta il risultato del fit, e *count_spectra.fits* che rappresenta il numero di conteggi previsto per ogni sorgente e per ogni bin energetico. Per comprendere questi file bisogna conoscere i parametri usati nel modello della sorgente.

Questi parametri sono: *Prefactor*, che viene moltiplicato col parametro *Scale* per ottenere il flusso in unità di 10^{-8} ph $cm^{-2}s^{-1}$. *Index*, che rappresenta l'indice spettrale, modellato su tutto l'intervallo di energia. *Npred*, che esprime il numero di fotoni predetto in base al modello dato. *ROI distance*, che indica la separazione angolare tra il centro della ROI e la sorgente in esame. *TS value* che indica la significatività di una sorgente.

Il tool *gtlike* deve leggere il modello della sorgente da un file XML (*eXtensible Markup Language*). Le sorgenti presenti nella *Source Region* vanno scelti dai cataloghi di *Fermi*. In base al tipo di analisi da eseguire si può scegliere il modello della sorgente.

Si possono scegliere 4 modelli spaziali:

- SkyDirFunction per le sorgenti puntiformi.
- ConstantValue per le sorgenti diffuse con flusso costante.
- SpatialMap per le sorgenti diffuse variabili spazialmente.
- MapCubeFunction per mappare l'emissione diffusa.

I modelli spettrali sono rappresentati o da una legge di potenza:

$$\frac{dN}{dE} = N_0 \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-\Gamma} \quad (3.6)$$

dove $\frac{dN}{dE}$ rappresenta il flusso, N_0 rappresenta il fattore di normalizzazione, Γ rappresenta l'indice spettrale ed E_0 rappresenta l'energia di riferimento. Oppure da una log-parabola:

$$\frac{dN}{dE} = N_0 \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-[\alpha_g + \beta \ln \frac{E}{E_0}]} \quad (3.7)$$

dove α_g rappresenta l'indice spettrale e β il parametro di curvatura. Per creare correttamente il modello è necessario considerare anche *background* proveniente sia dall'emissione galattica sia dal diffuso extragalattico.

3.3 Selezione e risultati dell'analisi γ della sorgente 3C 273

La prima parte del lavoro è stata eseguire l'analisi spettrale del *blazar* 3C 273, utilizzando il software *Fermi Science Tools*.

I dati γ utilizzati per l'analisi sono stati raccolti durante i primi 7 anni e mezzo di missione *Fermi*, in un periodo che va dal 5 Agosto 2008 al 26 marzo 2016 (tempo in MET: 239587201; 483321604).

Di seguito vengono descritti i passaggi e i parametri utilizzati per la *likelihood analysis*. Innanzitutto si sono inseriti i dati della sorgente per applicare il *tool gtselect*.

Questi dati sono: l'ascensione retta e la Declinazione, espresse in gradi (187.278; 2.05241), lo *zenith angle*, scelto pari a 90° in modo da ridurre il background dato dalla terra, il raggio attorno alla sorgente entro cui considerare altre sorgenti di emissione γ , scelto di 30° e il range di energia, scelto tra i 100 MeV e i 300 GeV.

Successivamente si è usato il comando *gtmktime* per selezionare gli intervalli di tempo in cui *Fermi* ha operato in condizioni standard corrispondente a una buona qualità dei dati. Il parametro DATA_QUAL è posto > 0 e il parametro LAT_CONFIG= 1.

Dopodiché si è applicato il *gtbin* per vedere la mappa binnata dei conteggi della regione interessata, prima usando l'opzione CMAP e poi CCUBE, così da avere anche una mappa 3D dei conteggi per l'analisi dati. Si è posto il numero di *energy bins* uguale a 30.

A questo punto si sono inseriti il modello di emissione diffusa della galassia (gll_iem_v06.fits) e il corrispondente modello isotropico per l'analisi di sorgenti puntiformi (iso_SOURCE_v06.txt).

Il catalogo 3FGL è stato usato per creare un modello della sorgente, utilizzando il *tool make3FGLxml.py*, il quale crea il file xml poi letto da *gtlike*. Per creare il file vengono inseriti i parametri relativi a significatività (-s 5) e ROI (-r 10) ossia il raggio centrato sulle coordinate della nostra sorgente al di fuori del quale si considerano fissati i parametri delle sorgenti.

Il passo successivo è stato usare *gtlcube* per calcolare il *livetime*, ponendo $zmax = 90$, $step\ size = 0.025$ e $Pixelsize = 1$.

Dopodiché si è applicato il *livetime* appena calcolato alla parte di cielo da indagare grazie a *gtexpcube2*. Nella mappa generata bisogna aggiungere 10 gradi al ROI, per tener conto dell'esposizione fuori dalla regione scelta che può influire sulle sorgenti ai bordi del ROI determinato.

E' stato quindi creato un modello delle mappe dei conteggi grazie a *gtsrcmaps* che può essere usato per la *binned likelihood*.

Dopodiché è stato lanciato *gtlike*, utilizzando l'ottimizzatore MINUIT e ponendo $chat-ter=3$ per vedere su schermo tutti i vari passaggi della procedura.

Dall'analisi fatta si ottiene un file contenente tutte le sorgenti rilevate nel periodo di tempo richiesto. Per ogni sorgente vengono riportati i valori del Flusso, in unità di

$cm^{-2}s^{-1}ph$, del TS, e dell'indice spettrale per le sorgenti entro 10° . Infine il modello ottenuto è stato scritto in formato xml.

Il modello spettrale di 3C273, visibile nel file delle sorgenti è una log-parabola, definita come:

$$N(E) \propto e^{-(\alpha + \beta \ln \frac{E}{E_0})} \quad (3.8)$$

dove α rappresenta l'indice spettrale e β rappresenta la curvatura dello spettro.

La prima analisi della sorgente è stata fatta considerando i dati raccolti dal LAT sugli interi 7 anni e mezzo di osservazione. In questo modo è possibile sapere il flusso medio di emissione γ e l'indice spettrale della sorgente sull'intero periodo. Durante questa prima analisi sono stati fissati gli indici spettrali delle sorgenti comprese fra 10° e 30° , a cui sono stati assegnati i valori riportati nel catalogo 3FGL, mentre sono state lasciate liberi di variare quelli all'interno della ROI.

Dal modello delle sorgenti, prodotto dall'analisi sui 7 anni e mezzo sono poi state rimosse tutte le sorgenti con $TS < 25$, poiché troppo poco significative, e ripetuta l'analisi con *gtlike*.

Dall'analisi sull'intero periodo di tempo è stato trovato un valore degli indici spettrali di ($\alpha = 2.6114 \pm 0.0007$ $\beta = 0.0984 \pm 0.0004$) ed un valore del flusso medio pari a $(35.3331 \pm 0.0214) \cdot 10^{-8} ph \cdot cm^{-2}s^{-1}$ con significatività di $TS = 35591$.

La parte successiva del lavoro è stata quindi analizzare i dati raccolti dal LAT mese per mese, utilizzando il modello delle sorgenti calcolato sui 7 anni e mezzo. Per prima cosa sono stati fissati gli indici spettrali di 3C 273 e delle sorgenti entro 10° da 3C 273, dopodiché si è iniziata l'analisi di ogni mese. Per ognuno di essi è stato segnato il valore del flusso e del TS della sorgente. Nei casi in cui il valore del TS è risultato < 10 sono stati calcolati gli *upper limit*. Infine i dati raccolti sono stati utilizzati per produrre la curva di luce sui 7 anni e mezzo con bin temporale di un mese, utilizzando l'indice spettrale della sorgente calcolato su tutto il periodo. La curva di luce creata grazie ai dati analizzati sui 7 anni e mezzo di osservazione di *Fermi* è visibile in Figura 3.3.

Il minimo valore di flusso registrato corrisponde ad un valore di $TS = 4.30$. Per questo caso è stato quindi calcolato l'*upper limit*, e trovato un valore di flusso pari a:

$$(5.80791 \pm 0.93033) \cdot 10^{-8} ph \cdot cm^{-2}s^{-1} .$$

I dati dell'emissione γ raccolti sono riportati nelle tabelle di cui all'Appendice A.

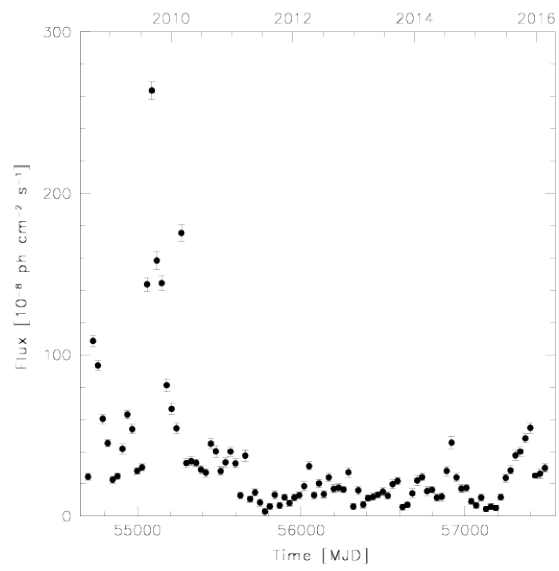


Figura 3.3: Curva di luce in banda γ del *blazar* 3C 273.

Capitolo 4

Studio dell'emissione in banda radio

Come è stato detto nel primo capitolo di questa tesi i vari tipi di Nuclei Galattici Attivi possono essere suddivisi in due principali gruppi: *AGN radio Loud* e *AGN radio-quiet*. Gli AGN che presentano forti emissioni di onde radio possono essere fino a centinaia di volte più brillanti complessivamente di tutte le stelle della galassia che li ospita.

Le immagini radio mostrano che questi AGN, generalmente ospitati in galassie ellittiche, formano potentissimi getti di plasma che si muovono a velocità prossime a quella della luce e si propagano per distanze pari a milioni di anni luce.

Per capire quali processi generino i getti e quali meccanismi siano alla base della forte emissione di questi AGN risulta quindi di fondamentale importanza riuscire a indagare l'emissione in banda radio di tali oggetti.

Lo studio della luce alle lunghezze d'onda radio avviene tramite i radiotelescopi. Questi strumenti rivelano le onde radio emesse dalle radiosorgenti presenti per l'universo, come fanno i telescopi per la banda ottica. A seconda dell'intervallo di frequenza a cui osservano, da qualche decina di MHz a centinaia di GHz, i radiotelescopi hanno strutture e dimensioni diverse: semplici reticoli di dipoli o grandi parabole che possono avere diametri di un centinaio di metri.

Tuttavia, sono generalmente formati da una grande antenna o più antenne collegate tra loro, da un sistema di rivelazione e amplificazione, da un sistema elettronico di elaborazione e da uno di registrazione. Lo scopo dell'antenna è quello di ricevere le onde radio e trasmetterle, tramite impulso elettrico, al sistema di rivelazione e amplificazione che le trasforma in un segnale interpretabile ed analizzabile dal computer. Per riuscire a generare un impulso elettrico le antenne sono generalmente costruite con un materiale conduttivo che reagisce alle onde radio quando viene colpito.

La lunghezza delle antenne determina la massima lunghezza d'onda dell'impulso che può generare, per questo vengono costruite con lunghezze diverse a secondo dalle differenti lunghezze d'onda che si vogliono rilevare.

