

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Dipartimento
di Fisica
e Astronomia
Galileo Galilei

TESI DI LAUREA IN FISICA

Caratterizzazione dell'emissione in multifrequenza del blazar gamma PG 1553+113

LAUREANDO

Francesco Maria Salion

Matricola studente 2000383

RELATORE

Dott.ssa Elisa Prandini

ANNO ACCADEMICO
2023/2024

*Questo lavoro è dedicato a tutti coloro
che mi hanno sempre accompagnato
in questo percorso.*

*A mamma e papà, le due colonne
portanti della mia vita.*

*A tutti i miei nonni, che mi hanno
sempre riempito d'affetto.*

Abstract

Il presente lavoro di tesi vuole esplorare il complesso mondo dei Nuclei Galattici Attivi (AGN), concentrandosi su un affascinante esemplare: il blazar PG 1553+113. Si vuole inizialmente verificare la variabilità emissiva di PG 1553+113 in più bande, per poi passare ad una valutazione della lognormalità nei dati allo scopo di testare modelli d'emissione. A tal fine si sono effettuati studi sistematici dei dati di diversi esperimenti, valutandone i possibili bias. Con la presente trattazione si giungerà a sostenere la variabilità di PG 1553+113, la lognormalità del flusso osservato nella banda delle alte energie ($100 \text{ MeV} < E < 100 \text{ GeV}$) e la non lognormalità nella banda delle altissime energie ($E > 100 \text{ GeV}$) mentre nella banda X l'andamento della distribuzione dei flussi osservati meriterebbe un ulteriore approfondimento. Infine si è voluta analizzare una possibile relazione tra la radice della varianza della distribuzione lognormale e il flusso di un AGN. Si riuscirà infine a proporre una relazione funzionale tra le due quantità.

Indice

1	Introduzione	1
2	Nuclei Galattici Attivi (AGN)	4
2.1	Morfologia di un AGN	4
2.2	Tipologia di AGN	7
2.3	Emissione nei jets dei blazar	9
2.4	PG 1553+113 in breve	10
3	Curve di luce multibanda di PG 1553+113	12
3.1	Presentazione dei dati	12
3.2	Analisi delle curve di luce	14
4	Distribuzioni dei flussi	17
4.1	Distribuzione lognormale	17
4.2	Lognormalità dei dati <i>Fermi</i> -LAT	19
4.3	Lognormalità nei dati MAGIC e <i>Swift</i> -XRT	21
4.4	Verifica dei bias nei dati di MAGIC	23
5	Relazione $\tilde{\sigma}$-flusso	25
5.1	Idea di base e sorgenti utilizzate	25
5.2	Ipotesi di linearità $\tilde{\sigma}$ -flusso	28
6	Conclusioni	30
	Ringraziamenti	i
	Bibliografia	i



Introduzione

*"In the darkness of the unknown,
we will find the light of discovery.
Astrophysics is our lantern
on the path of cosmic exploration."*

Stephen Hawking

Il cosmo, con i suoi infiniti misteri, ha ispirato generazioni di ricercatori a scrutare l'universo e cercare di svelare i segreti più profondi della sua struttura. In questo viaggio, uno degli enigmi più affascinanti è rappresentato dai Nuclei Galattici Attivi (AGN), cuori di galassie che celano al loro interno fenomeni straordinari. Gli AGN sono regioni compatte al centro delle galassie che emettono energia che copre tutto lo spettro elettromagnetico, ossia onde radio, infrarossi, visibile, ultravioletto, raggi X e gamma. Con il nome AGN si accomunano più corpi celesti in un unico insieme, tra questi radiogalassie e blazar. Secondo il modello unificato, gli AGN hanno tutti la stessa struttura di base: sono costituiti da un buco nero supermassiccio (SMBH acronimo di *"Super Massive Black Hole"*) circondato da uno spesso toro di polveri al centro del quale vi è il disco di accrescimento del buco nero e nel 10% dei casi da un jet ultrarelativistico altamente energetico e molto collimato. Secondo questo modello, l'unica differenza nell'aspetto di un determinato AGN è l'orientazione che questo ha rispetto ai noi: le radiogalassie presentano il jet perpendicolarmente rispetto al piano di osservazione terrestre (ovvero rispetto ai nostri telescopi) e quindi riusciamo a captare solo la radiazione emessa "di taglio" rispetto al piano della sorgente; i blazar sono lo stesso fenomeno con la differenza che il jet ultrarelativistico è puntato e ben collimato verso la Terra, rendendo l'energia rivelata più concentrata e intensa. Questo lavoro di tesi riguarda un oggetto specifico: PG 1553+113, un blazar situato a redshift $z \approx 0.43$ [8]. Tra le caratteristiche peculiari di tale blazar abbiamo:

- ▶ In quanto blazar, la radiazione elettromagnetica che arriva a noi è dominata dall'emissione del getto. Pochi sono i blazar che osserviamo con emissioni energetiche fino alle energie del TeV e PG 1553+113 è una di queste.
- ▶ La variabilità del segnale emesso ha un periodo di circa 2.2 anni fatto che lo rende appetibile per uno studio nel breve periodo;
- ▶ PG 1553+113 è uno dei possibili blazar con un sistema binario di SMBH che spiraleggiano, questo fatto lo pone come oggetto interessante anche per studi di onde gravitazionali.

In questa tesi sono stati utilizzati dati ottenuti da differenti telescopi, quali MAGIC, *Fermi*-LAT e *Swift*-XRT.

- ▶ MAGIC, acronimo di "*Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov telescope*", è un sistema di due telescopi situato a La Palma dal diametro di 17 metri l'uno. Il primo è entrato in funzione nel 2003 mentre il secondo nel 2009. MAGIC punta a oggetti che emettono raggi gamma da 30 GeV fino a 100 TeV. Lo spettro di ricerca di MAGIC è quindi quello delle VHE, acronimo di "*Very High Energy*".
- ▶ *Fermi* Gamma-ray Space Telescope (FGST) è un telescopio spaziale che effettua osservazioni in orbita terrestre. Lo strumento principale montato su di esso è LAT, acronimo di "*Large Area Telescope*". In funzione dall'11 Giugno 2008, LAT è un rilevatore di raggi gamma con energie che variano dai 20 MeV ai 300 GeV. Lo spettro di ricerca del *Fermi*-LAT è dunque quello delle gamma HE, acronimo di "*High Energy*".
- ▶ *Swift* è un satellite dedicato allo studio dei raggi gamma ed è equipaggiato con 3 telescopi, tra cui XRT (acronimo di X-ray Telescope), prodotto in collaborazione tra varie università. Lo spettro di ricerca di *Swift*-XRT è quindi quello dei raggi X.

In questo manoscritto procederò dunque elencando le caratteristiche base di un AGN, per poi addentrarmi nella definizione di cosa sia un blazar. Successivamente mi soffermerò sulle dinamiche all'interno di un getto e dei conseguenti dati che andremo ad utilizzare al fine di giungere ai seguenti obiettivi:

- ▶ Studiare la distribuzione dei flussi del jet registrato con i telescopi MAGIC, *Fermi*-LAT e *Swift*-XRT, al fine di verificare la plausibilità dell'ipotesi di un andamento lognormale degli stessi. Come discuterò meglio successivamente, la lognormalità dei valori del flusso di un getto di un blazar è legata alla presenza di processi moltiplicativi nella produzione di fotoni che poi noi osserviamo e fornisce preziose informazioni sui meccanismi fisici responsabili delle emissioni;

- ▶ Valutare l'effetto di un campionamento non regolare dei dati sulla distribuzione dei flussi. Ovvero si vuole verificare se il cambio di campionamento dei flussi registrati da MAGIC ci permette di avere una statistica tale da ottenere le medesime considerazioni di un campionamento regolare come quello effettuato da *Fermi*-LAT;
- ▶ Verificare se la relazione tra la radice della varianza e il valore medio di una distribuzione lognormale per il flusso emesso da un oggetto BL-Lac, utilizzando dati raccolti dal telescopio *Fermi*-LAT. Nello specifico, per questo studio sono stati utilizzati i dati di 10 sorgenti, tra cui PG 1553+113 [14] [3].



Nuclei Galattici Attivi (AGN)

*"The beauty of astronomy
is that anybody can go out
and look up and see the universe."*

Edwin Hubble

2.1 MORFOLOGIA DI UN AGN

I Nuclei Galattici Attivi sono centri di galassie estremamente luminosi e alimentati dall'accrescimento di SMBH. Come detto in precedenza, alcuni di questi generano dei getti ultrarelativistici di materia che viene espulsa a velocità vicine a quelle della luce e che si estendono per distanze che possono raggiungere i megaparsec al di fuori delle galassie di cui sono il centro. Il modello unificato degli AGN, proposto nell'articolo [13], suggerisce uno schema comune a queste tipologie di oggetti.

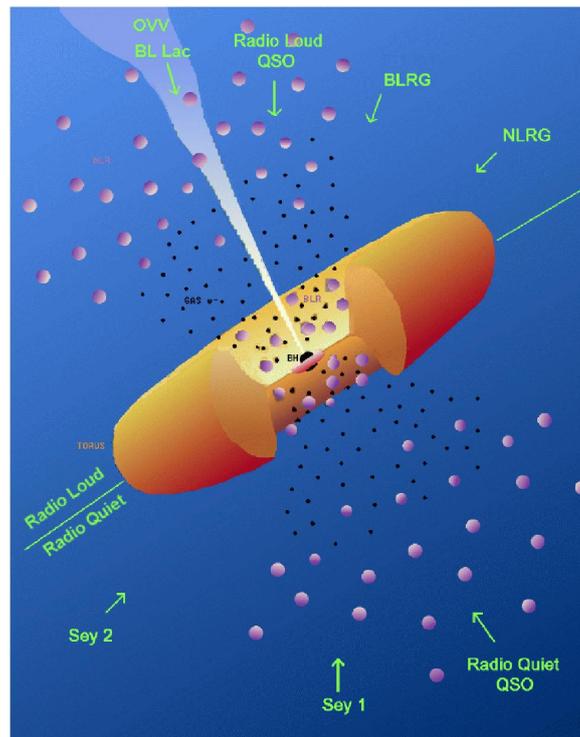


Figura 2.1: Schema delle componenti di un AGN secondo il modello unificato con relativa suddivisione nelle varie tipologie [2].

Si può allora descrivere la struttura di base [6]:

- ▶ Un buco nero supermassiccio, con massa generalmente compresa tra 10^6 e 10^{10} masse solari, responsabile dell'attrazione gravitazionale della materia circostante. Tale buco nero è possibile che ruoti con un certo spin. Inoltre, come visto per PG 1553+113, è possibile ipotizzare che per alcuni AGN vi siano addirittura due SMBH che formano un sistema binario [12].
- ▶ Un disco di accrescimento nel quale i processi dissipativi trasportano la materia verso il SMBH e il momento angolare verso l'esterno, scaldando il disco di accrescimento. Lo spettro emesso dal disco si comporta come somma di più spettri di corpo nero con picchi differenti in base alle diverse temperature della materia. La zona interna, la più calda del disco, è quindi formata da materia nello stato di plasma che successivamente, superato il raggio di Schwarzschild, accresce inesorabilmente il buco nero. La luminosità del disco di accrescimento dipende in prima approssimazione da due fattori: il tasso di accrescimento di massa M e l'efficienza η [10], secondo la relazione:

$$L_{disk} \approx \eta M c^2 \quad (2.1)$$

Dove M è il tasso di accrescimento, solitamente misurato in masse solari per anno (con valori tipici di decine di masse solari annue) mentre l'efficienza ha valori che si aggirano attorno a η

2.1. MORFOLOGIA DI UN AGN

≈ 0.1 . Il processo di accrescimento è autoregolato. Il motivo è che la luminosità del disco ha un certo limite detto *Luminosità di Eddington* $L_{Eddington}$ che dipende dalla sola massa del SMBH tale per cui vige la relazione:

$$L_{disk} < L_{Eddington} \quad (2.2)$$

La causa di questo limite è da ritrovarsi nel bilanciamento tra la pressione di radiazione (che agisce principalmente sugli elettroni nel plasma) e la gravità del buco nero (che invece influenza maggiormente i protoni).

