



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

Analisi della variabilità in multifrequenza del blazar gamma PG  
1553+113

Relatore

Prof.ssa Elisa Prandini

Correlatore

Dr. Antonio Stamerra

Laureanda

Gaia Fittipaldi

Anno Accademico 2022/2023

# Indice

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduzione</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Caratteristiche di un AGN e l'emissione dei getti</b>   | <b>3</b>  |
| 2.1      | Struttura degli AGN . . . . .  | 3         |
| 2.2      | Modelli di emissione dei getti nei blazars . . . . .   | 4         |
| 2.3      | Possibili interpretazioni della variabilità multibanda a corto termine . . . . .                   | 7         |
| 2.4      | Caratteristiche della sorgente PG 1553+113: variabilità a lungo termine . . . . .                  | 8         |
| 2.5      | Coalescenza ed onde gravitazionali dalla sorgente PG 1553+113 . . . . .                            | 10        |
| 2.6      | Stima della vita del sistema binario in PG 1553+113 . . . . .                                      | 11        |
| <b>3</b> | <b>Analisi multibanda della curva di luce</b>  | <b>13</b> |
| 3.1      | Descrizione dei telescopi e presentazione dei dati . . . . .                                       | 13        |
| 3.2      | Caratterizzazione della curva di luce . . . . .  | 15        |
| <b>4</b> | <b>Correlazioni dei flussi intrabande</b>  | <b>16</b> |
| 4.1      | Indicatori di analisi statistica utilizzati . . . . .  | 16        |
| 4.2      | Relazione tra modelli di emissione del getto e correlazioni intrabande . . . . .                   | 16        |
| 4.3      | Analisi delle correlazioni intrabande . . . . .  | 18        |
| 4.4      | Analisi del flare dell'Aprile 2019 . . . . .   | 22        |
| <b>5</b> | <b>Analisi della funzione di correlazione e autocorrelazione</b>                                   | <b>24</b> |
| 5.1      | Definizione della funzione di correlazione e di autocorrelazione . . . . .                         | 24        |
| 5.2      | Analisi della funzione di autocorrelazione dei dati Fermi/LAT . . . . .                            | 25        |
| 5.3      | Analisi delle funzioni di correlazione della banda radio (OVRO) e gamma (Fermi/LAT) . . . . .      | 26        |
| 5.4      | Analisi della funzione di correlazione della banda ottica (KVA) e X ( <i>XRT-Swift</i> ) . . . . . | 27        |
| <b>6</b> | <b>Conclusioni</b>   | <b>29</b> |
| <b>7</b> | <b>Ringraziamenti</b>  | <b>30</b> |