La maggior parte dei radio telescopi sono costruiti a forma di parabola, in questo modo sfruttano la proprietà di riflettere tutte le onde nel fuoco, dove è posto il ricevitore. I

segnali in arrivo dai corpi celesti però sono solitamente molto deboli e per poterli rilevare i paraboloidei devono essere costruiti di grandi dimensioni, poiché la sensibilità dello strumento è direttamente proporzionale all'area di raccolta (area efficace). Inoltre, la risoluzione angolare θ dello strumento, ovvero la capacità di risolvere due oggetti, è data da $\theta \sim \lambda/D$, dove λ è la lunghezza d'onda osservata e D corrisponde al diametro dell'antenna.

E' da notare che alle lunghezze d'onda radio le risoluzioni che si possono ottenere anche con paraboloidei di 100 metri di diametro sono di alcuni arcominuti, generalmente inadeguati allo studio morfologico delle radiosorgenti. Inoltre tali grandi dimensioni pongono dei problemi costruttivi, la struttura risulta molto pesante e molto costosa in termini economici. Un ulteriore problema che incontrano queste enormi antenne è la presenza dell'interferenza radio data dall'elettronica moderna.

Proprio dalla necessità di ottenere un potere risolutivo maggiore, mantenendo ridotte le dimensioni dei radiotelescopi è nata l'*interferometria radioastronomica*. Questa tecnica sfrutta le interferenze prodotte da un fronte d'onda che incide, con un ritardo geometrico, sulle varie antenne dell'interferometro.

I radiointerferometri lavorano come se fossero un'unica antenna con diametro pari alla distanza massima tra le antenne. In questo modo si possono ottenere risoluzioni angolari ben inferiori all'arcosecondo o del milliarcosecondo. L'interferometria permette quindi di avere un'ottima risoluzione, in grado di rilevare molte più sorgenti e farne una caratterizzazione adeguata.

Dall'invenzione dell'*interferometria radioastronomica* nel 1974 sono stati costruiti molti radiointerferometri. Per raccogliere i dati radio utilizzati in questo studio ne sono stati utilizzati due: il *Submillimeter Array*(SMA) e l'*Atacama Large Millimeter Array* (ALMA).

4.1 Submillimeter Array

Il *Submillimeter Array* (Figura 4.1), situato a Mauna Kea nelle Hawaii, a 4080 metri sul livello del mare, è un interferometro formato da 8 radiotelescopi di 6 metri di diametro ciascuno. Questi paraboloidei possono essere disposti a formare 4 diverse configurazioni per fornire un'alta risoluzione angolare, queste configurazioni sono:

subcompact: Questa configurazione è un'ottima risorsa per studiare sorgenti di larga scala. Utilizza solo 6 ricevitori per disposizioni aventi un diametro compreso tra 9.5 e 25 m di lunghezza, con una risoluzione tipica di 5 secondi d'arco a 345 GHz. Per proteggere le antenne dalle collisioni si limitano le osservazioni al di sopra di 31.3° di elevazione.

compact: Questa configurazione utilizza le antenne in disposizioni aventi fino a 70 m di diametro, con una risoluzione tipica di 2.5 secondi d'arco a 345 GHz.



Figura 4.1: Immagine del SMA.

extended: Questa configurazione utilizza tutte le antenne e fornisce un massimo diametro di 220 m, con una risoluzione tipica di 0.7 secondi d'arco a 345 GHz.

very extended: Quest'ultima configurazione può arrivare a formare disposizioni di antenne fino a 509 m di diametro.

Il SMA rivela la radiazione con lunghezze d'onda millimetriche ed inferiori, in un range compreso fra 0.3 e 1.7 mm, operando con frequenze comprese fra i 180 GHz ed i 418 GHz.

Il progetto è nato grazie alla collaborazione tra il *Smithsonian Astrophysical Observatory* e l'*Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics*.

Il SMA può vedere e acquisire dettagliate immagini delle dense nubi di gas dove si formano le stelle, e poter assistere direttamente alla nascita di esse, cosa che i normale telescopi non possono fare. Per questo motivo le classi di oggetti solitamente osservate da questo radiointerferometro sono le nubi molecolari, le galassie con spettro fortemente spostato verso il rosso e i nuclei galattici.

4.2 Atacama Large Millimeter Array

L'*Atacama Large Millimeter Array* è il più grande interferometro esistente al mondo per l'osservazione a lunghezze d'onda millimetriche e sub millimetriche. Situato nel deserto di Atacama, in Cile, l'osservatorio ALMA opera da due distinti siti: le antenne sono posizionate all'AOS (*Array Operations Site*) sull'altopiano di Chajnantor, a 5000 m di altezza; mentre gli astronomi operano dall'OSF (*Operations Support Facility*) posizionato a 2900 m sul livello del mare.

Il sito è stato scelto per le eccezionali condizioni atmosferiche, adatte all'osservazione astronomica. Infatti l'altitudine e la secchezza dell'altopiano permettono alla radiazione



Figura 4.2: L'Atacama Large Millimeter Array

millimetrica di passare attraverso l'atmosfera terrestre con solo piccolissime distorsioni, garantendo un'ottima qualità delle osservazioni.

ALMA è costituito da un gigantesco array di 50 radiotelescopi di 12 m di diametro, che costituiscono la parte principale, e da un ulteriore array compatto, formato da 12 radiotelescopi di 7 m e 4 radiotelescopi da 12 m di diametro, che costituiscono l'ACA (*Atacama Compact Array*) e aiutano a migliorare notevolmente la capacità di ALMA di osservare oggetti estesi.

Le antenne possono essere spostate tra le piattaforme disseminate nell'AOS per costituire una grande varietà di configurazioni con antenne a distanze da 150 metri fino a 16 km. A seconda dell'oggetto da osservare possono formare array più estesi, che portano ad una maggiore risoluzione angolare, o array più compatti, che danno maggiore sensibilità per lo studio di sorgenti molto estese.

ALMA è dotato di ricevitori che coprono ogni frequenza fino a 1THz e ha la capacità di fornire immagini a una risoluzione angolare di 0.1 arcosecondi.

Capitolo 5

Discussione e conclusioni

La correlazione tra l'emissione radio e γ nei *blazar* è stata studiata inizialmente utilizzando i dati γ raccolti dal telescopio *EGRET*. Grazie ad un'analisi statistica compiuta su 122 sorgenti individuate come *blazar* si è trovata una correlazione tra il flusso γ (F_γ) e il flusso radio F_r : $F_\gamma \propto F_r^{0.77 \pm 0.03}$ (Bloom, 2008).

A partire dal lancio di *Fermi*, che ha rivelato moltissime nuove sorgenti γ , lo studio della connessione fra l'emissione radio e l'emissione γ nei *blazar* ha avuto una svolta. Un primo studio della correlazione è stato fatto nel 2011 (Ghirlanda, et al. 2011). Lo studio ha utilizzato il flusso di raggi γ raccolti sui primi 11 mesi di osservazioni per energie $E > 100$ MeV, e la densità di flusso radio a 20 GHz ottenuta dall'*Australian Telescope Compact Array* (ATCA) di sorgenti *Fermi* associate a delle controparti nella banda radio. Lo studio ha mostrato una correlazione altamente significativa sia per i BL Lac che per i FSRQ: ($F_\gamma \propto F_r^{0.85 \pm 0.04}$). Per capire se questa correlazione fosse reale sono stati considerati gli effetti di selezione introdotti dai limiti di flusso in entrambe le bande radio e γ e la grande variabilità del flusso di raggi γ . Considerati questi effetti è stata trovata una nuova correlazione tra i flussi, pari a: $F_\gamma \propto F_r^\delta$ $1.25 < \delta < 1.5$. Questa correlazione è stata confermata da un'ulteriore analisi basata sul confronto fra i dati γ raccolti da *Fermi* nei primi 11 mesi per 599 *blazar* ed i dati radio a 8.4 GHz raccolti dal *Very Large Array* e da ATCA ed a 15 GHz ottenuti da *Owens Valley Radio Observatory* per un sottocampione di 199 sorgenti (Ackermann, et al. 2011).

Lo scopo finale di questo lavoro di tesi è stato confrontare le curve di luce della banda radio a 100, 230 e 350 GHz, con la curva di luce che ho creato grazie all'analisi dei dati in banda γ , per cercare una correlazione fra le emissioni di 3C 273 alle due diverse bande di energia.

Il plot con il confronto della curva di luce in banda gamma ottenuta dai dati Fermi e le curve di luce radio, da 100 GHz a 350 GHz, ottenute dai dati raccolti da SMA e ALMA, riportato in Figura 5.1, mostra chiaramente una connessione tra l'emissione radio e quella gamma della sorgente. Nella curva di luce gamma si possono identificare

4 picchi: nel 2008, 2009, 2014 e 2016. Questi quattro picchi hanno un corrispettivo nelle curve di luce a 350 GHz e 230 GHz, sebbene l'incremento osservato sia minore nel radio rispetto al gamma, ed i picchi radio siano ritardati rispetto ai picchi gamma.

Ciò è dovuto a due fattori. Per prima cosa, i raggi γ vengono emessi in una regione molto compatta da particelle estremamente energetiche e quindi tramite processi di emissione molto efficienti e sono soggette ad una rapida perdita di energia tramite processo di IC. Il flusso radio proviene da regioni più estese e viene prodotto da particelle meno energetiche che impiegano più tempo a perdere energia per sincrotrone.

Inoltre quando la temperatura di brillantezza della sorgente si avvicina alla temperatura cinetica degli elettroni, l'assorbimento interno da parte degli elettroni relativistici coinvolti nel processo di sincrotrone che produce l'emissione radio non è trascurabile. Quindi la regione di emissione rimane opaca alla sua stessa radiazione per un certo periodo causando un ritardo della variabilità di flusso radio rispetto a quella gamma dovuta ad auto-assorbimento di sincrotrone. La regione molto compatta da cui vengono emessi i raggi γ spiega anche la maggiore variabilità che si nota nell'emissione γ rispetto all'emissione radio durante i picchi.

Dai picchi di intensità del 2008 e del 2009 si vede come il flusso di radiazione γ aumenti notevolmente. Per il picco del 2008 l'incremento di flusso è di un fattore 4, l'intensità del flusso passa infatti da $(24.43 \pm 2.22) \cdot 10^{-8} [ph \cdot cm^{-2}s^{-1}]$ a $(108.60 \pm 3.57) \cdot 10^{-8} [ph \cdot cm^{-2}s^{-1}]$ in un mese. Per il picco del 2009 l'incremento è di un fattore 10, passando da un'intensità di flusso pari a $(28.08 \pm 2.20) \cdot 10^{-8} [ph \cdot cm^{-2}s^{-1}]$ a un'intensità massima di $(263.77 \pm 5.47) \cdot 10^{-8} [ph \cdot cm^{-2}s^{-1}]$ in 3 mesi.

Il picco del 2008 può essere confrontato solo col corrispettivo in banda radio a 230 GHz, poiché i primi dati radio raccolti a 350 GHz mostrano di essere già al picco di flusso. Vediamo quindi come il flusso di radiazione in banda radio a 230 GHz passi da un valore di (7.014 ± 0.400) Jy prima del picco a un valore massimo di (17.835 ± 0.894) Jy in 2 mesi, mostrando quindi un fattore di crescita di circa 2.