- ▶ Una corona di raggi X situata sopra e sotto il disco d'accrescimento, che si suppone essere uno strato a temperatura più elevata rispetto al disco stesso. Si è introdotto il concetto di corona di raggi X per spiegare l'alta emissività X degli AGN che altrimenti non avrebbe trovato riscontro nelle dinamiche di accrescimento. L'origine della corona di raggi X è ancora incerta.
- ▶ La regione chiamata *Broad Line Region* (BLR). Una zona di piccole nubi di materia con distanza di circa 1 parsec dal SMBH che ruotano rapidamente con velocità di circa 3000 Km/s. La principale caratteristica della BLR è quella di intercettare circa il 10% della radiazione proveniente dal disco e rimetterla sotto forma di linee.
- ▶ La regione chiamata *Narrow Line Region* (NLR). Concettualmente simile alla BLR ma con alcune differenze. Si trova più lontano (circa 100 parsec), è composta da piccole nubi di materia che si muovono più lentamente e sono meno dense delle precedenti. La larghezza delle righe è pertanto ridotta.
- ▶ Un toro di materia, principalmente polvere e gas, in rotazione attorno al buco nero molto distante rispetto al disco di accrescimento. Grazie alla densità e alla opacità di questa zona, l'emissione altresì isotropa del disco rimane convogliata solo in due coni di ionizzazione, zone in cui la radiazione prodotta dagli effetti di accrescimento non incontra la materia. La radiazione che incontra il toro viene invece assorbita e riemessa nell'infrarosso.
- ▶ I jets sono getti di materia a velocità ultrarelativistiche e molto collimati e perpendicolari al piano del disco accrescimento. Circa il 10% degli AGN sono in grado di espellere la materia mediante due getti in direzioni opposte. Questi getti sono evidenti nelle osservazioni con radiotelescopi e per questo motivo gli AGN che possiedono tali conformazioni sono detti "*radio-loud*" mentre quelli che non ne possiedono non emettono onde radio per cui sono detti "*radio-quiet*". Si analizzerà meglio le caratteristiche dei jets successivamente [9].

2.2 TIPOLOGIA DI AGN

Sono stati precedentemente già citati blazar e radiogalassie come tipi di AGN. Oltre a questi ve ne sono altri come mostrato in figura 2.1, i quali non verranno trattati poiché non attinenti agli obiettivi di questa tesi. Concentreremo l'attenzione su quasar e blazar.

Il termine quasar è originato dalla condensazione in una parola del termine "*Quasi-Stellar radio source*". Dai telescopi appaiono come normali punti luminosi di aspetto stellare (figura 2.2) ma lo spettro, data l'enorme distanza tra noi e tali oggetti, è notevolmente spostato verso il rosso. Questo è dovuto al fatto che i quasar sono lontani da noi miliardi di anni luce e perciò sono soggetti ad un redshift molto alto. Da qui la denominazione di "*quasi-stelle*" mentre "*radio source*" deriva dal fatto che la prima nota osservazione di un quasar, effettuata da Marteen Schmidt nel 1963 di 3C 273, è stata eseguita mediante l'uso di radiotelescopi.

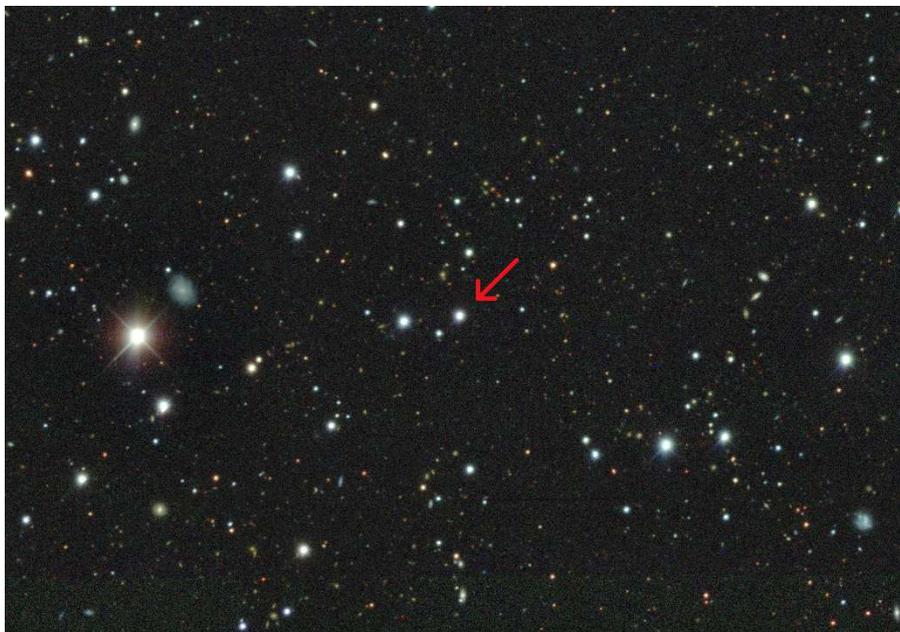


Figura 2.2: Le radiogalassie e i blazar hanno l'apparenza di stelle perché la loro elevata luminosità è tale da offuscare quella dell'intera galassia che li ospita, come si può vedere in questa immagine in ottico di PG 1553+113. Immagine ottenuta in https://firmamento.hosting.nyu.edu/data_access.

Negli anni '50 i primi radiotelescopi furono utilizzati per catalogare molte radiosorgenti di natura sconosciuta e con spettri apparentemente bizzarri. All'inizio degli anni '60 furono identificate parte di queste sorgenti come nebulose, resti di supernova o radiogalassie. Nel 1960, Allan Sandage e Thomas A. Matthews scoprirono che vi era un oggetto nel catalogo delle sorgenti radio che corrispondeva nell'ottico ad un corpo luminoso blu molto debole, dall'apparenza stellare e con uno spettro ricco di righe di emissione molto peculiare rispetto a tutte le altre radiosorgenti. Solo successivamente 3C 48 venne classificato come blazar. Nel 1963 la natura dei quasar fu scoperta grazie all'astronomo Maarten Schmidt nello studio del redshift della sorgente 3C 273. Egli suppose infatti che tale redshift

2.2. TIPOLOGIA DI AGN

fosse dovuto all'effetto Doppler, tale fatto avrebbe significato che tale sorgente si stesse allontanando da noi con ≈ 48000 Km/s. La velocità era troppo elevata per una stella per cui il corpo sarebbe stato di origine extragalattica.

Il termine blazar, coniato nel 1978 dall'astronomo Ed Spiegel, è la contrazione dall'inglese di "blaze", ovvero fiamma e "quasar" per indicare la peculiare caratteristica dell'emissione fortemente variabile. Proprio perchè le prime osservazioni di alcuni blazar sono state effettuate con radiotelescopi, inizialmente si credeva che tali sorgenti fossero "radio-loud", ovvero con alte emissioni radio. Ad oggi sappiamo che solo il 10% degli AGN sono di questo tipo, mentre la maggioranza è definita "radio-quiet". In altre parole, le prime osservazioni di AGN erano tutte principalmente blazar che quindi emettevano nella banda radio. Ma le emissioni radio prodotte dai jets sono solo una piccola frazione dell'intero spettro elettromagnetico, che a sua volta è solo una frazione dell'intera energia convogliata nel jet di un blazar. Molta di questa energia si crede sia contenuta in forma di energia cinetica della materia accelerata relativisticamente e dal movimento del campo magnetico, ossia lo spostamento del vettore di Poynting.

Per descrivere la differenza tra le due principali tipologie di blazar è stato introdotto il concetto di EW (acronimo di "equivalent width of a line"), definito come:

$$EW = \int \frac{\Phi_0 - \Phi_\lambda}{\Phi_0} dx \quad (2.3)$$

Dove Φ_0 è il flusso del jet nel continuo mentre Φ_λ è quello totale, somma della linea d'emissione e del continuo. Questo valore consiste nell'area sottesa alla curva in un grafico con intensità misurata e lunghezza d'onda in relazione con il continuo. Maggiore è l'ampiezza della linea e la profondità, maggiore sarà l'EW associato. Il valore così ottenuto ci permette di distinguere due classi di blazar:

- ▶ Oggetti BL Lac, altresì definiti Lacertiti, scoperti inizialmente come stelle variabili nel 1929 da Cuno Hoffmeister. Hanno la caratteristica di avere uno spettro continuo, con linee di assorbimento deboli o assenti, ed ampie variazioni di luminosità sull'intero spettro elettromagnetico. Per questo motivo sono definiti BL Lac i blazar aventi $EW < 5\text{\AA}$. Tra le circa 300 sorgenti γ -detected al TeV, approssimativamente una settantina sono blazar BL Lac, come PG 1553+113.
- ▶ FSRQ, acronimo di "Flat Spectrum Radio Quasar", aventi linee d'emissione più forti con un $EW > 5\text{\AA}$ (sono circa 10, numero acquisito in <http://tevcat.uchicago.edu/>).

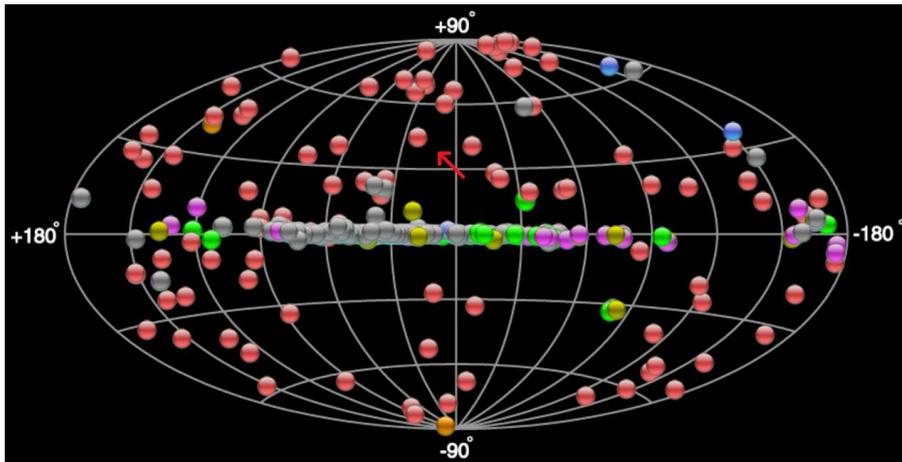


Figura 2.3: Un esempio grafico del catalogo delle sorgenti al TeV osservate ad oggi. In rosso troviamo un insieme di sorgenti blazar, FSRQ, BL-Lac, , tra i quali identifichiamo anche PG 1553+113. Immagine ottenuta in <http://tevcat.uchicago.edu/>

2.3 EMISSIONE NEI JETS DEI BLAZAR

La radiazione elettromagnetica che osserviamo nei BL-Lac è dovuta soltanto a quella emessa nel getto. La materia viene convogliata e accelerata mediante processi che creano due picchi nella curva della SED (acronimo di *"Spectral Energy distribution"*) dei blazar, ovvero la distribuzione spettrale totale dell'oggetto [5].

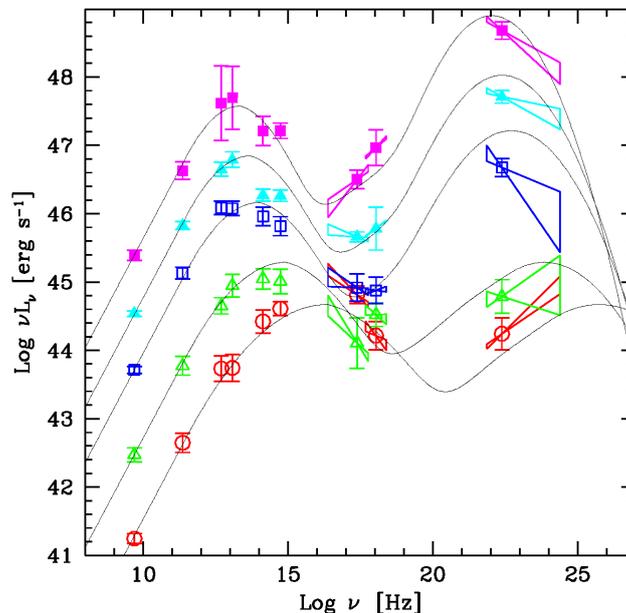


Figura 2.4: Un esempio di SED tratto da [5] che rappresenta la presenza dei due picchi. In figura è rappresentata la SED, che consiste nel graficare l'andamento del logaritmo della frequenza d'emissione osservata e luminosità (tipicamente espressa in erg s^{-1}) in funzione del logaritmo della frequenza.