# 1 Introduzione

Una delle imprese più emozionanti sulle orme del celebre cosmologo, fisico, astrofisico e divulgatore scientifico Stephen Hawking è accettare la sua sfida "Remember to look up at the stars and not down at your feet..."<sup>1</sup>. Ed è con uno spirito curioso e meravigliato che è iniziato il seguente lavoro, volto a guardare oltre le stelle e la Via Lattea alla ricerca delle più potenti sorgenti di raggi gamma extragalattici: gli **AGN**. Con il termine AGN si intendono i nuclei galattici attivi che ospitano uno o due buchi neri supermassicci circondati da un disco di materia che spiraleggia al suo interno e delle regioni di nubi e polveri che gli vorticano attorno e, alcuni di essi, da getti di materia relativistica. Il plasma che circonda il motore centrale è sede di un'importante emissione che copre l'intero spettro elettromagnetico, e proprio tramite tale emissione si studia la fisica degli AGN. Storicamente la **banda gamma** è stata l'ultima a poter essere studiata in astrofisica a causa della trasparenza dell'atmosfera terrestre che scherma efficientemente raggi gamma, raggi X, ultravioletto ed infrarosso, solo i fotoni con energia superiore a 100 GeV possono essere rivelati dalla Terra con i telescopi Cherenkov. Con l'avvento della corsa allo spazio nella seconda metà del secolo scorso i satelliti in orbita hanno permesso l'inizio degli anni dell'astronomia gamma. A tal proposito una data storica corrisponde al lancio del satellite *Fermi*, avvenuta il 4 Agosto del 2008, che in 15 anni di osservazioni vanta il più vasto catalogo di sorgenti gamma pari ad oggi a 5788<sup>2</sup>. Le principali **sorgenti gamma** comprendono: oggetti vicini come il Sole, sorgenti galattiche ed extragalattiche. L'accesso allo studio della banda gamma è stato un passo fondamentale, infatti nel range ottico e UV, già studiati prima della banda gamma, il segnale viene inquinato dalla luce extragalattica di fondo quindi la banda gamma offre la possibilità di accedere in modo più immediato alle sorgenti extragalattiche di maggiore interesse nello studio degli AGN. Una particolare attenzione viene data allo studio dei **blazar** poiché non solo possiedono i getti, perpendicolari al piano equatoriale del motore centrale, che è presente solo nel 10% degli AGN, inoltre i loro getti sono allineati con la direzione di vista di un osservatore terrestre. Siccome le particelle nel getto si muovono con velocità prossime alla luce è necessario considerare la relatività speciale. Un'importante conseguenza è che il getto di un blazar risulta più luminoso dal sistema di riferimento della terra e sembra che la materia si muova a velocità superiori a quella della luce, un effetto chiamato moto superluminale. Tutto ciò significa che l'emissione di un blazar è dominata dall'emissione del suo getto, perciò la maggior parte dei fotoni rivelati non appartengono alle altre strutture dell'AGN (disco di accrescimento, corona a raggi X...), questo porta ad isolare efficacemente l'oggetto di studio del seguente elaborato: l'emissione del getto. Di tutti i circa 2000 blazar presenti nel catalogo *Fermi*/LAT la sorgente di interesse in questa tesi è la PG 1553+113 che è stata scelta come oggetto di studio da parte della mia relatrice Prof.ssa Elisa Prandini per le sue caratteristiche peculiari tanto da renderla una delle sorgenti più attualmente studiate. In particolare le caratteristiche di interesse della **PG 1553+113** sono:

- la sua struttura centrale che la rende uno dei primari candidati tra blazar con al centro un sistema binario di buchi neri supermassicci Tavani et al. [2018];
- fa parte delle 272 sorgenti extragalattiche conosciute la cui emissione raggiunge le energie del TeV, racchiuse nel catalogo TeVCat<sup>3</sup> inoltre di tali sorgenti solo una settantina sono blazar;
- la variabilità dell'emissione della sua radiazione su corta e larga scala temporale dai minuti agli anni. L'emissione della PG 1553+113 segue un periodo di 2.2 anni [Ackermann et al., 2015] ed oltre a questo recentemente è stata scoperta un'ulteriore modulazione di 22 anni cui massimo verrà osservato nel Luglio 2025 [Adhikari et al., 2023].

Una sorgente così ricca di caratteristiche peculiari lascia spazio ad un grande varietà di studi anche nel campo dell'astrofisica multimessaggera a partire da cui si possono discutere le **nuove frontiere**

<sup>1</sup>tradotto da me: "Ricordate di guardare in alto alle stelle e non in basso ai vostri piedi..."