Il picco registrato nel 2009 per l'emissione radio a varie frequenze mostra un aumento del flusso da (5.178 ± 0.300) Jy a (15.59 ± 0.68) Jy, per l'emissione a 230 GHz e un aumento da (4.57 ± 0.23) Jy a (11.24 ± 0.56) Jy, per l'emissione a 350 GHz.

Come si può vedere da questi dati l'emissione γ ha avuto una crescita molto maggiore nel 2009 rispetto a quella del 2008, mentre non si nota questa differenza nella controparte radio, che invece mostra una maggiore intensità di flusso nel 2008. Questo ci porta a pensare che sebbene il meccanismo di emissione sia lo stesso i parametri in gioco che variano durante i flares in γ e radio possano essere diversi.

Per quanto riguarda la curva di luce a 100 GHz, essendo i dati disponibili solo dal 2012 è possibile notare la correlazione con l'emissione in banda gamma solo per l'aumento di attività del 2014 e di inizio 2016. Anche a questa frequenza radio notiamo un incremento dell'emissione ritardato rispetto all'incremento in banda γ . Analizzando l'aumento di attività del 2014 vediamo come in banda γ il flusso sia aumentato di un fattore 4, mentre in banda radio sia aumentato, a seconda della frequenza, di un fattore 3 per i dati radio a 350 e 230 GHz e di un fattore 2 per i dati a 100 GHz, raccolti da ALMA. Il fatto che l'aumento sia minore a frequenze minori potrebbe essere dovuto alla maggiore incidenza dell'auto-assorbimento di sincrotrone.

Per il picco registrato a inizio del 2016 si vede che, come per i picchi precedenti, l'incremento γ è maggiore di quello radio, passando da un flusso di $(5.14 \cdot 10^{-8} \pm 1.40 \cdot 10^{-8})$ [$ph \cdot cm^{-2}s^{-1}$], ad un flusso di $(5.473 \cdot 10^{-7} \pm 3.30 \cdot 10^{-8})$ [$ph \cdot cm^{-2}s^{-1}$] in 7 mesi, quindi aumentando di un fattore 10. L'emissione radio registrata da ALMA a 100 GHz è aumentata di un fattore 2, passando da 10.99 a 20.57 Jy, così come sono aumentati di un fattore 2 anche i flussi a 230 e 350 GHz.

L'emissione γ fra il picco del 2009 e quello del 2014 è rimasta generalmente molto debole, con un minimo di flusso di $(2.90 \cdot 10^{-8} \pm 1.64)$ [$ph \cdot cm^{-2}s^{-1}$] registrato a luglio del 2011, mostrando anche poca variabilità. Durante questo periodo anche la controparte radio è rimasta circa costante, mostrando che una debole intensità nell'emissione alle alte energie comporta una debole intensità anche alle energie più basse. Questo è dovuto al fatto che gli elettroni che producono emissione γ tramite processo di IC sono gli stessi che producono l'emissione radio per sincrotrone.

Concludendo, possiamo vedere, dal confronto delle curve di luce γ e radio del *blazar* 3C 273, che esiste una connessione tra l'emissione in banda radio e l'emissione in banda γ . Inoltre l'emissione in banda γ possiede maggiore variabilità rispetto a quella radio, mostrando incrementi di flusso maggiori. Questa correlazione è dovuta alle stesse popolazioni di elettroni che producono emissione radio per sincrotrone e γ per IC.

Questo lavoro è un punto di partenza per una ricerca più approfondita sulla variabilità del blazar 3C 273 e la correlazione delle emissioni in radio e gamma su tempi scala più brevi, in modo da poterne studiare in maggior dettaglio i meccanismi di emissione e l'energetica.

Inoltre, le analisi effettuate su questo oggetto potranno essere ripetute su un campione più ampio di blazar osservati dal satellite gamma Fermi e per cui siano disponibili osservazioni in banda radio da ALMA e SMA. Questo permetterà un'analisi statistica della correlazione tra emissione radio e gamma

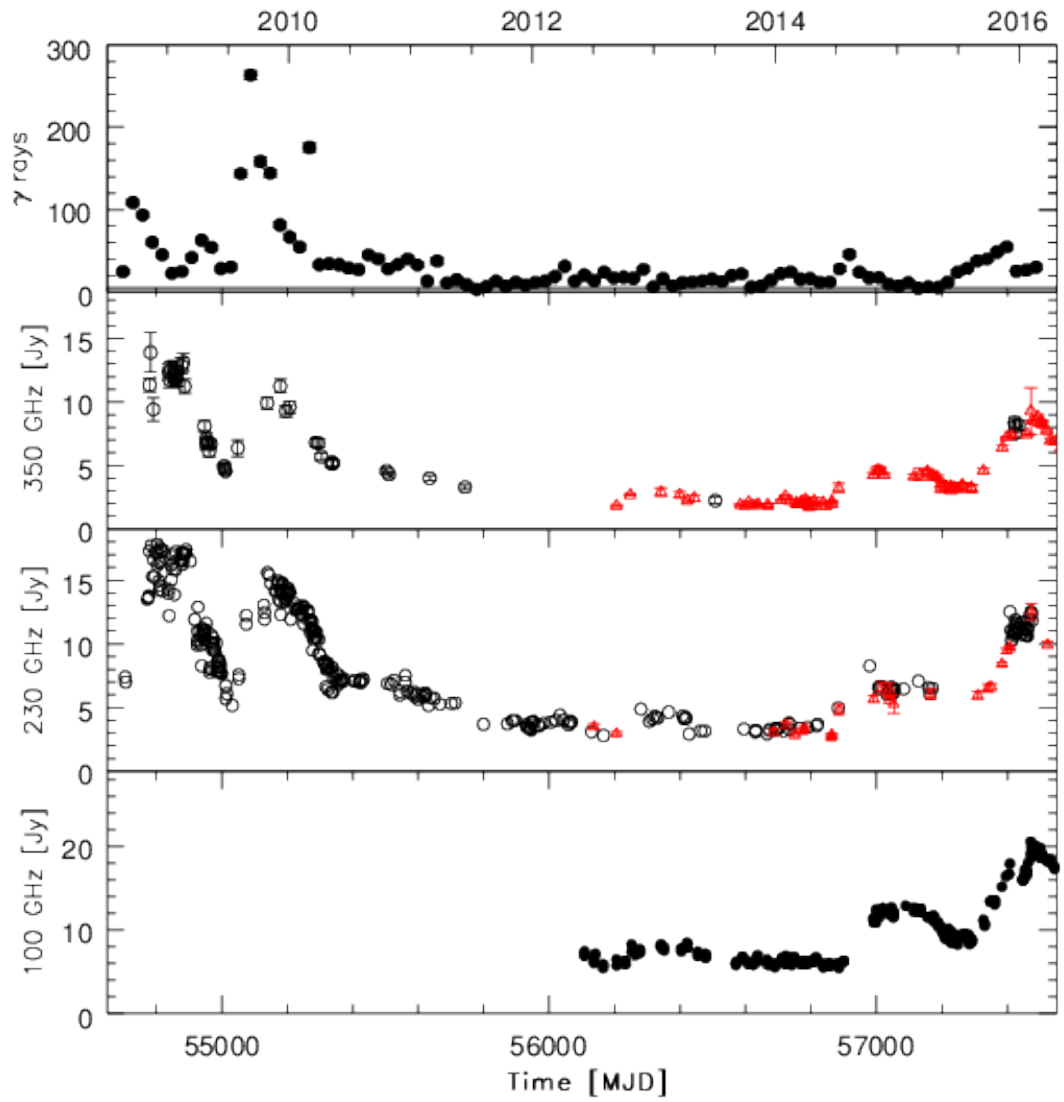


Figura 5.1: Le curve di luce γ e radio della sorgente 3C 273 a confronto.

Appendice A

Dati γ

Quest'appendice contiene tutti i dati γ raccolti e analizzati secondo la procedura descritta nel capitolo 3, utilizzati per produrre la curva di luce in banda γ .

La seguente tabella mostra i dati ottenuti dall'analisi. All'interno sono riportati, la data del rilevamento, la data espressa in MJD¹, la densità di flusso (espressa in $ph \cdot cm^{-2} s^{-1}$), l'errore sul flusso e il TS. Ordinati secondo la data.

Tabella A.1: Fermi

Data	Data (MJD)	Flusso (10^{-7})	Errore (10^{-8})	TS
2008-08-05	54683.00000000	24.430	2.21	278
2008-09-04	54713.00000000	108.600	3.57	3044
2008-10-04	54743.00000000	93.449	3.18	2637
2008-11-03	54773.00000000	60.302	2.87	1235
2008-12-03	54803.00000000	45.232	2.39	884
2009-01-02	54833.00000000	22.576	2.19	223
2009-02-01	54863.00000000	24.813	1.99	334
2009-03-03	54893.00000000	41.661	2.91	509
2009-04-02	54923.00000000	62.989	2.77	1455
2009-05-02	54953.00000000	53.991	2.81	1004
2009-06-01	54983.00000000	28.083	2.20	363
2009-07-01	55013.00000000	30.273	2.23	416
2009-07-31	55043.00000000	143.710	4.27	3963
2009-08-30	55073.00000000	263.770	5.47	8982
2009-09-29	55103.00000000	158.440	5.31	2917

Continua nella prossima pagina

¹il *Modified Julian Day* è un formato introdotto dallo *Smithsonian Astrophysical Observatory* nel 1958 per registrare l'orbita dello Sputnik; corrisponde ai giorni passati dalla mezzanotte del 17 Novembre 1858.