2.4. PG 1553+113 IN BREVE

Il motivo per il quale la curva ha questo aspetto a doppio picco è stato oggetto di dibattito tra i fisici. Sono stati proposti due modelli:

- ▶ Modello Leptonico che pone come principali fattori di quanto osserviamo i leptoni (sostanzialmente elettroni e positroni). Si assume che la regione emittente sia una sfera in movimento a velocità relativistica verso l'osservatore. La forma spettrale sperimentalmente osservata di può interpretare come una quantità di elettroni che diminuisce con l'aumentare dell'energia, riassumendo il tutto con una distribuzione a "legge di potenza". Tale modello attribuisce la produzione dei raggi gamma a due processi fisici che descriveremo a breve;
- ▶ Modello Adronico in cui le particelle responsabili dell'emissione sono gli adroni (come protoni, pioni, etc...) che non considereremo nel corso della trattazione. Il modello adronico è una delle possibili spiegazioni per la produzione di raggi gamma nei blazar. Si vuole solamente sottolineare l'importanza di tale modello per l'astrofisica multimessaggera, la quale studia i molteplici messaggeri che ci possono arrivare dal cosmo, come raggi cosmici, muoni, neutrini, onde gravitazionali e radiazione elettromagnetica.

Tra i vari messaggeri cosmici esistenti, nel corso di questa tesi ci soffermeremo a studiare la radiazione luminosa, suddivisa in bande energetiche e verificheremo se le proprietà emissive dei blazar sono le stesse per ognuna di queste. Nella tesi assumeremo il modello leptonico più semplice, denominato SSC, acronimo di Synchrotron Self-Compton, consistente in due processi: l'emissione di sincrotrone, altresì conosciuta come "*magnetobremstrahlung radiation*", e al processo di SCS, acronimo di Self-Compton Scattering.

L'emissione di sincrotrone corrisponde al primo picco nella SED, con un'ampiezza generica che spazia dall'infrarosso all'X. Consiste in radiazione elettromagnetica emessa relativisticamente da particelle cariche nel jet come positroni ed elettroni. Il Self-Compton Scattering corrisponde al secondo picco e consiste nell'interazione tra gli stessi fotoni emessi dalla "*magnetobremstrahlung radiation*" che tornano ad interagire nuovamente con gli elettroni e positroni.

2.4 PG 1553+113 IN BREVE

Si vogliono ora ricapitolare in breve le caratteristiche di PG 1553+113, il blazar del tipo BL-Lac protagonista di questo lavoro. La sorgente è stata scoperta nel 1986 dal telescopio Palomar-Green e inizialmente categorizzata come "*UV-excess stellar object*" e nello specifico BL Lac. PG 1553+113 è una delle poche sorgenti ad essere state osservate fino all'energia del TeV. Il suo redshift è stato oggetto di discussione a lungo; ad oggi la stima ufficiale, presentata in [8], è di ≈ 0.43 . Utilizzando la legge di Hubble¹ si ottiene una distanza dalla Terra di circa 1.92 Gpc ($\approx 6 \cdot 10^{19}$ km). Inoltre, nonostante

¹ $z = \frac{H_0 D}{c}$ è una relazione lineare tra lo spostamento verso il rosso della luce emessa da una sorgente (detto redshift) e la sua distanza D . H_0 è invece la costante di Hubble, cui valore è $\approx 67.14 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

la conosciuta variabilità dei flussi energetici dei blazar, PG 1553+113 ha una caratteristica ancora più interessante rispetto a molte altre sorgenti: si pensa possa essere una delle poche con un flusso avente una variabilità periodica. Il periodo è stato stimato di circa 2.2 anni e tra le varie motivazioni la più papabile è quella di [12] in cui si sostiene la possibilità di avere un blazar con motore centrale non un SMBH bensì due che, interagendo, producono tali variazioni. Mostrerò poi che la periodicità di PG 1553+113 si estende in più bande, soffermandomi sulle caratteristiche dei "flares". I "flares" sono considerabili come un significativo aumento del flusso di un blazar, solitamente parti ad un fattore 2-3 rispetto al valore medio della distribuzione dei flussi.



Figura 2.5: SED di PG 1553+113 ottenuta in <https://tools.ssd.cas.ac.cn/SED/>. I diversi colori presenti indicano i vari strumenti utilizzati per acquisire i dati.



Curve di luce multibanda di PG 1553+113

*"The most exciting phrase
to hear in science,
the one that heralds new discoveries,
is not 'Eureka!' but 'That's funny...'"*

Richard Feynman

3.1 PRESENTAZIONE DEI DATI

La radiazione elettromagnetica emessa dai blazar nelle modalità descritte nel paragrafo precedente ha come caratteristica saliente la variabilità temporale nelle diverse lunghezze d'onda. Al fine di caratterizzare tale variabilità si analizzano solitamente curve di luce e distribuzioni dei flussi. Le curve di luce sono grafici contenenti la data d'acquisizione del segnale nell'asse delle ascisse (espressa in MJD, acronimo di "Modified Julian Date", dove 1 MJD corrisponde a 24 ore ad esempio oggi, giorno 11/04/2024, siamo in 60411 MJD) e il valore misurato del flusso ad una data energia nell'asse delle ordinate (espresso in $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$). Le distribuzioni dei flussi hanno un ruolo chiave per comprendere i processi di variabilità che si innescano negli AGN. Una distribuzione "normale" o "Gaussiana" sarebbe indice dell'avvenimento di processi additivi di componenti che formano l'emissione osservata. La distribuzione "lognormale", d'altra parte è invece ottenibile se i processi alla base delle emissioni fossero moltiplicativi o a cascata [14]. Nella successiva analisi, tali distribuzioni saranno rappresentate da istogrammi aventi il valore del flusso sull'asse delle ascisse e il conteggio dati aventi valore che ricade all'interno del bin sull'asse delle ordinate.

Come detto in precedenza, in questo lavoro sono stati utilizzati dati acquisiti da varie strumentazioni come *Fermi-LAT*, *MAGIC* e *Swift-XRT*. Le curve di luce ottenute sono riportate in 3.1:

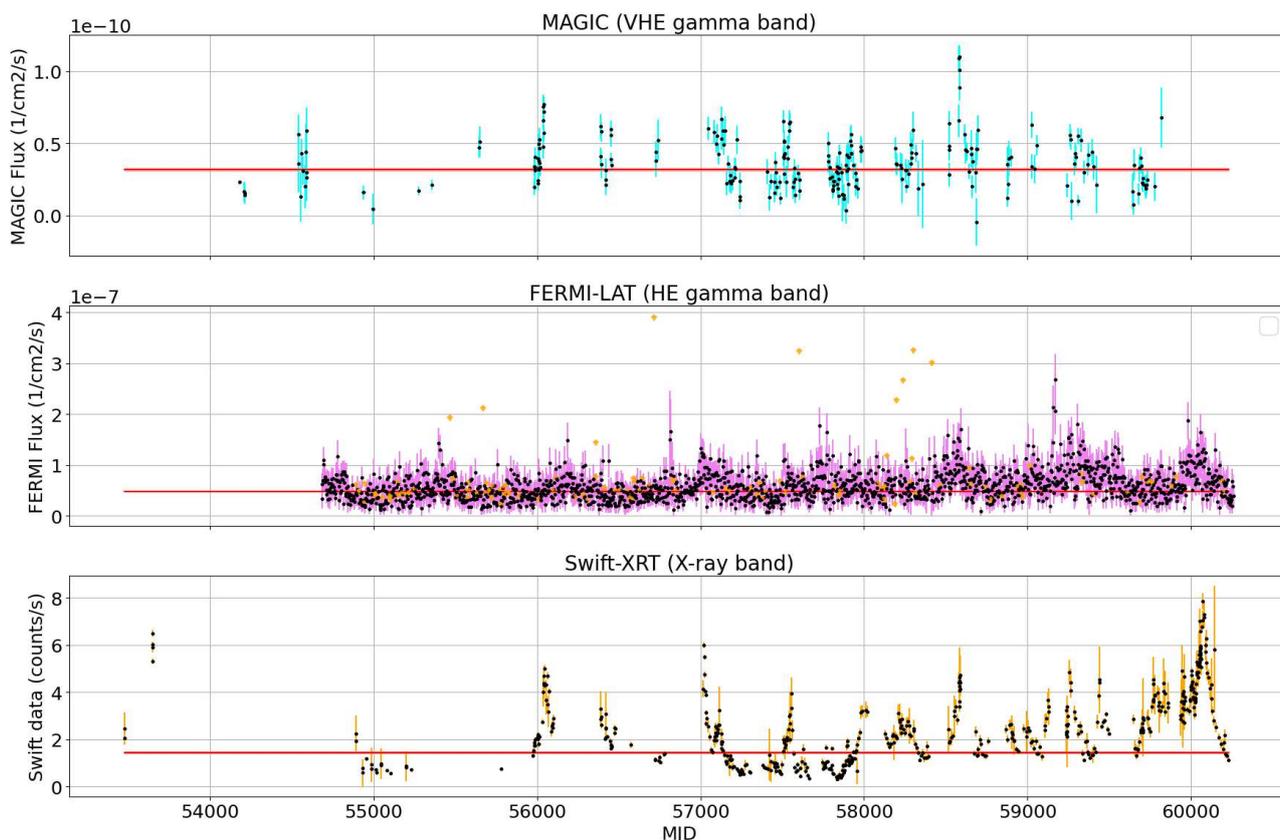


Figura 3.1: Curve di luce multibanda che rappresentano le bande VHE, HE e X di PG 1553+113 rispettivamente nei colori azzurro, violetto e giallo. La linea rossa rappresenta il fit costante. I dati spaziano lungo l’arco temporale da Aprile 2005 fine 28 agosto 2022. Da notare l’intensificamento dei dati acquisiti dopo il 2015 (≈ 57000 MJD) nelle bande coperte da MAGIC e *Swift*-XRT. I grafici sono stati ideati e prodotti interamente dal candidato.

La linea rossa rappresenta il fit costante dei dati ottenuto mediante media pesata¹, ovvero il flusso medio di radiazione elettromagnetica osservata. In azzurro troviamo i dati acquisiti da MAGIC. Il motivo della presenza di zone senza dati nella curva di luce di MAGIC è duplice: da una parte il fatto che questo sia uno strumento di terra permette una adeguata visione di PG 1553+113 solo in alcuni periodi dell’anno e in buone condizioni atmosferiche (figura 3.2), dall’altra vi è il fatto che prima del 2015 il telescopio veniva puntato verso PG 1553+113 solo quando richiesto mentre dopo tale data si è iniziato un campionamento sistematico.

In violetto i dati di *Fermi*-LAT comprensivi di “upper limits”, ovvero dati che si riferiscono a stime superiori di quantità osservate che indicano un flusso compatibile con lo zero. Si specifica che nell’analisi dei dati non si terrà conto di tali valori. Torneranno invece utili per caratterizzare diverse tipologie di sorgenti: nel momento in cui una sorgente presenti molti “upper limits”, questa

¹Tutti i codici prodotti sono resi pubblici e reperibili in https://github.com/CapHarlock27/Salion_PG1553_thesis_codes

3.2. ANALISI DELLE CURVE DI LUCE

è usualmente poco intensa, dunque quanto osserviamo è affetto da incertezze tali da non poter considerare affidabili molti dati. Lo studio visivo delle curve in 3.1 permette di notare che la curva ottenuta dai dati di *Fermi*-LAT è continua, con binning di 3 giorni scelto dal candidato. Il motivo di tale continuità risiede nel fatto che *Fermi*-LAT è uno strumento in orbita per cui può osservare il cosmo in maniera costante, a differenza dei telescopi di terra come MAGIC. Infine in giallo troviamo i dati di *Swift*-XRT, questi non sono posti come un flusso di fotoni che incontra il rilevatore, bensì come semplice conteggio del numero di fotoni impattanti sullo strumento al secondo per ogni rilevazione (Counts/s oppure Hertz).

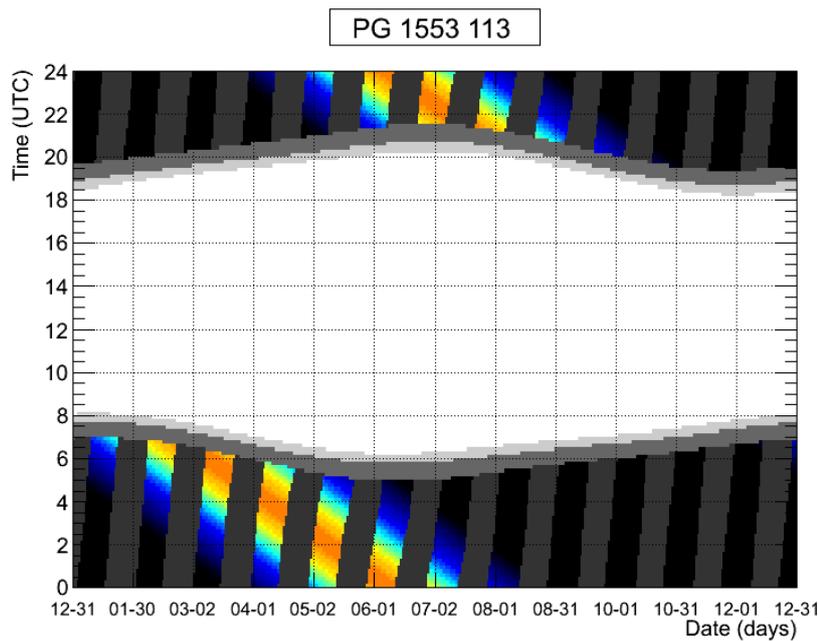


Figura 3.2: Grafico di visibilità annuale di PG 1553+113 con il telescopio MAGIC. Si vede come nei mesi da fine agosto a fine gennaio sia impossibile registrare radiazione elettromagnetica proveniente da PG 1553+113. Grafico estratto da <http://tevcat.uchicago.edu/?mode=1&showsrc=102>

3.2 ANALISI DELLE CURVE DI LUCE

Dalla sola osservazione dei grafici si evince che PG 1553+113 è una sorgente variabile in più lunghezze d'onda. Nello specifico, nel grafico di *Fermi*-LAT è visibile la periodicità stimata nell'articolo [9] di ≈ 2.2 anni mentre non si osserva in modo evidente nelle bande coperte da MAGIC e *Swift*-XRT. La spiegazione di tale periodicità è descritta nell'articolo [12], ed è interpretabile come dovuta alla presenza di un sistema binario di SMBH di dimensioni rispettivamente 10^7 e 10^8 masse solari. I modelli teorizzati per spiegare la variabilità del flusso di PG 1553+113 sono principalmente due:

- Modello "single jet". Il buco nero più massivo produce un getto mentre l'altro ne è privo. Il buco nero più piccolo esercita una forza periodica sul compagno più massiccio che provoca delle instabilità magnetoidrodinamiche (MHD) e cinetiche. In altre parole quando si avvicinano, la

presenza di quello più piccolo perturba il jet di quello più grande, dando luogo ai fenomeni osservati. Secondo questo modello ciò che noi osserviamo sarebbe quindi il periodo di rotazione del buco nero meno massiccio attorno a quello più imponente con periodo $T \approx 2.2$ anni.

- Modello "double jet". In questo caso si suppone che anche il buco nero più piccolo abbia un proprio getto, il quale esegue una precessione attorno al compagno. Secondo questo modello ciò che noi interpretiamo come picchi del flusso di PG 1553+113 non sono altro che energia aggiuntiva che giunge noi quando il secondo SMBH si trova nel periastro (punto dell'orbita in cui è più vicino al più grande SMBH).

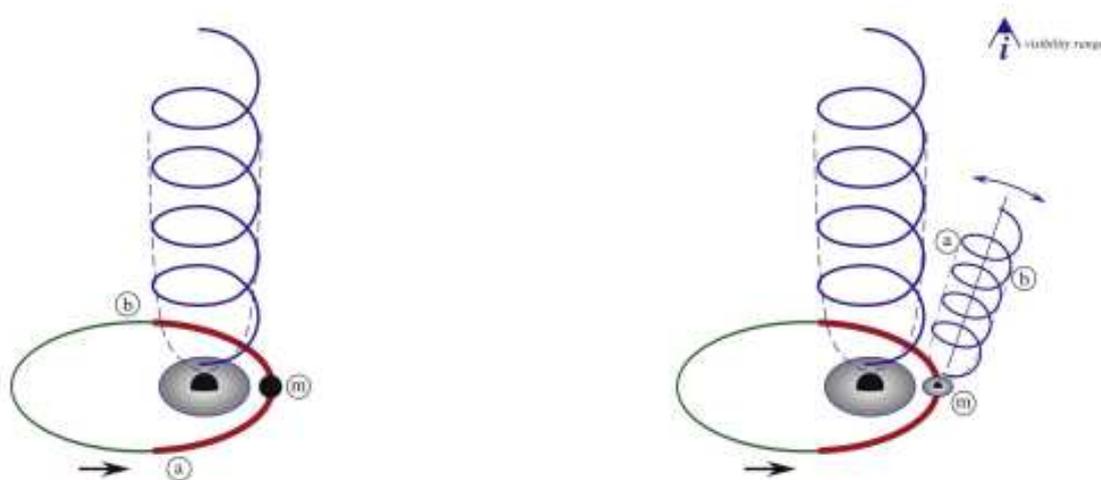


Figura 3.3: Immagine tratta da [12], raffigurante i due modelli proposti per la spiegazione della periodicità di PG 1553+113.

I parametri dei fit sono riassunti in tabella 3.1:

Rilevatore	Flusso medio	χ^2	ndof	χ^2 ridotto	p-value
MAGIC	$(3.2 \pm 0.1) \cdot 10^{-11} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	1427.8	237	6.0	$< 10^{-6}$
Fermi-LAT	$(4.82 \pm 0.06) \cdot 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	2430.6	1722	1.4	$< 10^{-6}$
Swift-XRT	$(1.44 \pm 0.05) \text{ counts/s}$	48020.5	505	95.1	$< 10^{-6}$

Tabella 3.1: Tabella contenete i risultati dei fit costanti delle curve di luce con relative incertezze. È stato poi eseguito un test del χ^2 al fine di verificare l'ipotesi di costanza ed effettuato il calcolo del p-value per verificare se il risultato ottenuto sia o meno attendibile.

Dai risultati si può evincere che l'ipotesi che PG 1553+113 abbia un'emissione costante non è avvalorata dalle osservazioni. Infatti il test del chi quadro per MAGIC e Swift-XRT offre risultati non compatibili con l'ipotesi di costanza dei dati mentre per il set di dati di Fermi-LAT restituisce un risultato che si avvicina maggiormente alla costanza. L'elevato numero di gradi di libertà di ogni set di dati ci vuole far intendere che la PDF della curva del χ^2 è estremamente piccata nel punto medio corrispondente con il numero di gradi di libertà per cui un minimo spostamento del chi quadro

3.2. ANALISI DELLE CURVE DI LUCE

rispetto a quel valore ci dà p-values estremamente piccoli che ci indicano come i tre set di dati non siano compatibili con l'ipotesi nulla, ossia quella di costanza.

In aggiunta, in figura 3.1 si può anche notare la presenza di episodi molto luminosi ("*flares*") in tutte le frequenze osservate. Ad esempio in 59171.5 MJD oppure in 59202.5 MJD, nella banda VHE osserviamo valori di flusso rispettivamente $2.68 \cdot 10^{-7}$ e $1.41 \cdot 10^{-7}$, molto al di sopra dei flussi medi stimati dai fit.

In sostanza si può concludere che PG 1553+113 sia una sorgente al TeV di raggi gamma variabile e soprattutto periodica [8].

4

Distribuzioni dei flussi

*"An instant repeated
over time becomes eternal.
That is freedom."*

Leiji Matsumoto

4.1 DISTRIBUZIONE LOGNORMALE

Vogliamo ora entrare nel cuore della discussione, parlando delle distribuzioni dei flussi della sorgente PG 1553+113, il blazar principale della discussione. Per quanto concerne l'emissione multi-frequenza da blazar, e in particolare da oggetti BL Lac, diversi studi sembrano indicare la lognormalità del flusso in banda X, ad esempio [7]. In questo lavoro, si vuole testare l'ipotesi di lognormalità o normalità delle distribuzioni dei flussi utilizzando i dati nelle diverse bande energetiche a nostra disposizione (X-ray e raggi gamma HE e VHE). Come detto in precedenza, una distribuzione normale dei dati implicherebbe l'avvenimento di fenomeni additivi alla base della produzione dei raggi gamma mentre una lognormale suggerirebbe la presenza di fenomeni moltiplicativi; in altri termini è approssimabile come prodotto di molte variabili aleatorie indipendenti [7]. Un'importante caratteristica della lognormale è quella di essere considerabile, come suggerito dalla stessa denominazione, come il logaritmo naturale di una distribuzione normale. Inoltre questo tipo di distribuzione possiede una peculiare "coda" che ne segnala l'asimmetria. Le PDF, acronimo di "Probability Density Functions", delle funzioni normale e lognormale sono descritte come:

$$f_{norm}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad f_{lognorm}(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.1)$$

4.1. DISTRIBUZIONE LOGNORMALE

È doveroso notare che μ e σ sono da considerare come valore d'aspettazione e deviazione standard della distribuzione normale. I corrispettivi momenti della distribuzione lognormale sono ricavabili dalla funzione generatrice dei momenti, con risultati:

$$\tilde{\mu} = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}} \quad \tilde{\sigma}^2 = (e^{\sigma^2} - 1)e^{2\mu + \sigma^2} \quad (4.2)$$

La funzione generatrice dei momenti $g(t)$ è definita come la speranza matematica di e^{Xt} dove X è la variabile casuale mentre t è l'unico parametro della funzione. Per la distribuzione lognormale tale funzione è: $g(t) = e^{\mu t + t^2 \frac{\sigma^2}{2}}$.