Tabella A.1 Continua

Data	Data (MJD)	Flusso (10^{-8})	Errore (10^{-8})	TS
2009-10-29	55133.00000000	144.400	4.41	3746
2009-11-28	55163.00000000	81.225	3.99	1191
2009-12-28	55193.00000000	66.539	3.53	997
2010-01-27	55223.00000000	54.454	3.22	766
2010-02-26	55253.00000000	175.570	5.01	4545
2010-03-28	55283.00000000	32.914	2.82	310
2010-04-27	55313.00000000	34.106	2.77	356
2010-05-27	55343.00000000	32.979	2.44	417
2010-06-26	55373.00000000	28.878	2.64	257
2010-07-26	55403.00000000	26.925	2.46	255
2010-08-25	55433.00000000	44.910	3.16	499
2010-09-24	55463.00000000	40.142	3.54	290
2010-10-24	55493.00000000	27.912	2.64	249
2010-11-23	55523.00000000	33.330	2.95	294
2010-12-23	55553.00000000	40.095	2.79	494
2011-01-22	55583.00000000	32.705	2.99	264
2011-02-21	55613.00000000	12.909	2.10	70.9
2011-03-23	55643.00000000	37.533	3.57	265
2011-04-22	55673.00000000	10.750	2.09	47.6
2011-05-22	55703.00000000	14.702	2.23	82.1
2011-06-21	55733.00000000	8.531	2.29	22.2
2011-07-21	55763.00000000	2.905	1.64	4.30
2011-08-20	55793.00000000	6.082	1.87	15.9
2011-09-19	55823.00000000	13.222	2.28	61.2
2011-10-19	55853.00000000	6.677	2.07	16.6
2011-11-18	55883.00000000	11.638	1.83	75.4
2011-12-18	55913.00000000	8.174	1.84	33.6
2012-01-17	55943.00000000	11.541	1.99	62.4
2012-02-16	55973.00000000	12.993	2.02	63.7
2012-03-17	56003.00000000	18.602	2.69	96.6
2012-04-16	56033.00000000	31.034	2.61	341
2012-05-16	56063.00000000	13.004	2.41	51.7
2012-06-15	56093.00000000	20.355	2.66	118
2012-07-15	56123.00000000	13.659	2.35	63.3
2012-08-14	56153.00000000	24.070	2.56	188
2012-09-13	56183.00000000	16.911	2.79	70.7
2012-10-13	56213.00000000	17.647	2.41	105

Continua nella prossima pagina

Tabella A.1 Continua

Data	Data (MJD)	Flusso (10^{-8})	Errore (10^{-8})	TS
2012-11-12	56243.00000000	16.555	2.13	121
2012-12-12	56273.00000000	27.211	2.80	196
2013-01-11	56303.00000000	5.978	1.77	18.0
2013-02-10	56333.00000000	15.970	2.59	70.9
2013-03-12	56363.00000000	7.213	2.12	18.6
2013-04-11	56393.00000000	11.165	2.15	47.1
2013-05-11	56423.00000000	11.962	2.20	53.4
2013-06-10	56453.00000000	13.341	2.02	80.7
2013-07-10	56483.00000000	15.202	2.44	71.0
2013-08-09	56513.00000000	12.713	2.22	66.4
2013-09-08	56543.00000000	19.864	2.81	92.6
2013-10-08	56573.00000000	21.822	2.26	190
2013-11-07	56603.00000000	5.639	1.82	14.6
2013-12-07	56633.00000000	7.033	1.77	25.0
2014-01-06	56663.00000000	14.161	2.99	39.9
2014-02-05	56693.00000000	22.110	3.30	98.2
2014-03-07	56723.00000000	24.235	2.35	225
2014-04-06	56753.00000000	15.470	2.74	55.8
2014-05-06	56783.00000000	16.327	2.21	109
2014-06-05	56813.00000000	11.402	2.33	41.8
2014-07-05	56843.00000000	12.057	2.48	40.6
2014-08-04	56873.00000000	27.993	2.93	211
2014-09-03	56903.00000000	45.613	3.75	369
2014-10-03	56933.00000000	24.038	2.74	163
2014-11-02	56963.00000000	17.105	2.59	85.5
2014-12-02	56993.00000000	17.563	2.13	134
2015-01-01	57023.00000000	9.225	1.94	38.9
2015-01-31	57053.00000000	6.718	1.77	25.0
2015-03-02	57083.00000000	11.514	2.34	42.4
2015-04-01	57113.00000000	4.444	1.76	9.86
2015-05-01	57143.00000000	5.885	1.84	15.7
2015-05-31	57173.00000000	5.140	1.50	18.1
2015-06-30	57203.00000000	11.750	2.09	57.8
2015-07-29	57232.99998843	23.736	2.67	177
2015-08-29	57263.00000000	28.393	2.64	254
2015-09-28	57293.00000000	37.692	3.06	369
2015-10-28	57323.00000000	40.083	2.76	516

Continua nella prossima pagina

Tabella A.1 Continua

Data	Data (MJD)	Flusso (10^{-8})	Errore (10^{-8})	TS
2015-11-27	57353.00000000	48.193	2.85	755
2015-12-27	57383.00000000	54.733	3.30	737
2016-01-26	57413.00000000	25.180	1.16	268
2016-02-25	57443.00000000	26.374	2.97	179
2016-03-26	57473.00000000	29.890	2.60	312

Appendice B

Dati Radio

Quest'appendice contiene tutti le misure radio utilizzate all'interno della tesi per produrre le curve di luce in banda radio.

Le seguenti tabelle mostrano i rilevamenti fatti con il SMA alle frequenze di 235 GHz (Tabella 1) e 350 GHz (Tabella 2). All'interno sono riportati, la data e l'orario del rilevamento, la data espressa in MJD, la densità di flusso, (espressa in *Jansky*¹), e l'errore sul flusso. Ordinati secondo la data.

Tabella 1: SMA 235 GHz

Data	Data (MJD)	Flusso (Jy)	Errore (Jy)
27 Aug 2008 03:52	54705.16111111	7.403	0.419
28 Aug 2008 03:45	54706.15625000	7.014	0.400
02 Nov 2008 21:47	54772.90763889	13.504	0.682
05 Nov 2008 18:12	54775.75833333	13.636	0.682
06 Nov 2008 16:46	54776.69861111	13.742	0.693
08 Nov 2008 18:45	54778.78125000	17.297	0.867
14 Nov 2008 16:58	54784.70694444	17.731	0.986
18 Nov 2008 18:12	54788.75833333	15.285	0.767
21 Nov 2008 16:55	54791.70486111	16.613	1.449
24 Nov 2008 20:06	54794.83750000	15.271	0.766
25 Nov 2008 16:55	54795.70486111	17.211	1.114
02 Dec 2008 15:24	54802.64166667	17.835	0.894
02 Dec 2008 17:34	54802.73194444	17.278	0.865
03 Dec 2008 15:51	54803.66041667	16.174	0.810
07 Dec 2008 14:44	54807.61388889	14.954	0.839

Continua nella prossima pagina

¹Il *Jansky* (Jy) è un'unità di misura del flusso e della densità di flusso elettromagnetico, comunemente usata in radioastronomia. $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz})$

Tabella B.1 Continua

Data	Data (MJD)	Flusso (Jy)	Errore (Jy)
08 Dec 2008 15:52	54808.661111111	16.430	0.822
08 Dec 2008 20:33	54808.856250000	16.392	0.825
09 Dec 2008 18:10	54809.756944444	14.605	0.747
10 Dec 2008 15:33	54810.647916667	14.306	0.716
10 Dec 2008 20:28	54810.852777778	17.547	1.062
15 Dec 2008 15:06	54815.629166667	17.358	0.868
16 Dec 2008 16:46	54816.698611111	16.565	0.836
17 Dec 2008 14:47	54817.615972222	14.185	0.934
17 Dec 2008 19:52	54817.827777778	17.407	0.882
19 Dec 2008 16:16	54819.677777778	17.207	0.861
05 Jan 2009 18:05	54836.753472222	14.294	0.724
05 Jan 2009 18:16	54836.761111111	13.979	0.702
08 Jan 2009 16:09	54839.672916667	12.218	0.611
13 Jan 2009 17:40	54844.736111111	16.173	0.809
14 Jan 2009 13:46	54845.573611111	15.041	2.378
19 Jan 2009 12:37	54850.525694444	15.866	0.794
20 Jan 2009 12:07	54851.504861111	16.936	0.848
20 Jan 2009 15:28	54851.644444444	16.351	0.818
24 Jan 2009 12:35	54855.524305556	13.877	0.694
28 Jan 2009 17:32	54859.730555556	15.844	0.794
29 Jan 2009 11:18	54860.470833333	17.261	0.865
08 Feb 2009 12:54	54870.537500000	16.626	1.299
10 Feb 2009 15:25	54872.642361111	16.525	0.964
14 Feb 2009 12:51	54876.535416667	17.170	0.863
17 Feb 2009 14:55	54879.621527778	16.241	0.873
18 Feb 2009 12:37	54880.525694444	17.012	0.870
18 Feb 2009 16:02	54880.668055556	16.585	0.830
20 Feb 2009 09:26	54882.393055556	16.514	0.826
21 Feb 2009 11:07	54883.463194444	17.166	0.863
21 Feb 2009 13:18	54883.554166667	17.035	0.861
28 Feb 2009 10:53	54890.453472222	17.405	0.900
28 Feb 2009 13:05	54890.545138889	17.097	0.858
13 Mar 2009 08:06	54903.337500000	16.494	0.830
27 Mar 2009 14:49	54917.617361111	11.923	0.597
03 Apr 2009 14:26	54924.601388889	9.918	0.523
04 Apr 2009 06:03	54925.252083333	10.219	0.568
05 Apr 2009 06:15	54926.260416667	11.006	0.600

Continua nella prossima pagina

Tabella B.1 Continua

Data	Data (MJD)	Flusso (Jy)	Errore (Jy)
06 Apr 2009 09:46	54927.40694444	12.914	1.444
07 Apr 2009 09:48	54928.40833333	10.967	0.550
08 Apr 2009 09:51	54929.41041667	10.384	0.878
14 Apr 2009 11:08	54935.46388889	9.950	0.498
17 Apr 2009 09:12	54938.38333333	8.279	0.424
18 Apr 2009 05:43	54939.23819444	10.511	0.616
19 Apr 2009 06:49	54940.28402778	10.632	0.664
20 Apr 2009 06:07	54941.25486111	10.986	0.550
20 Apr 2009 09:05	54941.37847222	11.218	1.011
25 Apr 2009 09:28	54946.39444444	11.035	0.566
27 Apr 2009 06:04	54948.25277778	10.736	0.538
27 Apr 2009 08:43	54948.36319444	10.325	0.521
28 Apr 2009 05:54	54949.24583333	10.416	0.690
28 Apr 2009 07:51	54949.32708333	11.112	0.868
29 Apr 2009 06:36	54950.27500000	10.935	0.549
01 May 2009 05:37	54952.23402778	11.610	0.868
12 May 2009 05:55	54963.24652778	8.053	0.403
12 May 2009 07:10	54963.29861111	7.775	0.393
13 May 2009 05:50	54964.24305556	8.046	0.403
13 May 2009 08:25	54964.35069444	8.128	0.407
16 May 2009 08:03	54967.33541667	10.705	0.723
19 May 2009 08:37	54970.35902778	10.035	0.529
20 May 2009 04:41	54971.19513889	9.833	0.495
20 May 2009 05:24	54971.22500000	9.584	0.482
22 May 2009 05:04	54973.21111111	10.482	1.088
22 May 2009 07:00	54973.29166667	10.134	0.507
23 May 2009 07:32	54974.31388889	9.569	0.481
24 May 2009 06:57	54975.28958333	9.611	0.487
26 May 2009 05:09	54977.21458333	9.454	0.475
29 May 2009 04:44	54980.19722222	9.399	0.470
01 Jun 2009 04:45	54983.19791667	10.077	0.513
02 Jun 2009 05:05	54984.21180556	8.131	0.412
02 Jun 2009 07:40	54984.31944444	7.848	0.410
04 Jun 2009 04:36	54986.19166667	7.907	0.401
04 Jun 2009 06:03	54986.25208333	7.811	0.393
06 Jun 2009 04:25	54988.18402778	8.643	0.435
06 Jun 2009 06:42	54988.27916667	8.777	0.442