Calcolando valore di aspettazione e varianza partendo dalla funzione generatrice dei momenti si ottengono le relazioni che descrivono $\tilde{\mu}$ e $\tilde{\sigma}^2$. Successivamente, in sezione 5.2 ci sarà utile calcolare anche l'incertezza sul valore stimato di $\tilde{\sigma}$. Per fare ciò è stata utilizzata la propagazione degli errori su 4.2 ipotizzando un'approssimazione gaussiana, fissato n il numero di eventi. La propagazione degli errori su tale formula genera la relazione 4.3:

$$inc_{\tilde{\sigma}} = \sqrt{\left((2e^{2\mu + \sigma^2} \cdot (e^{\sigma^2} - 1)\sigma)^2 + (e^{2\mu + \sigma^2} \cdot e^{\sigma^2}) \cdot (2\mu^4 \sigma^2 + \sigma^4) \cdot \left(\frac{2}{n-1} (\mu^4 \sigma^2 + \sigma^4) \right)^2 \right)} \quad (4.3)$$

Si è quindi prodotto un codice per mostrare il comportamento di un set di dati generati randomicamente secondo una distribuzione lognormale (figure 4.1b e 4.1a) al quale è stato eseguito un fit lognormale che meglio rappresenta il comportamento dei dati:

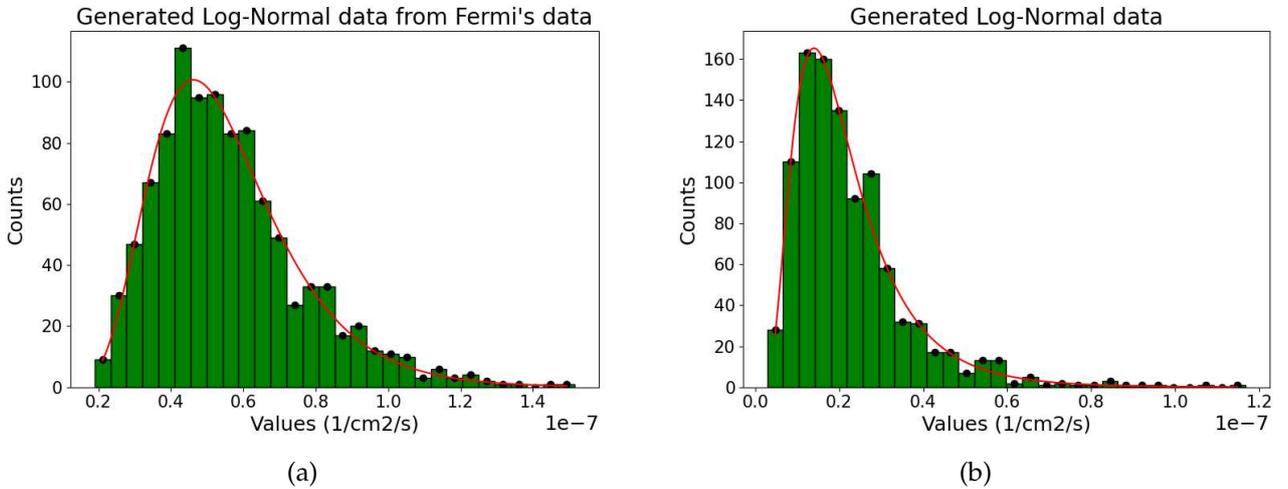


Figura 4.1: Codice prodotto dal candidato raffigurante due distribuzioni lognormali di dati generate randomicamente. Per la generazione di 4.1a si è utilizzato il valore del flusso medio ricavato dal fit costante di *Fermi*-LAT 3.1 mentre per 4.1b si sono arbitrariamente modificati tali parametri al fine di osservare il modo in cui varia la distribuzione.

È doveroso notare il modo in cui il cambio di parametri influisce sulla distribuzione finale: un aumento/diminuzione di $\tilde{\mu}$ genera una traslazione della distribuzione sull'asse delle ascisse mentre un aumento/diminuzione di $\tilde{\sigma}$ corrisponde ad un allungamento della coda.

4.2 LOGNORMALITÀ DEI DATI *FERMI*-LAT

Mediante l'implementazione di un codice Python sviluppato dal candidato e utilizzando i dati di *Fermi*-LAT, sono stati effettuati due fit per verificare quale ipotesi fosse la più plausibile. Considerando l'obiettivo di caratterizzare la distribuzione dei flussi di PG 1553+113 si è quindi eseguito un primo fit con la funzione normale e un secondo lognormale. Il risultato della prima opzione è rappresentato in figura 4.2:

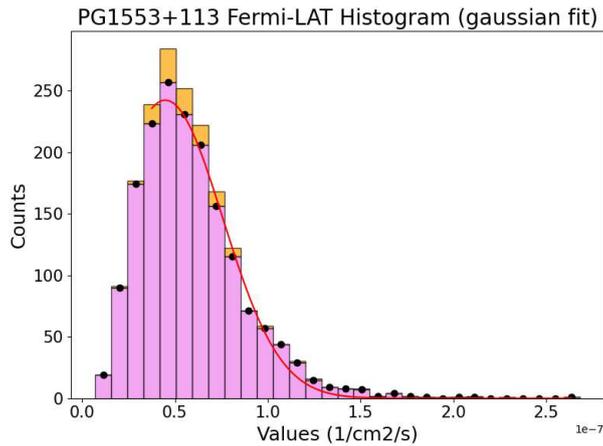


Figura 4.2: Il grafico rappresenta la distribuzione dei flussi di PG 1553+113 con binning di 3 giorni dei dati di *Fermi*-LAT. In questa immagine è stato utilizzato un fit gaussiano per modellizzare l'andamento dei dati. La motivazione per la quale il fit non è stato eseguito su tutto lo spettro dei valori è spiegata dopo le figure 4.3a e 4.3b.

Mentre quello della seconda è rappresentato nelle figure 4.3a e 4.3b:

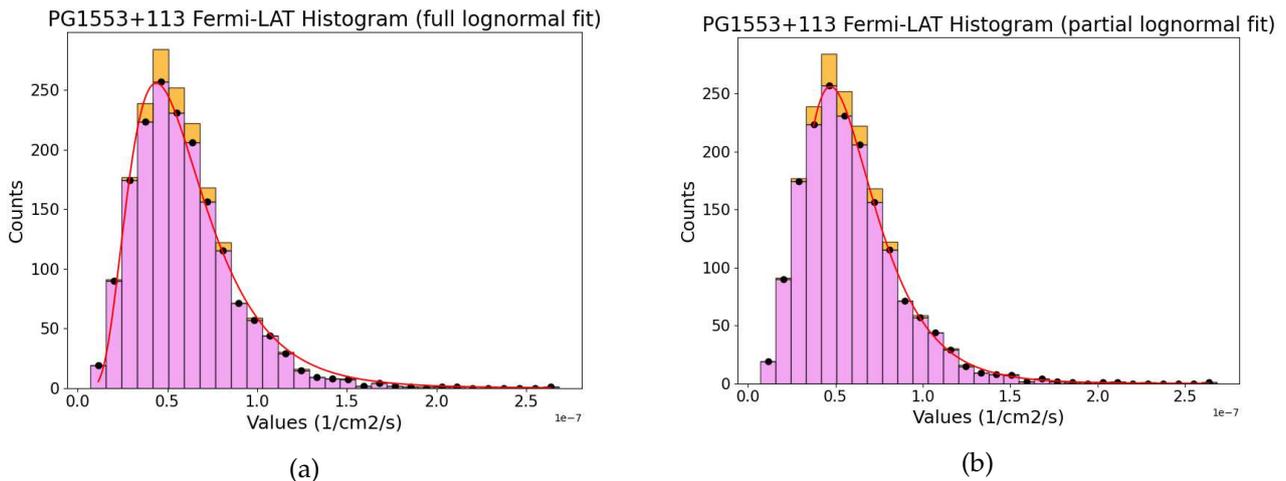


Figura 4.3: Le due figure rappresentano la stessa distribuzione dei valori dei flussi di PG 1553+113 comprensive di "upper limits" posti al di sopra della distribuzione stessa e dei fit lognormali in rosso. La sostanziale differenza tra i due grafici è il punto d'inizio fitting: per 4.3a è stato eseguito un fit sull'intero spettro di valori mentre per 4.3b sono stati omessi dal fit i primi dati.

4.2. LOGNORMALITÀ DEI DATI FERMI-LAT

Tra le prime considerazioni che sono da sottolineare c'è il motivo per cui il fit non è stato fatto su tutto l'asse delle ascisse. Da un confronto delle due immagini 4.3a e 4.3b, si nota che i dati rappresentanti valori di flusso relativamente piccoli (ovvero la parte sinistra del picco) sono dati cui la presenza di "upper limits" non è trascurabile poiché sono "falsati" dal fatto che quei valori sarebbero dovuti essere in un bin tra 0 e il valore stesso riportato. Il significato stesso di "upper limits" ci indica come i dati denominati in tal modo siano il limite superiore del vero valore che si sarebbe dovuto misurare. Per questo motivo se un dato venisse registrato come "upper limit" da Fermi-LAT, questo si ricondurrebbe nella distribuzione dei flussi come un dato che potrebbe appartenere a tutti i bins dal primo fino al bin con l' "upper limit". La porzione di dati a sinistra del picco potrebbe essere quindi rialzata rispetto a quanto vediamo per via dei dati mancanti e quindi non possiamo considerarla attendibile ai fini della stima di parametri ottimali del fit. Osservando quindi il secondo grafico si può osservare come questo possieda un fit che rappresenti meglio la coda della distribuzione, ovvero la sezione dei dati che più interessa poiché rappresenta i momenti dove il flusso registrato è alto, fatto che indica la presenza di "flares". Tornando ora al fit gaussiano si può notare come questo sia poco rappresentativo dei dati: nel picco si potrebbe anche pensare che questi siano ben rappresentati ma la coda è visibilmente sottostimata. Il fit lognormale è invece maggiormente rappresentativo della zona della coda, nonché del picco. I parametri ottimali dei fit sono rappresentati nella seguente tabella, nella quale è contenuto anche il valore risultante del test del χ^2 e del p-value:

Tipologia di fit	$\tilde{\mu}$ ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	$\tilde{\sigma}$ ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	χ^2	p-value
fit parziale normale	$4.49 \cdot 10^{-8}$	$3.08 \cdot 10^{-8}$	507.94	$< 10^{-6}$
fit completo lognormale	$6.20 \cdot 10^{-8}$	$3.17 \cdot 10^{-8}$	2.57	$1.4 \cdot 10^{-5}$
fit parziale lognormale	$6.17 \cdot 10^{-8}$	$2.74 \cdot 10^{-8}$	0.38	> 0.995

Tabella 4.1: Tabella raffigurante i risultati dei fit. Con "fit parziale normale" si intende la figura 4.2 mentre con "fit completo lognormale" la figura 4.3a e infine con "fit parziale lognormale" la figura 4.3b.

Dai risultati si può notare come il valore di $\tilde{\sigma}$ sia comprensibilmente minore per il fit lognormale parziale dei dati (Figura 4.3b), fatto che indica come questo secondo metodo di fitting sia più accurato rispetto al precedente. Per $\tilde{\mu}$ invece i valori sono molto più simili tra i due lognormali mentre quello normale è discostante. Questo indica che il picco è ben rappresentato da entrambe le tipologie di fit (lognormale parziale e completo) ma la coda è rappresentata meglio con quello parziale. Osservando invece i valori del fit normale e comparandolo con i risultati del lognormale si può notare che il test del χ^2 dimostra in maniera inequivocabile che i dati seguono un andamento che in prima approssimazione potrebbe sembrare normale ma che dopo un'attenta analisi si pone a noi come lognormale [11]. Nello specifico vediamo che il valore del p-value per il fit lognormale parziale è quello che più si avvicina a 1, ciò indica che una volta corretti per il bias dovuto alla presenza di "upper limits", i dati seguono una distribuzione lognormale. Come immediata conseguenza abbiamo il fatto che i processi che si svolgono per la produzione di questa radiazione elettromagnetica osservata devono essere moltiplicativi e non solo una somma di singoli processi a sé stanti.

4.3 LOGNORMALITÀ NEI DATI MAGIC E *SWIFT*-XRT

Dopo aver verificato e confermato la lognormalità dei flussi in banda gamma HE, vogliamo ora capire se i dati provenienti dal telescopio MAGIC (banda delle VHE) e da *Swift*-XRT (banda degli X) seguano anch'essi un andamento lognormale. I dati di MAGIC hanno la distribuzione dei flussi rappresentata in figura 4.4:

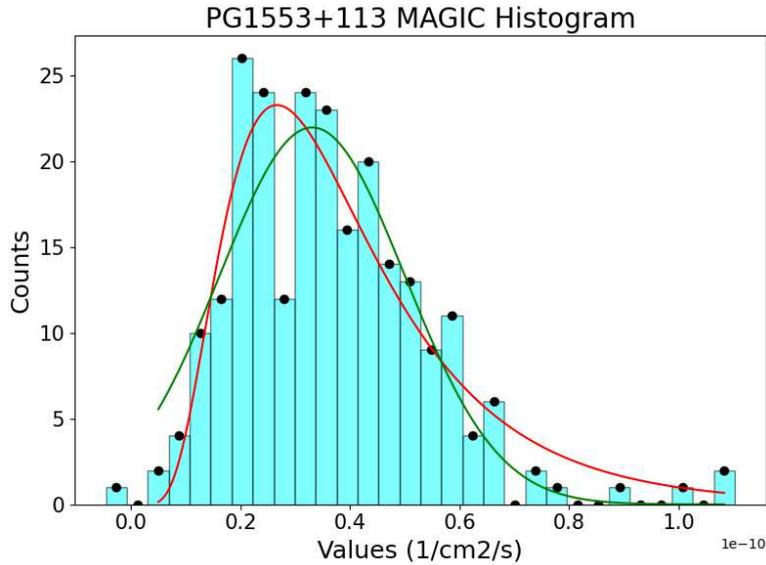


Figura 4.4: Il grafico rappresenta la distribuzione dei flussi dei dati acquisiti con MAGIC. Rispetto a quanto ottenuto dai dati di *Fermi*-LAT, questo ha meno dati e minor continuità, fatto da ricondursi alla natura intrinseca delle osservazioni fatte dai due strumenti, come detto in precedenza. Le linee rossa e verde sono da ricondursi rispettivamente ai fit lognormale e normale.

Qualitativamente è visibile anche in questo caso una coda che potrebbe portare a pensare ad un andamento non normale. Si è comunque tentata la verifica di entrambe le ipotesi: per il fit normale (in verde) si sono ottenuti i seguenti risultati: $\tilde{\mu} = (3.31 \cdot 10^{-11}) \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ e $\tilde{\sigma} = (1.69 \cdot 10^{-11}) \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$; mentre per il fit lognormale (in rosso) i parametri ottimali ottenuti sono i seguenti: $\tilde{\mu} = (3.63 \cdot 10^{-11}) \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ e $\tilde{\sigma} = (1.75 \cdot 10^{-11}) \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Il risultato del test del χ^2 effettuato sull'ipotesi di normalità dei dati MAGIC restituisce un valore di χ^2 ridotto di 148.6, mentre per quello sull'ipotesi di lognormalità restituisce un χ^2 ridotto di 2.2. Vediamo allora che anche in questo caso l'ipotesi di lognormalità è maggiormente plausibile rispetto a quella di normalità sebbene in entrambi i casi non si possa affermare concretamente che l'andamento dei dati rispetti una o l'altra distribuzione. In effetti per entrambi i casi il p-value è $< 10^{-6}$. Si può quindi concludere che l'emissione nella banda delle VHE non sia riconducibile ad un unico processo normale o lognormale. Una plausibile spiegazione è che in questa banda l'emissione sia data dalla sovrapposizione di due o più zone indipendenti. Questo fatto può essere spiegato utilizzando il "2-zone SSC model", ipotizzato in [4] nel quale si propone che l'emissione di sincrotrone e il Self-Compton Scattering non siano visibili come un picco ciascuno ma

ci sia una seconda zona emissiva nel blazar che produce radiazione elettromagnetica con un diverso andamento che si va a sovrapporre a quella di base.

Per quanto riguarda i dati provenienti dal telescopio *Swift*-XRT, utilizzando il medesimo procedimento sfruttato per MAGIC, si sono ottenuti i risultati di figura 4.5

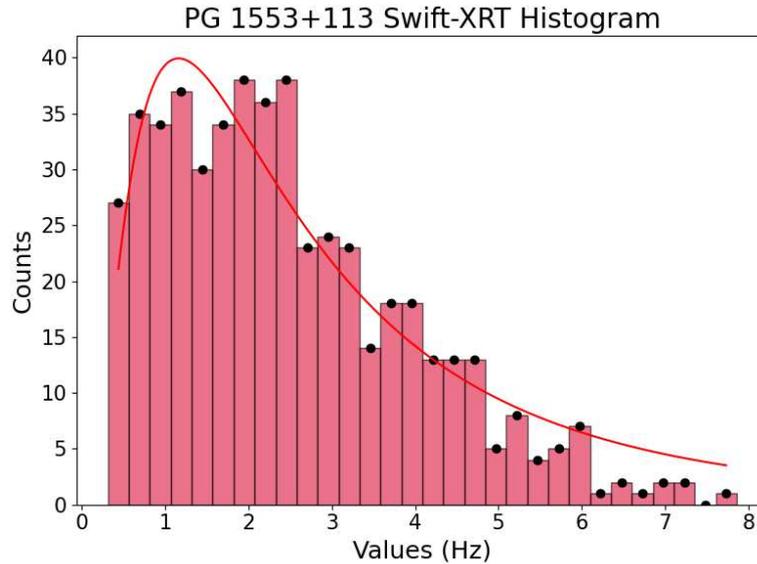


Figura 4.5: Il grafico rappresenta la distribuzione dei flussi dei dati acquisiti con *Swift*-XRT. Per la selezione dei dati si è utilizzato un criterio per escludere dal set quei dati di rilevazione dovuti alla calibrazione, mantenendo solo quelli con $\sigma_x/x < 1/3$. In questo caso vediamo che l'andamento dei dati non sembra seguire alcun andamento di normalità o lognormalità. La linea rossa rappresenta il best fit lognormale dei dati.

Si è utilizzato come criterio per eliminare i dati di calibrazione dal set (quelli con incertezze molto elevate) la verifica seguente: $\sigma_x/x < 1/3$. Si può chiaramente osservare come l'andamento sia di difficile interpretazione con l'attuale analisi in quanto, sebbene il χ^2 sia pari a 1.4, il p-value è invece di 0.1, fatto che indica che una distribuzione lognormale ci restituirebbe nel 10% dei casi questo valore di χ^2 per le differenze tra i dati e il fit. Questo fatto non ci permette di rigettare l'ipotesi ma nemmeno di essere sicuri in modo esatto che quest'ultima sia verificata.

Con questo tipo di analisi si giunge quindi alla conclusione che PG 1553+113 abbia un'emissione con distribuzione lognormale nella banda delle HE (*Fermi*-LAT) mentre un'emissione non lognormale nella banda delle VHE (MAGIC). Infine per quella degli X (*Swift*-XRT), c'è indicazione di una possibile distribuzione lognormale, ipotesi che sarebbe necessario approfondire con uno studio ulteriore. Questa nuova evidenza si aggiunge a quanto riportato in [4], ove le bande X e VHE, fortemente correlate, paiono invece scorrelate dalla banda Fermi. Il motivo si pensa essere dovuto al fatto che per tali bande ci siano altre zone d'emissione (due o più) ognuna con una distribuzione differente. Dato che la somma di più PDF genera funzioni non ben specificate, allora una volta sommati gli effetti di ogni zona otteniamo le distribuzioni per come le vediamo in 4.4 e 4.5, ossia non riconducibili ad alcuna PDF (almeno in prima approssimazione). Possiamo dunque concludere che con un differente

approccio d'analisi rispetto all'articolo [4], si confermano almeno in parte le medesime considerazioni esposte.

4.4 VERIFICA DEI BIAS NEI DATI DI MAGIC

Si vuole infine determinare se i dati acquisiti con MAGIC siano affetti da un bias dovuto al campionamento non continuo nella presa dati. A tale scopo si è determinato l'andamento dei dati *Fermi-LAT* ipotizzando che anche questo satellite avesse gli stessi buchi temporali di MAGIC. La procedura attuata è stata quella di controllare se in ogni intervallo dei dati del *Fermi-LAT* (3 giorni) ci fossero uno o più dati di MAGIC. Nel momento in cui tale condizione si fosse avverata si sarebbe contato come valido il dato di *Fermi-LAT* corrispondente, mentre il dato sarebbe stato scartato in caso contrario. Il risultato è rappresentato in figura 4.6:

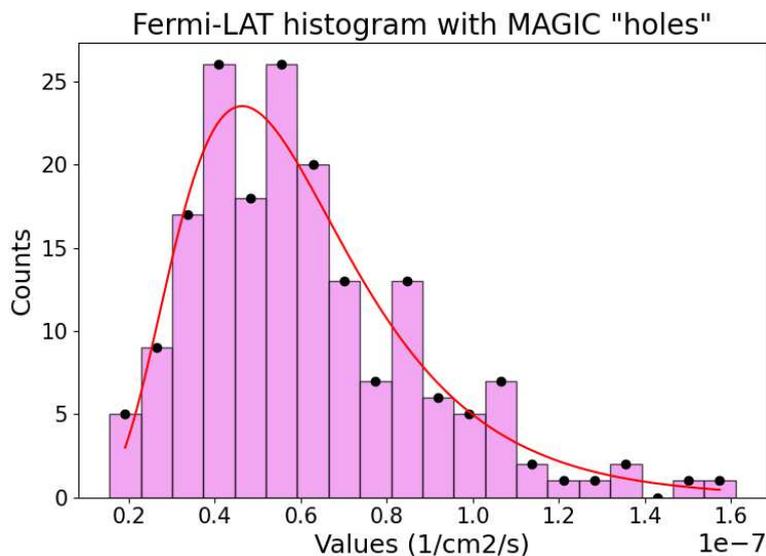


Figura 4.6: Il grafico rappresenta la distribuzione dei flussi dei dati acquisiti con *Fermi-LAT* in cui si sono inseriti i buchi temporali dell'acquisizione dei dati di MAGIC.

Anche in questo caso si è optato per l'utilizzo di un fit lognormale, cui parametri ottimali sono stati stimati come: $\tilde{\mu} = (6.16 \cdot 10^{-8}) \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ e $\tilde{\sigma} = (2.82 \cdot 10^{-8}) \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Il risultato del test del χ^2 sull'ipotesi di lognormalità dei dati *Fermi-LAT* trattati in questo modo restituisce come risultato un valore di χ^2 ridotto di 0.85, mentre il p-value è pari a 0.64. Tale risultato suggerisce che la lognormalità osservata nei dati *Fermi-LAT* e non nei dati MAGIC non è legata al campionamento degli stessi, e che pertanto i risultati ottenuti nella sezione precedente sono da considerarsi solidi. È poi possibile effettuare anche un rapido controllo della bontà del fit appena eseguito confrontandolo con i risultati di quanto calcolato in figura 4.3b. Si nota che i due $\tilde{\mu}$ coincidono quasi esattamente, fatto che giustifica ancora i risultati ottenuti; mentre per $\tilde{\sigma}$ si nota che per il fit di 4.6 questo è maggiore e il motivo ricade nel fatto che data la scarsità dei dati, la loro dispersione sarà maggiore e così anche questo parametro. È

4.4. VERIFICA DEI BIAS NEI DATI DI MAGIC

d'obbligo sottolineare che benché $\tilde{\sigma}$ di 4.6 sia maggiore rispetto a 4.3b, i due valori non si discostano più di tanto. Dunque si può affermare che quand'anche si fossero misurati i flussi provenienti da PG 1553+113 con il satellite *Fermi*-LAT nelle stesse modalità con le quali si sono misurati quelli con MAGIC, la proprietà statistica dei dati per la quale si possono considerare lognormali non viene alterata. É quindi possibile sostenere che l'attuale metodologia di acquisizione dei dati portata avanti da MAGIC dal 2015 sia consistente e affidabile per il campionamento di sorgenti BL Lac come PG 1553+113.