Continua nella prossima pagina

Tabella B.1 Continua

Data	Data (MJD)	Flusso (Jy)	Errore (Jy)
08 Jun 2009 04:52	54990.20277778	8.143	0.636
09 Jun 2009 07:00	54991.29166667	7.945	0.662
10 Jun 2009 04:45	54992.19791667	8.604	0.434
10 Jun 2009 04:55	54992.20486111	8.732	0.441
10 Jun 2009 05:45	54992.23958333	8.729	0.450
10 Jun 2009 07:00	54992.29166667	7.787	0.649
11 Jun 2009 07:24	54993.30833333	7.772	0.389
13 Jun 2009 05:02	54995.20972222	8.408	0.426
13 Jun 2009 06:33	54995.27291667	8.244	0.416
17 Jun 2009 06:35	54999.27430556	7.720	0.413
18 Jun 2009 04:20	55000.18055556	7.665	0.386
30 Jun 2009 05:20	55012.22222222	6.722	0.341
30 Jun 2009 05:24	55012.22500000	6.705	0.341
30 Jun 2009 08:04	55012.33611111	5.695	0.287
03 Jul 2009 04:48	55015.20000000	6.099	0.431
20 Jul 2009 07:21	55032.30625000	5.178	0.300
09 Aug 2009 05:18	55052.22083333	7.273	0.381
09 Aug 2009 05:20	55052.22222222	7.577	0.385
01 Sep 2009 04:17	55075.17847222	12.242	0.696
01 Sep 2009 04:20	55075.18055556	11.553	0.677
24 Oct 2009 18:37	55128.77569444	13.054	0.654
26 Oct 2009 16:23	55130.68263889	11.924	0.693
26 Oct 2009 16:25	55130.68402778	12.448	0.663
04 Nov 2009 19:00	55139.79166667	15.597	0.781
09 Nov 2009 16:30	55144.68750000	15.394	0.775
14 Nov 2009 15:30	55149.64583333	14.762	0.787
14 Nov 2009 15:31	55149.64652778	14.759	0.769
28 Nov 2009 15:41	55163.65347222	14.160	0.709
01 Dec 2009 14:51	55166.61875000	14.214	0.712
05 Dec 2009 14:09	55170.58958333	14.751	0.741
07 Dec 2009 15:02	55172.62638889	14.818	0.742
07 Dec 2009 18:14	55172.75972222	14.795	0.742
07 Dec 2009 18:19	55172.76319444	14.788	0.741
07 Dec 2009 18:55	55172.78819444	14.972	0.750
09 Dec 2009 16:12	55174.67500000	13.490	0.675
13 Dec 2009 15:03	55178.62708333	14.288	0.717
15 Dec 2009 16:30	55180.68750000	12.302	0.616

Continua nella prossima pagina

Tabella B.1 Continua

Data	Data (MJD)	Flusso (Jy)	Errore (Jy)
15 Dec 2009 17:52	55180.74444444	13.293	1.198
17 Dec 2009 13:34	55182.56527778	13.924	1.557
19 Dec 2009 14:51	55184.61875000	14.648	0.734
20 Dec 2009 13:41	55185.57013889	14.800	0.909
20 Dec 2009 13:48	55185.57500000	14.568	0.837
22 Dec 2009 14:08	55187.58888889	14.267	0.715
22 Dec 2009 15:41	55187.65347222	14.101	0.708
28 Dec 2009 15:16	55193.63611111	13.610	0.681
28 Dec 2009 17:45	55193.73958333	13.305	0.667
28 Dec 2009 17:59	55193.74930556	13.388	0.671
02 Jan 2010 14:06	55198.58750000	13.543	0.678
04 Jan 2010 14:30	55200.60416667	13.814	0.691
04 Jan 2010 17:17	55200.72013889	13.994	0.700
05 Jan 2010 15:01	55201.62569444	13.900	0.695
05 Jan 2010 15:46	55201.65694444	13.820	0.693
06 Jan 2010 14:53	55202.62013889	14.069	0.705
06 Jan 2010 14:58	55202.62361111	14.027	0.703
07 Jan 2010 16:04	55203.66944444	14.369	0.729
07 Jan 2010 17:21	55203.72291667	13.910	0.697
08 Jan 2010 16:34	55204.69027778	14.195	0.814
08 Jan 2010 18:10	55204.75694444	14.165	0.714
12 Jan 2010 14:52	55208.61944444	14.037	0.709
14 Jan 2010 15:34	55210.64861111	11.959	1.241
27 Jan 2010 16:19	55223.67986111	13.163	0.659
30 Jan 2010 13:54	55226.57916667	12.631	0.634
30 Jan 2010 14:31	55226.60486111	12.647	0.634
04 Feb 2010 09:58	55231.41527778	12.769	0.657
04 Feb 2010 10:39	55231.44375000	12.742	0.687
04 Feb 2010 14:06	55231.58750000	12.790	0.642
04 Feb 2010 14:06	55231.58750000	12.677	0.636
05 Feb 2010 15:07	55232.62986111	12.844	0.643
06 Feb 2010 15:36	55233.65000000	12.763	0.638
13 Feb 2010 14:18	55240.59583333	12.769	0.639
14 Feb 2010 14:39	55241.61041667	12.296	0.617
14 Feb 2010 14:43	55241.61319444	12.401	0.622
20 Feb 2010 14:02	55247.58472222	12.226	0.612
20 Feb 2010 15:11	55247.63263889	12.883	0.645

Continua nella prossima pagina

Tabella B.1 Continua

Data	Data (MJD)	Flusso (Jy)	Errore (Jy)
20 Feb 2010 15:25	55247.64236111	13.006	0.651
24 Feb 2010 11:03	55251.46041667	11.560	0.578
08 Mar 2010 09:37	55263.40069444	12.417	0.631
08 Mar 2010 09:51	55263.41041667	12.656	0.643
09 Mar 2010 09:19	55264.38819444	12.571	0.704
09 Mar 2010 09:22	55264.39027778	12.506	0.789
09 Mar 2010 09:23	55264.39097222	11.934	0.859
15 Mar 2010 09:23	55270.39097222	11.000	1.230
15 Mar 2010 10:10	55270.42361111	10.923	1.221
18 Mar 2010 10:27	55273.43541667	11.546	0.583
18 Mar 2010 10:55	55273.45486111	11.219	0.592
18 Mar 2010 11:35	55273.48263889	11.822	0.597
18 Mar 2010 11:39	55273.48541667	11.827	0.599
19 Mar 2010 10:27	55274.43541667	11.318	0.568
19 Mar 2010 11:33	55274.48125000	11.891	0.599
19 Mar 2010 11:37	55274.48402778	11.688	0.590
22 Mar 2010 10:59	55277.45763889	9.488	0.476
24 Mar 2010 09:23	55279.39097222	10.394	0.523
25 Mar 2010 08:28	55280.35277778	10.937	0.549
25 Mar 2010 09:28	55280.39444444	11.027	0.553
26 Mar 2010 09:58	55281.41527778	10.567	0.530
26 Mar 2010 11:01	55281.45902778	11.138	0.561
26 Mar 2010 11:06	55281.46250000	11.096	0.559
27 Mar 2010 10:25	55282.43402778	11.057	0.553
29 Mar 2010 08:10	55284.34027778	10.931	0.547
31 Mar 2010 08:33	55286.35625000	10.571	0.540
02 Apr 2010 07:23	55288.30763889	10.508	0.526
02 Apr 2010 13:34	55288.56527778	10.942	0.553
03 Apr 2010 10:04	55289.41944444	10.412	0.522
04 Apr 2010 10:01	55290.41736111	10.513	0.528
10 Apr 2010 07:51	55296.32708333	10.353	0.518
11 Apr 2010 05:07	55297.21319444	9.264	0.471
12 Apr 2010 08:33	55298.35625000	9.129	0.669
13 Apr 2010 08:53	55299.37013889	9.206	0.460
16 Apr 2010 07:54	55299.37013889	9.180	0.459
26 Apr 2010 06:24	55312.26666667	8.604	0.431
26 Apr 2010 06:28	55312.26944444	8.530	0.428

Continua nella prossima pagina

Tabella B.1 Continua

Data	Data (MJD)	Flusso (Jy)	Errore (Jy)
26 Apr 2010 07:58	55312.33194444	8.535	0.427
27 Apr 2010 04:54	55313.20416667	8.466	0.424
28 Apr 2010 06:20	55314.26388889	8.636	0.433
28 Apr 2010 09:24	55314.39166667	8.619	0.434
02 May 2010 06:50	55318.28472222	6.641	0.332
03 May 2010 06:24	55319.26666667	8.278	0.416
03 May 2010 06:34	55319.27361111	8.178	0.411
03 May 2010 09:21	55319.38958333	8.004	0.400
07 May 2010 06:02	55323.25138889	8.517	0.426
07 May 2010 08:16	55323.34444444	8.362	0.418
08 May 2010 03:52	55324.16111111	6.430	0.322
09 May 2010 06:16	55325.26111111	8.273	0.414
15 May 2010 03:29	55331.14513889	8.030	0.402
18 May 2010 06:15	55334.26041667	6.213	0.312
22 May 2010 06:52	55338.28611111	8.158	0.408
23 May 2010 05:43	55339.23819444	6.203	0.313
27 May 2010 10:04	55343.41944444	7.317	0.367
31 May 2010 06:37	55347.25486111	7.714	0.387
05 Jun 2010 05:11	55352.21597222	7.131	0.357
05 Jun 2010 05:26	55352.22638889	7.121	0.357
08 Jun 2010 04:24	55355.18333333	6.808	0.371
08 Jun 2010 04:32	55355.18888889	6.876	0.462
09 Jun 2010 04:23	55356.18263889	7.572	0.805
15 Jun 2010 05:06	55362.21250000	7.179	0.376
15 Jun 2010 05:11	55362.21597222	7.091	0.377
19 Jun 2010 04:17	55366.17847222	7.140	0.369
19 Jun 2010 04:22	55366.18194444	7.254	0.368
22 Jun 2010 05:34	55369.23194444	7.029	0.352
26 Jun 2010 04:55	55373.20486111	7.242	0.371
29 Jul 2010 04:55	55406.20486111	7.146	0.367
29 Jul 2010 05:03	55406.21041667	7.063	0.361
12 Aug 2010 03:56	55420.16388889	6.983	0.358
12 Aug 2010 04:03	55420.16875000	7.084	0.359
17 Aug 2010 04:16	55425.17777778	7.199	0.364
17 Aug 2010 04:28	55425.18611111	6.963	0.354
25 Aug 2010 03:53	55433.16180556	7.224	0.380
25 Aug 2010 03:57	55433.16458333	7.240	0.377