Relazione $\tilde{\sigma}$ -flusso

*"People should not
be afraid of their dreams.
They should be afraid
of not striving hard enough
to achieve them."*

Hajime Isayama

5.1 IDEA DI BASE E SORGENTI UTILIZZATE

In quest'ultima sezione si vuole indagare un'interessante relazione lineare per la quale si cerca di collegare due quantità caratteristiche del jet di un blazar. L'idea del candidato è stata applicare una relazione osservata nell'articolo [14] che coinvolge la "root-mean-square" di una distribuzione normale (ossia σ) e il valor medio del flusso registrato per una sorgente (ovvero μ). In tale articolo la dipendenza lineare che sussiste tra σ e μ è stata analizzata solo per una singola sorgente galattica, ossia Cygnus X-1 e tramite simulazioni per la sola banda elettromagnetica degli X. Cygnus X-1 consiste in un sistema binario composto da una stella denominata "HDE 226868" e un buco nero che si pensa stia orbitando attorno alla stella, assorbendone materia. In figura 5.1a si mostrano i risultati ottenuti su Cygnus X-1 e dalle simulazioni nell'articolo [14]:

5.1. IDEA DI BASE E SORGENTI UTILIZZATE

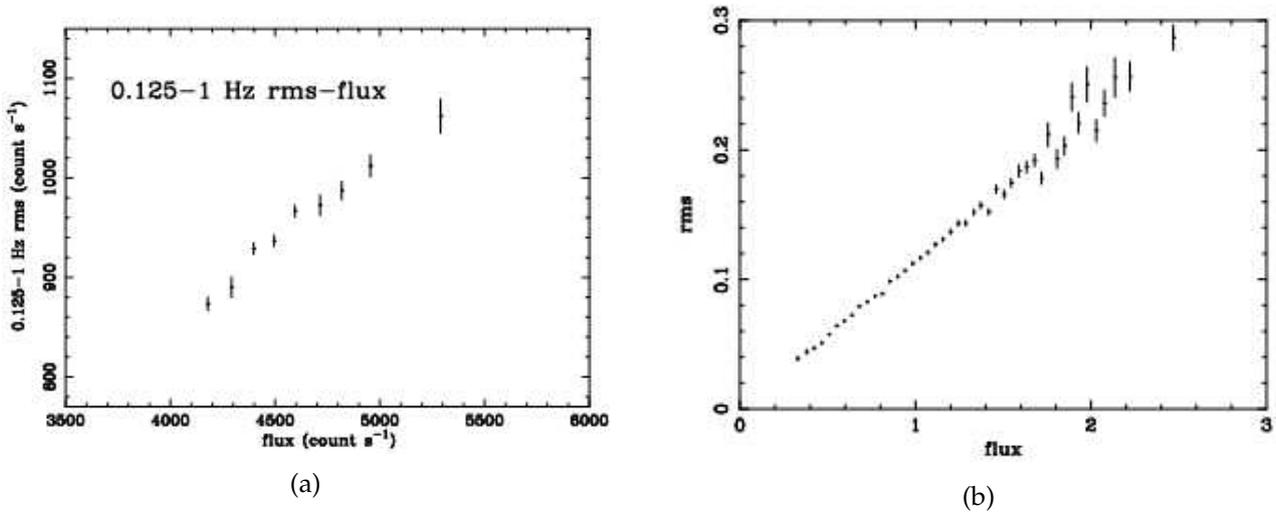


Figura 5.1: La figura 5.1a rappresenta la relazione σ - μ (in figura rms-flux) per il mese di Dicembre 1996 di Cygnus X-1 con un binning di 256 s per segnali elettromagnetici dai 2 ai 13 keV. La figura 5.1b mostra invece i risultati di simulazioni della suddetta relazione utilizzando un modello esponenziale per la curva di luce.

Quanto viene riportato ci mostra come sia presente una relazione lineare tra σ (in figura 5.1a rms) e il valore del flusso campionato con un binning specifico nella banda X del sistema binario stella-buco nero che è Cygnus X-1.

L'obiettivo di questa sezione è quello di utilizzare tale idea e trasporla per i BL-Lac. A questo scopo si utilizzeranno $\tilde{\sigma}$ e $\tilde{\mu}$ della distribuzione lognormale al posto dei rispettivi σ e μ di quella normale usata in [14]. Si è fatto uso di molteplici sorgenti al TeV (tra le quali PG 1553+113) con i dati acquisiti dal catalogo TeVCat. Tra le sorgenti utilizzate troviamo Makarian 501 e 421, AP Lybrae e molte altre, tutte osservate da *Fermi*-LAT nella banda delle HE¹.

Si è imposto un binning di 3 giorni per quelle più variabili e di 7 giorni per quelle meno variabili. Si sono utilizzate le stesse considerazioni fatte per PG 1553+113 per l'analisi delle curve di luce e delle distribuzioni dei flussi. La scelta del binning è dovuta al solo fine di poter apprezzare in modo significativo la variabilità di ciascuna sorgente. Ricapitolando quanto detto si sono scelte sorgenti BL-Lac al TeV e si è applicato il modello lognormale alle distribuzioni dei flussi, calcolando successivamente i valori di $\tilde{\sigma}$ e $\tilde{\mu}$ mediante il fit. Le immagini 5.2a, 5.2b, 5.2c e 5.2d mostrano alcune delle distribuzioni dei flussi di alcune sorgenti:

¹Per ciascuna sorgente si sono reperiti i dati in <https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/LightCurveRepository/>

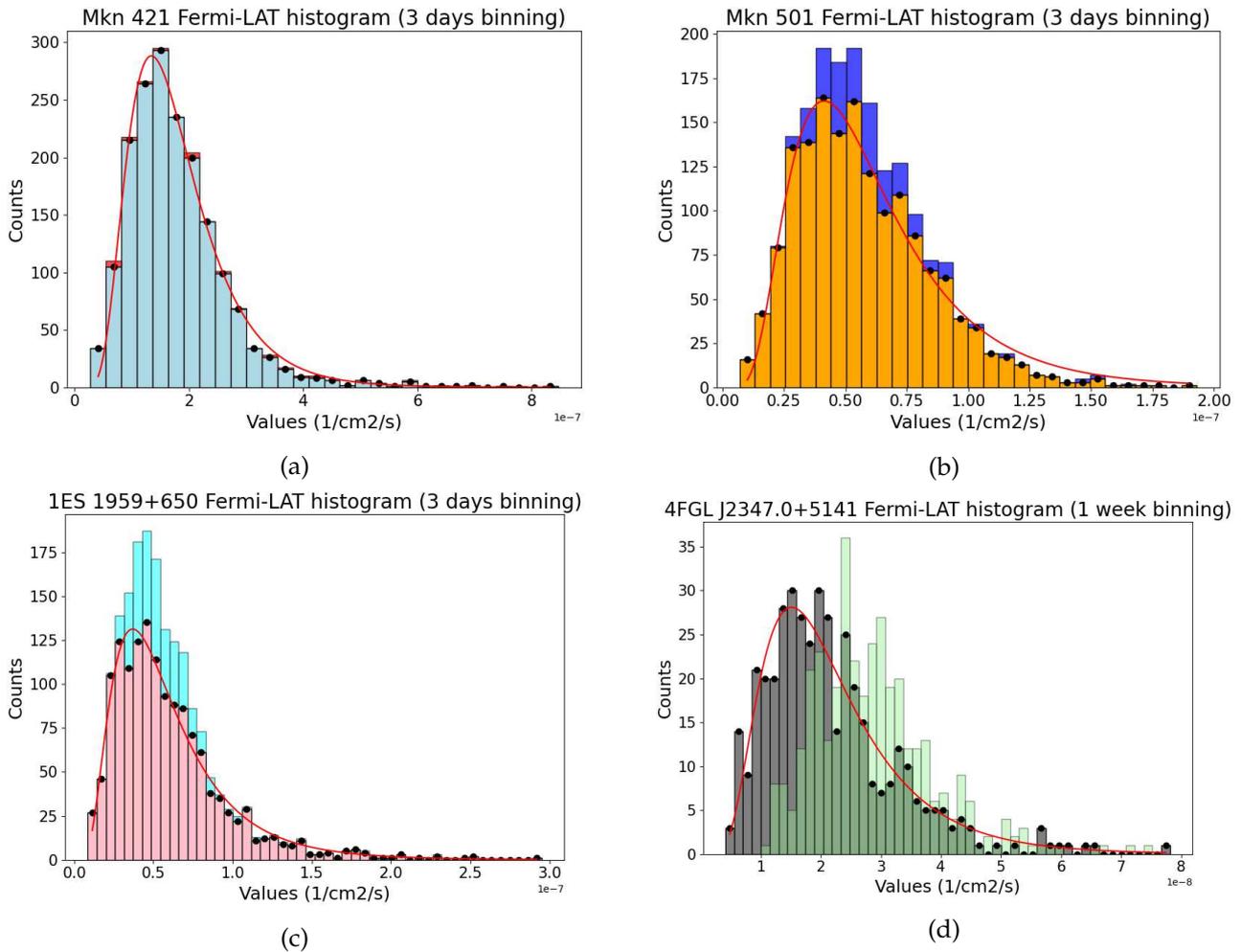


Figura 5.2: Le immagini 5.2a, 5.2b e 5.2c mostrano alcuni esempi di distribuzioni dei flussi per le sorgenti Mkn 421, Mkn 501 e 1ES 1959+650 rispettivamente. In rosso vi è la curva di fitting mentre sopra ai set di dati di ciascuna distribuzione vi sono gli "upper limits". Per l'immagine 5.2d nello specifico si è voluto mostrare il caso di 4FGL J2347.0+5141, sorgente BL-Lac al TeV non utilizzata nella trattazione in quanto rappresentata da un set di dati dominato da "upper limits".

Nello specifico, in figura 5.2d si vuole mostrare che alcune delle sorgenti presenti nel catalogo TeVCat hanno un set di dati dominato da "upper limits" e per questo motivo non sono utilizzabili correttamente nella trattazione corrente. In questo caso si sono voluti mostrare gli "upper limits" in trasparenza e non al di sopra dei dati stessi per accentuare il loro impatto sulla distribuzione. Il motivo per il quale non si possono utilizzare tali sorgenti è da attribuire al fatto che un set di dati con molti "upper limits" è un set che manca di molti dati rispetto alla quantità che si sarebbe dovuta misurare in condizioni ottimali, per cui le distribuzioni dei flussi ottenute sono differenti da quelle reali. Nell'esempio della figura 5.2d vediamo come la mancanza di dati (in grigio) e l'eccessiva presenza di "upper limits" (in trasparenza verde) indica che se tali "upper limits" fossero stati registrati come dati si sarebbe avuto un picco spostato tendenzialmente a destra nelle ascisse rispetto a dove lo si trova con l'attuale fitting.

5.2 IPOTESI DI LINEARITÀ $\tilde{\sigma}$ -FLUSSO

Dopo le dovute premesse possiamo dunque esporre i risultati ottenuti nelle figure 5.3 e 5.4:

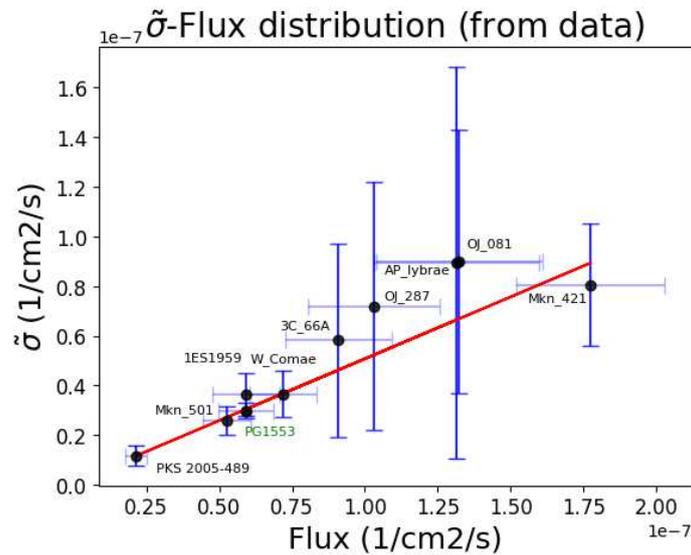


Figura 5.3: Il grafico rappresenta la relazione lineare che intercorre tra $\tilde{\sigma}$ e il flusso medio delle sorgenti BL-Lac al TeV analizzato con il satellite *Fermi*-LAT. I valori del flusso e $\tilde{\sigma}$ sono stati calcolati partendo dai dati ipotizzando una distribuzione lognormale. In rosso vi è la retta di fitting data l'ipotesi di linearità mentre in blu vi sono le barre dell'incertezza di $\tilde{\sigma}$.

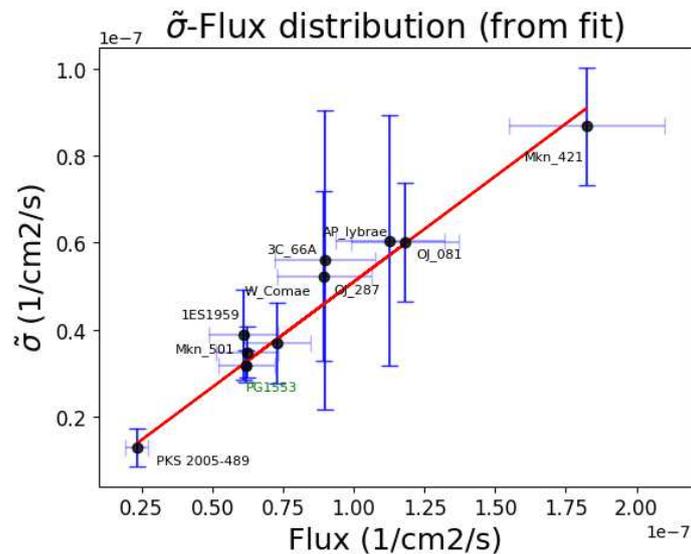


Figura 5.4: Il grafico rappresenta la relazione lineare che intercorre tra $\tilde{\sigma}$ e il flusso medio delle sorgenti BL-Lac al TeV analizzato con il satellite *Fermi*-LAT. I valori del flusso e $\tilde{\sigma}$ sono i parametri dei fit lognormali. In rosso vi è la retta di fitting data l'ipotesi di linearità mentre in blu vi sono le barre dell'incertezza di $\tilde{\sigma}$.