Continua nella prossima pagina

Tabella B.1 Continua

Data	Data (MJD)	Flusso (Jy)	Errore (Jy)
05 Nov 2010 18:01	55505.75069444	6.899	0.345
17 Nov 2010 16:22	55517.68194444	6.843	0.343
25 Nov 2010 15:25	55525.64236111	7.146	0.359
14 Dec 2010 17:04	55544.71111111	6.280	0.315
14 Dec 2010 17:30	55544.72916667	5.986	0.302
30 Dec 2010 13:54	55560.57916667	7.037	0.352
30 Dec 2010 17:24	55560.72500000	7.521	0.384
05 Jan 2011 15:07	55566.62986111	6.331	0.321
18 Jan 2011 17:09	55579.71458333	6.084	0.313
27 Jan 2011 11:23	55588.47430556	5.896	0.297
27 Jan 2011 15:06	55588.62916667	6.230	0.312
02 Feb 2011 15:38	55594.65138889	6.023	0.302
08 Feb 2011 14:22	55600.59861111	5.643	0.289
23 Feb 2011 11:23	55615.47430556	5.906	0.302
23 Feb 2011 12:37	55615.52569444	5.808	0.304
01 Mar 2011 12:27	55621.51875000	6.188	0.310
02 Mar 2011 11:56	55622.49722222	5.998	0.300
03 Mar 2011 12:05	55623.50347222	6.027	0.303
11 Mar 2011 08:16	55631.34444444	5.172	0.261
19 Mar 2011 10:58	55639.45694444	5.774	0.289
29 Mar 2011 14:19	55649.59652778	5.707	0.287
16 Apr 2011 07:03	55667.29375000	5.264	0.264
20 May 2011 04:39	55701.19375000	5.330	0.269
02 Jun 2011 06:24	55714.26666667	5.388	0.270
26 Aug 2011 19:55	55799.82986111	3.698	0.279
07 Nov 2011 17:54	55872.74583333	3.718	0.187
22 Nov 2011 17:12	55887.71666667	3.980	0.202
24 Nov 2011 16:58	55889.70694444	3.965	0.201
01 Dec 2011 19:33	55896.81458333	4.009	0.211
04 Jan 2012 17:49	55930.74236111	3.666	0.187
05 Jan 2012 13:51	55931.57708333	3.469	0.178
09 Jan 2012 18:23	55935.76597222	3.497	0.177
15 Jan 2012 13:23	55941.55763889	3.449	0.174
16 Jan 2012 14:23	55942.59930556	3.325	0.169
18 Jan 2012 12:39	55944.52708333	3.252	0.164
20 Jan 2012 13:28	55946.56111111	3.885	0.210
21 Jan 2012 16:22	55947.68194444	3.758	0.189

Continua nella prossima pagina

Tabella B.1 Continua

Data	Data (MJD)	Flusso (Jy)	Errore (Jy)
24 Jan 2012 16:31	55950.68819444	3.810	0.193
27 Jan 2012 11:54	55953.49583333	3.901	0.203
09 Feb 2012 17:28	55966.72777778	3.636	0.184
13 Feb 2012 12:25	55970.51736111	3.565	0.195
26 Feb 2012 12:03	55983.50208333	3.774	0.189
20 Mar 2012 08:40	56006.36111111	3.874	0.194
04 Apr 2012 13:40	56021.56944444	3.990	0.202
05 Apr 2012 06:04	56022.25277778	3.993	0.203
16 Apr 2012 09:30	56033.39583333	4.410	0.222
27 Apr 2012 12:13	56044.50902778	4.015	0.207
12 May 2012 08:45	56059.36458333	3.636	0.182
16 May 2012 08:18	56063.34583333	3.803	0.192
17 May 2012 07:07	56064.29652778	3.915	0.196
18 May 2012 08:04	56065.33611111	3.959	0.201
19 May 2012 08:06	56066.33750000	3.895	0.195
22 May 2012 04:26	56069.18472222	3.877	0.195
22 Jul 2012 04:58	56130.20694444	3.095	0.156
27 Aug 2012 19:46	56166.82361111	2.816	0.148
19 Dec 2012 19:36	56280.81666667	4.887	0.246
14 Jan 2013 14:02	56306.58472222	3.912	0.196
24 Jan 2013 10:18	56316.42916667	4.134	0.215
24 Jan 2013 14:18	56316.59583333	4.138	0.208
31 Jan 2013 10:36	56323.44166667	4.328	0.217
08 Feb 2013 11:02	56331.45972222	4.247	0.213
08 Feb 2013 18:16	56331.76111111	4.173	0.211
14 Mar 2013 10:49	56365.45069444	4.646	0.235
26 Apr 2013 04:54	56408.20416667	4.363	0.224
01 May 2013 06:41	56413.27847222	4.119	0.206
02 May 2013 08:25	56414.35069444	4.170	0.212
04 May 2013 06:46	56416.28194444	4.190	0.210
05 May 2013 06:59	56417.29097222	4.255	0.213
07 May 2013 06:18	56419.26250000	4.166	0.209
16 May 2013 08:38	56428.35972222	2.928	0.149
20 Jun 2013 06:55	56463.28819444	3.186	0.164
03 Jul 2013 08:39	56476.36041667	3.165	0.228
30 Oct 2013 17:30	56595.72916667	3.325	0.181
04 Dec 2013 14:00	56630.58333333	3.173	0.163

Continua nella prossima pagina

Tabella B.1 Continua

Data	Data (MJD)	Flusso (Jy)	Errore (Jy)
05 Dec 2013 14:10	56631.59027778	3.099	0.166
05 Dec 2013 16:09	56631.67291667	3.233	0.165
09 Jan 2014 14:14	56666.59305556	2.952	0.148
16 Jan 2014 12:07	56673.50486111	3.283	0.167
16 Jan 2014 14:16	56673.59444444	3.250	0.337
16 Jan 2014 17:11	56673.71597222	3.235	0.163
03 Feb 2014 15:17	56691.63680556	3.256	0.165
04 Feb 2014 17:00	56692.70833333	3.353	0.284
07 Feb 2014 11:29	56695.47847222	3.401	0.307
07 Feb 2014 12:35	56695.52430556	3.346	0.302
08 Feb 2014 16:40	56696.69444444	3.311	0.168
11 Feb 2014 10:08	56699.42222222	3.355	0.169
28 Feb 2014 12:08	56716.50555556	3.172	0.159
17 Mar 2014 10:54	56733.45416667	3.811	0.200
18 Mar 2014 07:49	56734.32569444	3.733	0.194
19 Mar 2014 10:30	56735.43750000	3.667	0.185
07 Apr 2014 06:25	56735.43750000	3.290	0.166
18 Apr 2014 05:59	56765.24930556	3.404	0.195
20 Apr 2014 06:59	56767.29097222	3.411	0.171
13 May 2014 08:31	56790.35486111	3.450	0.173
09 Jun 2014 05:55	56817.24652778	3.564	0.181
13 Jun 2014 04:30	56821.18750000	3.703	0.187
15 Aug 2014 05:18	56884.22083333	4.979	0.494
18 Nov 2014 18:52	56979.78611111	8.282	0.859
17 Dec 2014 14:19	57008.59652778	6.677	0.338
17 Dec 2014 18:02	57008.75138889	6.483	0.328
26 Dec 2014 13:58	57017.58194444	6.662	0.351
10 Jan 2015 15:31	57032.64652778	6.075	0.311
22 Jan 2015 17:08	57044.71388889	6.163	0.311
24 Jan 2015 13:25	57046.55902778	6.621	0.334
26 Jan 2015 16:28	57048.68611111	6.406	0.323
28 Jan 2015 15:51	57050.66041667	6.103	0.306
30 Jan 2015 16:28	57052.68611111	6.327	0.319
01 Feb 2015 14:26	57054.60138889	6.328	0.319
28 Feb 2015 14:30	57054.60138889	6.523	0.729
02 Mar 2015 15:38	57083.65138889	6.475	0.724
16 Apr 2015 07:55	57128.32986111	7.085	0.357

Continua nella prossima pagina

Tabella B.1 Continua

Data	Data (MJD)	Flusso (Jy)	Errore (Jy)
18 May 2015 04:52	57160.20277778	6.542	0.327
21 May 2015 08:43	57163.36319444	6.072	0.304
29 May 2015 04:11	57171.17430556	6.521	0.351
21 Jan 2016 10:55	57408.45486111	12.524	0.629
23 Jan 2016 13:37	57410.56736111	11.086	0.554
26 Jan 2016 14:58	57413.62361111	10.356	0.518
26 Jan 2016 15:19	57413.63819444	10.230	0.530
30 Jan 2016 11:39	57417.48541667	10.974	0.552
02 Feb 2016 14:18	57420.59583333	10.694	0.535
04 Feb 2016 16:10	57422.67361111	10.854	0.543
05 Feb 2016 13:17	57423.55347222	11.382	0.569
05 Feb 2016 16:49	57423.70069444	11.011	0.558
06 Feb 2016 13:30	57424.56250000	11.910	0.596
08 Feb 2016 11:04	57426.46111111	11.638	0.582
08 Feb 2016 14:28	57426.60277778	11.591	0.580
09 Feb 2016 13:23	57427.55763889	11.257	0.570
17 Feb 2016 14:11	57435.59097222	11.203	0.563
21 Feb 2016 12:28	57439.51944444	11.443	0.572
25 Feb 2016 09:37	57443.40069444	11.691	0.585
26 Feb 2016 09:38	57444.40138889	10.784	0.539
02 Mar 2016 10:35	57449.44097222	11.160	0.559
03 Mar 2016 12:01	57450.50069444	10.920	0.547
07 Mar 2016 10:40	57454.44444444	10.633	0.532
11 Mar 2016 10:57	57458.45625000	10.778	0.539
13 Mar 2016 13:32	57460.56388889	10.730	0.537
14 Mar 2016 09:01	57461.37569444	11.027	0.552
14 Mar 2016 10:18	57461.42916667	11.173	0.559
15 Mar 2016 12:34	57462.52361111	10.607	0.531
16 Mar 2016 11:18	57463.47083333	11.261	0.576
18 Mar 2016 11:17	57465.47013889	11.963	0.599
25 Mar 2016 08:15	57472.34375000	12.542	0.629
25 Mar 2016 10:53	57472.45347222	12.426	0.623
25 Mar 2016 11:41	57472.48680556	12.446	0.623
27 Mar 2016 14:58	57474.62361111	12.373	0.619
28 Mar 2016 11:25	57475.47569444	11.856	0.595

Tabella 2: SMA 350 GHz

Data	Data (MJD)	Flusso (Jy)	Errore (Jy)
09 Nov 2008 16:40	54779.69444444	11.323	0.567
12 Nov 2008 16:47	54782.69930556	13.882	1.552
20 Nov 2008 18:31	54790.77152778	9.414	0.915
06 Jan 2009 13:29	54837.56180556	12.366	0.624
09 Jan 2009 18:07	54840.75486111	11.722	0.597
12 Jan 2009 18:15	54843.76041667	12.491	0.660
21 Jan 2009 11:31	54852.47986111	12.191	0.620
22 Jan 2009 17:01	54853.70902778	12.616	0.631
25 Jan 2009 15:27	54856.64375000	11.712	0.588
27 Jan 2009 13:52	54858.57777778	12.105	0.606
30 Jan 2009 17:00	54861.70833333	11.773	0.589
31 Jan 2009 17:05	54862.71180556	11.888	0.595
01 Feb 2009 11:54	54863.49583333	12.293	0.617
15 Feb 2009 15:45	54877.65625000	12.824	0.653
20 Feb 2009 12:38	54882.52638889	13.106	0.684
24 Feb 2009 11:52	54886.49444444	11.214	0.563
26 Apr 2009 08:13	54947.34236111	8.112	0.406
01 May 2009 09:42	54952.40416667	6.746	0.477
02 May 2009 04:37	54953.19236111	7.037	0.498
06 May 2009 09:40	54957.40277778	6.801	0.341
07 May 2009 08:58	54958.37361111	6.737	0.344
10 May 2009 09:37	54961.40069444	6.113	0.400
15 May 2009 08:33	54966.35625000	6.690	0.335
24 Jun 2009 08:06	55006.33750000	4.936	0.248
25 Jun 2009 08:42	55007.36250000	4.957	0.248
27 Jun 2009 08:45	55009.36458333	4.739	0.312
29 Jun 2009 08:04	55011.33611111	4.572	0.232
06 Aug 2009 04:32	55049.18888889	6.373	0.661
03 Nov 2009 19:05	55138.79513889	9.915	0.500
13 Dec 2009 13:56	55178.58055556	11.238	0.563
31 Dec 2009 12:34	55196.52361111	9.270	0.464
11 Jan 2010 13:10	55207.54861111	9.613	0.483
01 Apr 2010 07:26	55287.30972222	6.820	0.342
09 Apr 2010 11:37	55295.48402778	6.766	0.339
18 Apr 2010 05:52	55304.24444444	5.703	0.286
20 May 2010 03:21	55336.13958333	5.253	0.293

Continua nella prossima pagina

Tabella B.2 Continua

Data	Data (MJD)	Flusso (Jy)	Errore (Jy)
20 May 2010 11:07	55336.46319444	5.133	0.283
24 May 2010 06:24	55340.26666667	5.196	0.261
03 Nov 2010 18:05	55503.75347222	4.567	0.229
04 Nov 2010 18:18	55504.76250000	4.547	0.228
10 Nov 2010 18:26	55510.76805556	4.298	0.235
15 Mar 2011 08:26	55635.35138889	4.018	0.216
01 Jul 2011 04:45	55743.19791667	3.296	0.171
04 Aug 2013 05:56	56508.24722222	2.267	0.235
04 Feb 2016 13:34	57422.56527778	8.376	0.422
05 Feb 2016 13:17	57423.55347222	7.540	0.378
06 Feb 2016 12:48	57424.53333333	8.101	0.427
16 Feb 2016 11:57	57434.49791667	8.140	0.408

A partire dalla fine del 2012 è entrato in funzione l'ALMA, il quale ha potuto affiancare il SMA nell'osservazione di 3C273.

I risultati di questa osservazione sono mostrati nelle seguenti tabelle, una per ogni diversa frequenza: 100 GHz (Tabella 3); 230 GHz (Tabella 4); 340 GHz (Tabella 5). Come per i rilevamenti fatti con l'SMA all'interno sono riportati, la data del rilevamento, la data espressa in MJD, la densità di flusso e l'errore sul flusso. Ordinati secondo il flusso.

Tabella 3: ALMA 100 GHz

Data	Data (MJD)	Flusso (Jy)	Errore (Jy)
2016-03-25	57472.00000000	20.57	1.95
2016-04-09	57487.00000000	20.07	0.50
2016-03-27	57474.00000000	19.83	0.99
2016-04-22	57500.00000000	19.83	0.60
2016-04-09	57487.00000000	19.77	0.50
2016-04-09	57487.00000000	19.67	0.50
2016-04-07	57485.00000000	19.65	0.64
2016-04-07	57485.00000000	19.61	0.72
2016-04-09	57487.00000000	19.56	0.50
2016-04-22	57500.00000000	19.46	0.60
2016-03-29	57476.00000000	19.21	0.50
2016-03-29	57476.00000000	19.12	0.50
2016-03-29	57476.00000000	19.12	0.50

Continua nella prossima pagina

Tabella B.3 Continua

Data	Data (MJD)	Flusso (Jy)	Errore (Jy)
2016-03-25	57472.00000000	19.06	1.81
2016-04-30	57508.00000000	19.05	0.54
2016-04-26	57504.00000000	18.89	0.65
2016-04-26	57504.00000000	18.89	0.65
2016-03-29	57476.00000000	18.86	0.50
2016-03-29	57476.00000000	18.86	0.50
2016-04-30	57508.00000000	18.66	0.60
2016-04-26	57504.00000000	18.58	0.60
2016-04-26	57504.00000000	18.58	0.60
2016-05-24	57532.00000000	18.55	0.50
2016-05-13	57521.00000000	18.45	0.70
2016-05-13	57521.00000000	18.21	0.70
2016-05-24	57532.00000000	18.05	0.50
2016-03-17	57464.00000000	18.04	0.40
2016-01-21	57408.00000000	17.92	0.55
2016-06-05	57544.00000000	17.55	0.50
2016-06-05	57544.00000000	17.34	0.50
2016-03-08	57455.00000000	17.23	1.03
2016-03-14	57461.00000000	17.13	0.74
2016-03-08	57455.00000000	16.81	1.13
2016-01-19	57406.00000000	16.70	0.07
2016-03-14	57461.00000000	16.62	0.90
2016-01-10	57397.00000000	16.45	0.56
2016-03-02	57449.00000000	16.17	1.82
2016-03-02	57449.00000000	16.15	0.80
2016-03-02	57449.00000000	15.97	0.80
2016-03-02	57449.00000000	15.97	0.80
2016-03-02	57449.00000000	15.95	0.80
2016-03-02	57449.00000000	15.95	0.80
2016-06-26	57565.00000000	15.43	0.77
2015-12-28	57384.00000000	15.18	0.46
2016-06-26	57565.00000000	15.15	0.75
2016-07-07	57576.00000000	14.26	0.55
2016-07-07	57576.00000000	13.84	0.49
2015-12-05	57361.00000000	13.53	0.50
2015-12-06	57362.00000000	13.52	0.60
2015-11-25	57351.00000000	13.51	0.40

Continua nella prossima pagina

Tabella B.3 Continua

Data	Data (MJD)	Flusso (Jy)	Errore (Jy)
2015-11-22	57348.00000000	13.40	0.51
2015-12-05	57361.00000000	13.30	0.50
2015-12-06	57362.00000000	13.08	0.60
2015-03-09	57090.00000000	12.90	0.52
2015-01-24	57046.00000000	12.70	0.50
2014-12-29	57020.00000000	12.64	0.57
2015-04-03	57115.00000000	12.64	0.45
2015-04-22	57134.00000000	12.60	0.50
2015-04-23	57135.00000000	12.55	0.55
2014-12-10	57001.00000000	12.44	0.43
2014-12-10	57001.00000000	12.35	0.41
2015-01-29	57051.00000000	12.34	0.74
2015-04-22	57134.00000000	12.33	0.47
2014-12-28	57019.00000000	12.29	0.77
2015-04-14	57126.00000000	12.16	0.51
2015-04-03	57115.00000000	12.15	0.50
2015-01-17	57039.00000000	12.10	0.61
2015-04-23	57135.00000000	12.10	0.65
2015-01-30	57052.00000000	12.06	0.67
2015-01-30	57052.00000000	12.05	0.61
2014-12-18	57009.00000000	12.01	0.35
2014-12-18	57009.00000000	11.97	0.52
2014-12-18	57009.00000000	11.97	0.35
2015-01-30	57052.00000000	11.97	0.51
2015-01-17	57039.00000000	11.86	0.66
2015-06-02	57175.00000000	11.76	0.40
2015-01-30	57052.00000000	11.67	0.70
2015-01-30	57052.00000000	11.63	0.70
2014-12-18	57009.00000000	11.59	0.70
2015-05-14	57156.00000000	11.56	0.50
2015-05-16	57158.00000000	11.53	0.42
2015-01-30	57052.00000000	11.52	0.58
2014-11-30	56991.00000000	11.39	0.59
2015-11-01	57327.00000000	11.21	0.55
2014-12-01	56992.00000000	11.18	0.47
2014-12-01	56992.00000000	11.18	0.47
2015-06-02	57175.00000000	11.18	0.40

Continua nella prossima pagina

Tabella B.3 Continua

Data	Data (MJD)	Flusso (Jy)	Errore (Jy)
2014-11-30	56991.00000000	11.15	0.57
2015-06-04	57177.00000000	11.14	0.43
2015-06-04	57177.00000000	10.99	0.42
2015-06-15	57188.00000000	10.99	0.43
2014-12-01	56992.00000000	10.95	0.42
2014-12-01	56992.00000000	10.92	0.49
2014-12-07	56998.00000000	10.88	0.43
2015-11-05	57331.00000000	10.73	0.50
2015-11-05	57331.00000000	10.52	0.48
2015-06-16	57189.00000000	10.46	0.50
2015-06-29	57202.00000000	10.24	0.48
2015-06-29	57202.00000000	10.09	0.55
2015-07-19	57222.00000000	10.09	0.43
2015-06-28	57201.00000000	9.78	0.52
2015-07-27	57230.00000000	9.76	0.45
2015-09-05	57270.00000000	9.59	0.73
2015-09-05	57270.00000000	9.56	0.46
2015-07-19	57222.00000000	9.51	0.40
2015-08-15	57249.00000000	9.42	0.44
2015-07-04	57207.00000000	9.41	0.59
2015-09-17	57282.00000000	9.39	0.45
2015-07-18	57221.00000000	9.18	0.42
2015-09-17	57282.00000000	9.17	0.40
2015-08-30	57264.00000000	9.13	0.49
2015-08-08	57242.00000000	9.07	0.61
2015-07-27	57230.00000000	9.04	0.41
2015-07-06	57209.00000000	9.00	0.32
2015-09-26	57291.00000000	8.88	0.41
2015-09-27	57292.00000000	8.85	0.40
2015-08-15	57249.00000000	8.79	0.40
2015-09-19	57284.00000000	8.74	0.40
2015-07-18	57221.00000000	8.73	0.41
2015-09-27	57292.00000000	8.51	0.38
2013-05-10	56422.00000000	8.46	0.24
2015-07-26	57229.00000000	8.46	0.39
2015-08-08	57242.00000000	8.40	0.46
2015-09-19	57284.00000000	8.33	0.41

Continua nella prossima pagina

Tabella B.3 Continua

Data	Data (MJD)	Flusso (Jy)	Errore (Jy)
2015-08-15	57249.00000000	8.29	0.39
2013-05-11	56423.00000000	8.29	0.18
2013-02-19	56342.00000000	8.27	0.64
2012-11-21	56252.00000000	8.23	0.31
2013-02-19	56342.00000000	8.11	0.39
2013-02-19	56342.00000000	7.94	0.47
2013-05-10	56422.00000000	7.94	0.25
2013-02-28	56351.00000000	7.87	0.46
2013-05-11	56423.00000000	7.85	0.22
2013-04-22	56404.00000000	7.80	0.28
2012-12-17	56278.00000000	7.65	0.33
2013-02-28	56351.00000000	7.54	0.36
2013-04-22	56404.00000000	7.43	0.28
2012-11-21	56252.00000000	7.42	0.26
2012-06-30	56108.00000000	7.39	0.21
2013-06-11	56454.00000000	7.34	0.37
2012-12-17	56278.00000000	7.28	0.32
2013-07-05	56478.00000000	7.14	0.32
2012-08-02	56141.00000000	7.11	0.40
2012-08-02	56141.00000000	7.02	0.41
2012-12-03	56264.00000000	7.00	0.20
2013-07-05	56478.00000000	6.99	0.54
2013-12-11	56637.00000000	6.96	0.37
2012-06-30	56108.00000000	6.91	0.18
2013-06-11	56454.00000000	6.89	0.36
2014-03-07	56723.00000000	6.88	0.28
2013-10-26	56591.00000000	6.82	0.33
2013-07-05	56478.00000000	6.77	0.29
2014-04-03	56750.00000000	6.75	0.33
2014-03-20	56736.00000000	6.70	0.30
2014-06-08	56816.00000000	6.69	0.23
2014-03-07	56723.00000000	6.66	0.27
2012-07-29	56137.00000000	6.65	0.26
2014-03-20	56736.00000000	6.64	0.29
2014-02-23	56711.00000000	6.63	0.22
2014-04-03	56750.00000000	6.63	0.33
2013-07-05	56478.00000000	6.63	0.42