I valori riportati nei due grafici sono stati calcolati partendo dai dati per 5.3 e ipotizzando un andamento lognormale della distribuzione dei flussi, mentre sono i risultati dei fit lognormali per 5.4. Sull'asse delle ascisse troviamo il valor medio del flusso della distribuzione lognormale (ossia $\tilde{\mu}$) osservato da *Fermi*-LAT dei vari BL-Lac utilizzati con l'incertezza data da $\sigma_x = \frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{N}}$ con N il numero di punti; mentre su quello delle ordinate $\tilde{\sigma}$ con la relativa incertezza (barre blu). Per il calcolo dell'incertezza sul valore di $\tilde{\sigma}$ rimandiamo alla sezione 4.1, dove si è utilizzata la propagazione degli errori sulla relazione che collega rms normale e $\tilde{\sigma}$ della distribuzione lognormale utilizzando l'ipotesi di gaussianità dei dati.

Nei due grafici possiamo vedere come entrambe le rette date dal fitting lineare dei due set di dati si prestano a rappresentare bene l'andamento. Per verificare la bontà dei fit è stato fatto un test del χ^2 e si è stimato il p-value. I risultati sono riportati nella tabella 5.1:

$y = mx + q$	m	q	χ^2 ridotto	p-value
dai dati	0.497	$1.0 \cdot 10^{-9}$	0.13	> 0.999
dai fit	0.485	$2.5 \cdot 10^{-9}$	0.11	> 0.999

Tabella 5.1: Tabella raffigurante i risultati dei fit lineari. Si può osservare come i valori del χ^2 ridotto indicano come l'ipotesi di linearità sia soddisfatta da ambedue i set di dati. Anche i valori ottenuti del p-value indicano che i dati utilizzati rispettano l'ipotesi di andamento lineare.

Osservando la tabella possiamo affermare che i vari test statistici confermano con alta probabilità l'ipotesi che vi sia una relazione di linearità che collega le due grandezze fisiche $\tilde{\sigma}$ e $\tilde{\mu}$ della distribuzione lognormale. In particolare in entrambi i caso abbiamo valori simili di pendenza e l'intercetta tende come d'intuito a 0, il χ^2 ridotto è basso considerati i 9 gradi di libertà nei due test mentre il p-value tende a 1. Tutto ciò ci suggerisce dunque che tale relazione dovrebbe essere maggiormente approfondita in quanto il collegamento lineare tra due quantità fisiche apparentemente scollegate può portare a spiegazioni ulteriori circa la natura e il funzionamento di oggetti BL-Lac.

Il motivo per il quale sussiste tale relazione è ancora ignoto e sarebbe da ricercare in uno studio più approfondito che andrebbe ben oltre il presente lavoro di tesi.



Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha voluto esplorare alcuni argomenti del complesso mondo dei Nuclei Galattici Attivi (AGN), concentrandosi su un affascinante esemplare: il BL-Lac PG 1553+113. Inizialmente si è valutata la variabilità emissiva di PG 1553+113 in più bande, nello specifico quelle X, HE e VHE. Si è poi valutata l'eventuale lognormalità nei dati nelle diverse bande allo scopo di testare modelli d'emissione. A tale scopo sono stati effettuati studi sistematici degli esperimenti MAGIC, *Fermi*-LAT e *Swift*-XRT, valutandone i possibili bias. Infine si è analizzata la possibile relazione lineare tra $\tilde{\sigma}$ e il flusso di radiazione elettromagnetica emessa da alcune sorgenti BL-Lac al TeV. Con la presente trattazione si è dunque giunti ai seguenti risultati:

- ▶ La sorgente PG 1553+113 è una sorgente variabile nelle bande elettromagnetiche X, gamma HE e VHE. Nello specifico l'ipotesi di un andamento costante dei dati nel corso degli ultimi 17 anni è stata rigettata, confermando la variabilità di tale sorgente.
- ▶ PG 1553+113 possiede una distribuzione dei flussi che si dispone come una curva lognormale nella banda delle HE (osservata con *Fermi*-LAT), non mostra alcuna caratteristica lognormale nella banda VHE (osservata con MAGIC), mentre per la banda X (osservata con *Swift*-XRT) si dovrebbero effettuare analisi più approfondite. Tutto ciò avvalorava in parte le ipotesi proposte in [4] per cui PG 1553+113 dovrebbe rappresentare un "2-zone SSC model" nella sua SED.
- ▶ Non vi sono bias significativi nella metodologia d'acquisizione di dati attuata dal telescopio MAGIC dal 2015 sino ad oggi per la sorgente PG 1553+113. Questo è avvalorato dal fatto che, imponendo le stesse condizioni ad un set di dati proveniente da un secondo esperimento (ossia *Fermi*-LAT), quest'ultimo ha mantenuto i medesimi significati fisici che aveva in precedenza.
- ▶ Sussiste una relazione lineare tra $\tilde{\sigma}$ e $\tilde{\mu}$, rispettivamente la radice della varianza e il valor medio di una distribuzione lognormale. Sarebbe quindi interessante approfondire il collegamento tra queste due quantità in un ulteriore lavoro.

Ringraziamenti

Un ringraziamento particolare alle organizzazioni che hanno condiviso i loro dati che sono stati usati nell'analisi: MAGIC, *Fermi-LAT* e *Swift-XRT*. The MAGIC Collaboration is acknowledged for allowing the use of proprietary observational data. MAGIC results presented in this thesis have not undergone the internal review procedure of MAGIC publications. Please reference [1] for use of any results presented in the *Fermi-LAT* Light Curve Repository. We acknowledge the use of public data from the Swift data archive. In particolare, vorrei ringraziare il gruppo *heap* di Padova per tutte le numerose opportunità che mi sono state date e per gentilezza con la quale mi hanno accolto.

Vorrei ringraziare i miei genitori, mamma Eva e papà Paolo, persone a cui devo tutto e che mi hanno sempre sostenuto in ogni momento della mia vita, amandomi ogni giorno di più. Vi ringrazio per tutto ciò che mi donate in ogni istante e per tutto quello che avete fatto e sacrificato per farmi essere dove sono adesso. Vi ringrazio per tutto l'amore incondizionato che mi donate ogni giorno e per la persona che mi avete fatto diventare. Un ulteriore grazie lo devo ai miei nonni Joe, Abili, Maria e Toni che mi hanno sempre voluto un bene immenso, voglio dirvi che sarò sempre il vostro bambino e la vostra "pagnocheta de pan". Grazie di esservi sempre presi cura di me e avermi trattato come un principino. Vorrei ringraziare tutti i miei parenti: zio Renzo e mia cugina Giulia, zio Filippo e mio cugino Tommaso, zio Ivano e Lucia; vi ringrazio per essermi sempre stati accanto e avermi donato gioia e amore. Grazie anche a Emma, la ragazza che ormai da più di 5 anni mi fa battere il cuore. Ti ringrazio per avermi sostenuto in tutti i momenti difficili di questi quasi quattro anni di università e per darmi ogni giorno il tuo amore. Vorrei anche ringraziare la dottoressa Elisa Prandini, una persona che ormai posso considerare una cara amica, che mi ha sostenuto e aiutato in un percorso durato quasi un anno. Ti ringrazio di esserti presa cura di me come un figlio in ogni mio minimo e insensato dubbio. Infine vorrei ringraziare tutte le persone che mi sono sempre state accanto: tutti i miei parenti, i miei amici del TTR e quelli che conosco sin da quando ero un bambino, tutti i miei colleghi e compagni di avventure e sventure conosciuti durante il percorso triennale e in questi ultimi mesi.

Vi voglio ringraziare tutti, se sono riuscito a concludere questo percorso lo devo a voi tutti e il merito è tutto vostro.

Bibliografia

- [1] S. Abdollahi et al. «The Fermi-LAT Lightcurve Repository». In: 265.2, 31 (apr. 2023), p. 31. DOI: 10.3847/1538-4365/acbb6a. arXiv: 2301.01607 [astro-ph.HE].
- [2] Volker Beckmann e Chris Shrader. «The AGN phenomenon: Open issues». In: *Proceedings of Science* (feb. 2013).
- [3] J. Biteau e B. Giebels. «The minijets-in-a-jet statistical model and the rms-flux correlation». In: 548, A123 (dic. 2012), A123. DOI: 10.1051/0004-6361/201220056. arXiv: 1210.2045 [astro-ph.HE].
- [4] MAGIC Collaboration et al. «The variability patterns of the TeV blazar PG 1553+113 from a decade of MAGIC and multi-band observations». In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (mar. 2024), stae649. ISSN: 0035-8711. DOI: 10.1093/mnras/stae649. eprint: <https://academic.oup.com/mnras/advance-article-pdf/doi/10.1093/mnras/stae649/56833347/stae649.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stae649>.
- [5] G. Fossati et al. «A unifying view of the spectral energy distributions of blazars». In: 299.2 (set. 1998), pp. 433–448. DOI: 10.1046/j.1365-8711.1998.01828.x. arXiv: astro-ph/9804103 [astro-ph].
- [6] Gabriele Ghisellini. *Radiative Processes in High Energy Astrophysics*. Springer International Publishing, 2013. ISBN: 9783319006123. DOI: 10.1007/978-3-319-00612-3. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-00612-3>.
- [7] B. Giebels e B. Degrange. «Lognormal variability in BL Lacertae». In: 503.3 (set. 2009), pp. 797–799. DOI: 10.1051/0004-6361/200912303. arXiv: 0907.2425 [astro-ph.CO].
- [8] Sean D. Johnson et al. «The Physical Origins of the Identified and Still Missing Components of the Warm-Hot Intergalactic Medium: Insights from Deep Surveys in the Field of Blazar 1ES1553+113». In: 884.2, L31 (ott. 2019), p. L31. DOI: 10.3847/2041-8213/ab479a. arXiv: 1909.11667 [astro-ph.GA].
- [9] M. Ackermann et al. «Multiwavelength Evidence for Quasi-periodic Modulation in the Gamma-Ray Blazar PG 1553+113». In: 813.2, L41 (nov. 2015), p. L41. DOI: 10.1088/2041-8205/813/2/L41. arXiv: 1509.02063 [astro-ph.HE].

- [10] J. E. Pringle e M. J. Rees. «Accretion Disc Models for Compact X-Ray Sources». In: 21 (ott. 1972), p. 1.
- [11] Frank M. Rieger. «Gamma-Ray Astrophysics in the Time Domain». In: *Galaxies* 7.1, 28 (gen. 2019), p. 28. DOI: 10.3390/galaxies7010028. arXiv: 1901.10216 [astro-ph.HE].
- [12] M. Tavani et al. «The Blazar PG 1553+113 as a Binary System of Supermassive Black Holes». In: 854.1, 11 (feb. 2018), p. 11. DOI: 10.3847/1538-4357/aaa3f4. arXiv: 1801.03335 [astro-ph.HE].
- [13] C. Megan Urry e Paolo Padovani. «Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei». In: 107 (set. 1995), p. 803. DOI: 10.1086/133630. arXiv: astro-ph/9506063 [astro-ph].
- [14] P. Uttley, I. M. McHardy e S. Vaughan. «Non-linear X-ray variability in X-ray binaries and active galaxies». In: 359.1 (mag. 2005), pp. 345–362. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2005.08886.x. arXiv: astro-ph/0502112 [astro-ph].