Continua nella prossima pagina

Tabella B.3 Continua

Data	Data (MJD)	Flusso (Jy)	Errore (Jy)
2014-06-07	56815.00000000	6.62	0.31
2014-04-03	56750.00000000	6.52	0.32
2012-10-06	56206.00000000	6.48	0.32
2014-03-20	56736.00000000	6.46	0.28
2013-10-26	56591.00000000	6.44	0.28
2014-01-10	56667.00000000	6.43	0.39
2014-05-28	56805.00000000	6.42	0.39
2014-02-23	56711.00000000	6.33	0.23
2014-03-20	56736.00000000	6.33	0.30
2014-04-03	56750.00000000	6.32	0.33
2014-06-07	56815.00000000	6.32	0.32
2012-11-02	56233.00000000	6.32	0.20
2014-08-31	56900.00000000	6.28	0.23
2014-08-31	56900.00000000	6.26	0.23
2014-09-01	56901.00000000	6.26	0.22
2013-12-11	56637.00000000	6.25	0.30
2014-05-27	56804.00000000	6.25	0.34
2014-04-30	56777.00000000	6.24	0.39
2014-05-15	56792.00000000	6.22	0.39
2014-05-27	56804.00000000	6.21	0.06
2014-05-06	56783.00000000	6.19	0.36
2013-11-28	56624.00000000	6.18	0.28
2014-03-06	56722.00000000	6.17	0.27
2014-04-26	56773.00000000	6.16	0.40
2014-04-25	56772.00000000	6.15	0.36
2013-11-14	56610.00000000	6.14	0.24
2013-10-06	56571.00000000	6.13	0.35
2014-05-28	56805.00000000	6.10	0.38
2014-01-10	56667.00000000	6.10	0.38
2014-03-25	56741.00000000	6.08	0.42
2012-07-29	56137.00000000	6.08	0.24
2014-02-03	56691.00000000	5.99	0.40
2014-08-10	56879.00000000	5.98	0.42
2014-07-16	56854.00000000	5.97	0.31
2014-06-29	56837.00000000	5.96	0.39
2014-05-15	56792.00000000	5.94	0.35
2014-04-30	56777.00000000	5.93	0.35

Continua nella prossima pagina

Tabella B.3 Continua

Data	Data (MJD)	Flusso (Jy)	Errore (Jy)
2014-07-19	56857.00000000	5.92	0.39
2014-07-19	56857.00000000	5.91	0.46
2012-08-26	56165.00000000	5.88	0.36
2014-05-06	56783.00000000	5.88	0.34
2014-03-06	56722.00000000	5.87	0.26
2013-11-14	56610.00000000	5.87	0.25
2014-04-25	56772.00000000	5.87	0.36
2014-04-26	56773.00000000	5.86	0.33
2014-07-19	56857.00000000	5.86	0.43
2012-11-02	56233.00000000	5.86	0.18
2014-02-01	56689.00000000	5.84	0.16
2013-11-28	56624.00000000	5.84	0.27
2013-10-06	56571.00000000	5.83	0.34
2014-03-25	56741.00000000	5.82	0.40
2014-02-03	56691.00000000	5.82	0.39
2014-01-12	56669.00000000	5.82	0.20
2014-06-30	56838.00000000	5.80	0.34
2014-08-10	56879.00000000	5.78	0.39
2012-10-06	56206.00000000	5.78	0.29
2014-08-16	56885.00000000	5.69	0.39
2014-06-29	56837.00000000	5.69	0.33
2014-07-16	56854.00000000	5.67	0.31
2014-07-19	56857.00000000	5.62	0.36
2014-02-01	56689.00000000	5.55	0.20
2014-06-30	56838.00000000	5.52	0.30
2012-08-26	56165.00000000	5.45	0.34
2014-08-16	56885.00000000	5.43	0.35

Tabella 4: ALMA 230 GHz

Data	Data (MJD)	Flusso (Jy)	Errore (Jy)
2016-03-27	57474.00000000	12.53	0.63
2016-05-15	57523.00000000	9.93	0.24
2016-01-22	57409.00000000	9.73	0.17
2016-01-11	57398.00000000	9.46	0.21

Continua nella prossima pagina

Tabella B.4 *Continua*

Data	Data (MJD)	Flusso (Jy)	Errore (Jy)
2015-12-28	57384.00000000	8.43	0.18
2015-11-25	57351.00000000	6.64	0.24
2015-11-15	57341.00000000	6.53	0.30
2014-12-25	57016.00000000	6.49	0.52
2015-01-18	57040.00000000	6.40	0.53
2015-05-24	57166.00000000	6.05	0.40
2015-10-15	57310.00000000	5.98	0.30
2014-12-01	56992.00000000	5.71	0.28
2015-01-18	57040.00000000	5.56	0.23
2015-01-31	57053.00000000	5.27	0.70
2014-08-17	56886.00000000	4.83	0.39
2014-03-09	56725.00000000	3.64	0.24
2012-07-29	56137.00000000	3.51	0.22
2014-05-03	56780.00000000	3.38	0.19
2014-04-28	56775.00000000	3.16	0.14
2014-01-29	56686.00000000	3.05	0.24
2012-10-06	56206.00000000	2.95	0.15
2014-07-26	56864.00000000	2.86	0.16
2014-04-04	56751.00000000	2.85	0.20
2014-07-26	56864.00000000	2.69	0.16

Tabella 5: ALMA 340 GHz

Data	Data (MJD)	Flusso (Jy)	Errore (Jy)
2016-03-25	57472.00000000	9.29	1.81
2016-03-25	57472.00000000	9.29	1.81
2016-04-15	57493.00000000	8.84	0.18
2016-03-29	57476.00000000	8.51	0.09
2016-04-27	57505.00000000	8.50	0.10
2016-04-09	57487.00000000	8.49	0.10
2016-04-22	57500.00000000	8.35	0.20
2016-04-30	57508.00000000	8.22	0.25
2016-05-13	57521.00000000	7.72	0.10
2016-03-14	57461.00000000	7.46	0.10
2016-01-26	57413.00000000	7.40	0.10

Continua nella prossima pagina

Tabella B.5 Continua

Data	Data (MJD)	Flusso (Jy)	Errore (Jy)
2016-01-10	57397.00000000	7.22	0.08
2016-05-24	57532.00000000	6.97	0.24
2016-06-05	57544.00000000	6.84	0.10
2015-12-29	57385.00000000	6.41	0.20
2016-06-26	57565.00000000	6.17	0.09
2016-07-07	57576.00000000	5.47	0.07
2016-07-06	57575.00000000	5.21	0.09
2014-12-14	57005.00000000	4.65	0.28
2014-12-21	57012.00000000	4.61	0.24
2015-11-01	57327.00000000	4.60	0.19
2014-12-21	57012.00000000	4.59	0.25
2015-05-14	57156.00000000	4.56	0.20
2014-12-08	56999.00000000	4.55	0.21
2015-05-14	57156.00000000	4.38	0.27
2015-04-22	57134.00000000	4.30	0.50
2015-01-03	57025.00000000	4.26	0.18
2014-11-30	56991.00000000	4.22	0.23
2015-06-02	57175.00000000	4.15	0.28
2015-04-03	57115.00000000	4.14	0.21
2015-06-09	57182.00000000	4.09	0.14
2015-06-13	57186.00000000	4.08	0.20
2015-06-24	57197.00000000	3.59	0.24
2015-08-29	57263.00000000	3.50	0.20
2015-07-05	57208.00000000	3.42	0.30
2015-07-25	57228.00000000	3.37	0.26
2015-08-31	57265.00000000	3.32	0.30
2015-09-26	57291.00000000	3.29	0.25
2015-06-24	57197.00000000	3.28	0.41
2015-08-04	57238.00000000	3.25	0.18
2014-08-16	56885.00000000	3.24	0.38
2015-07-27	57230.00000000	3.20	0.42
2015-09-26	57291.00000000	3.17	0.30
2015-07-19	57222.00000000	3.14	0.15
2015-08-15	57249.00000000	3.12	0.15
2013-02-19	56342.00000000	2.91	0.33
2013-04-17	56399.00000000	2.72	0.21
2012-11-17	56248.00000000	2.71	0.06

Continua nella prossima pagina

Tabella B.5 Continua

Data	Data (MJD)	Flusso (Jy)	Errore (Jy)
2014-03-06	56722.00000000	2.57	0.14
2013-05-31	56443.00000000	2.45	0.24
2014-05-06	56783.00000000	2.36	0.20
2014-02-21	56709.00000000	2.24	0.13
2014-06-03	56811.00000000	2.22	0.27
2013-05-10	56422.00000000	2.22	0.11
2014-03-20	56736.00000000	2.22	0.14
2014-07-26	56864.00000000	2.20	0.09
2014-04-25	56772.00000000	2.18	0.14
2013-11-14	56610.00000000	2.13	0.12
2014-04-29	56776.00000000	2.12	0.11
2014-05-15	56792.00000000	2.10	0.12
2014-06-28	56836.00000000	2.07	0.10
2014-06-30	56838.00000000	2.06	0.08
2014-04-09	56756.00000000	2.06	0.12
2014-07-26	56864.00000000	2.02	0.24
2014-07-26	56864.00000000	2.00	0.24
2014-04-11	56758.00000000	1.96	0.20
2014-04-25	56772.00000000	1.96	0.18
2014-05-14	56791.00000000	1.92	0.24
2013-12-11	56637.00000000	1.91	0.14
2013-10-19	56584.00000000	1.91	0.08
2014-01-11	56668.00000000	1.91	0.13
2013-12-15	56641.00000000	1.91	0.07
2014-06-08	56816.00000000	1.88	0.27
2013-11-28	56624.00000000	1.86	0.13
2012-10-06	56206.00000000	1.84	0.09
2014-05-26	56803.00000000	1.83	0.25
2014-01-11	56668.00000000	1.83	0.13
2014-07-06	56844.00000000	1.82	0.20
2013-11-03	56599.00000000	1.81	0.10
2014-05-18	56795.00000000	1.73	0.17

Bibliografia

- [1] Ghirlanda, G., et al., "The radio-gamma-ray connection in Fermi blazars". *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2011, 413, 852–862.
- [2] Ackermann, M., et al., "The Radio/Gamma-Ray Connection in Active Galactic Nuclei in the Era of the Fermi Large Area Telescope". *Astrophys. J.* 2011, 741, 33.
- [3] Giroletti, M., et al., "The Radio/Gamma-Ray Connection from 120 MHz to 230 GHz", *Galaxies*, 4, 30.
- [4] <http://sma1.sma.hawaii.edu/>.
- [5] <https://www.cfa.harvard.edu/sma/general/index.html>.
- [6] <https://www.eso.org/sci/facilities/alma/about-alma.html>.
- [7] <https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/documentation/>.
- [8] <https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/>.