<sup>2</sup>[https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/10yr\\_catalog/](https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/10yr_catalog/)

<sup>3</sup><http://tevcat2.uchicago.edu/>

sullo studio del blazar. Il fatto che la PG 1553+113 possa ospitare un sistema binario la rende un promettente soggetto per lo studio di emissione di **onde gravitazionali** durante il raggiungimento della coalescenza dei due buchi neri supermassicci di cui si discute nel dettaglio nella sezione 2.5-2.6, scritta sotto la supervisione del mio correlatore Dr. Antonio Stamerra. Inoltre, siccome è una sorgente che emette energia al TeV, resta aperta la questione di una possibile rivelazione di **neutrini extragalattici** (leptoni neutri di massa trascurabile) altamente energetici, come è stato scoperto nel blazar TXS 0506+056 dall'esperimento IceCube nel 2017. L'ultimo messaggero di cui la PG 1553+113, ed altri blazar al TeV, può essere la sorgente sono i **raggi cosmici** che sono particelle cariche altamente energetiche (principalmente protoni) la cui origine è incerta perchè vengono deflessi dai campi magnetici che incontrano nel loro cammino. Tuttavia i processi fisici adronici che avvengono nel getto del blazar interessano protoni (candidati ad essere raggi cosmici), pioni e neutrini. Pertanto, la rivelazione di neutrini permette lo studio (indiretto) dei raggi cosmici da un blazar.

Gli **obiettivi** del seguente elaborato sono essenzialmente tre:

- studiare la variabilità multi-frequenza (radio, ottico, raggi X, gamma HE e gamma VHE) della sorgente PG 1553+113 per capire se è una sorgente variabile e in che modo è variabile. Ciò significa studiare la presenza di periodicità della banda gamma di *Fermi*/LAT e verificare se la radiazione incidente sui rivelatori della PG 1553+113 varia simultaneamente su più bande o se la variazione di una banda segue la variazione dell'altra;
- da un punto di vista operativo una parte di lavoro importante è scegliere i metodi più opportuni per stimare la correlazione intrabanda, ristudiando dei metodi statistici appropriati, valutando le ipotesi che stanno alla loro base e le loro implicazioni;
- ripercorrere l'analisi dell'articolo della collaborazione MAGIC appena proposto a una rivista internazionale per la pubblicazione con un set di dati maggiore per testare le correlazioni intrabanda tra i flussi incidenti sui diversi rivelatori.

A tale scopo è stata elaborata l'**organizzazione dei capitoli** di conseguenza: l'obiettivo del primo è quello di inquadrare tutti gli elementi teorici riguardanti le proprietà degli AGN, in particolare dei blazar, con particolare enfasi sulla loro variabilità: cause, conseguenze sperimentali e come questi elementi danno informazioni sulla PG 1553+113 (sez. 1). Successivamente si entra nel merito dell'analisi in multifrequenza della PG 1553+113, mostrando in primo luogo quali sono stati gli strumenti utilizzati per l'analisi e come il flusso di fotoni incidenti sui rivelatori non risulta costante (sez. 2). A partire dalla sezione 3 si entra nel vivo dell'analisi delle correlazioni intrabande prima esaminando tutti i dati a disposizione dall'Aprile 2005 al Maggio 2023, poi restringendo il dominio temporale ad un singolo evento, avvenuto nell'Aprile 2019, che mostra la sorgente con un'emissione di radiazione maggiore della media detto 'flare'. L'analisi separata dell'evento dell'Aprile 2019 ha lo scopo di verificare se e come le correlazioni sono influenzate dallo stato della sorgente (emissione sopra la media). L'analisi sul flare è stata portata avanti in collaborazione con il laureando magistrale Dott. Giuseppe Silvestri che si è occupato di modellizzare la distribuzione spettrale. Lo strumento principale di questa prima parte dell'analisi è il coefficiente di correlazione di Spearman che quantifica la correlazione dei flussi simultanei scattando un'istantanea del sistema pagando il prezzo di perdere informazioni sulla sua evoluzione temporale. Nella sezione 5 viene usato un altro metodo per testare la correlazione che è quello della funzione di correlazione (DCF), la quale segnala eventuali ritardi nella correlazione tra due bande poichè soltanto osservando l'evoluzione del sistema se ne comprende la complessità. In pratica con la DCF si riesce a capire se, ad esempio, la banda ottica e la banda gamma correlano simultaneamente ovvero se il flusso di fotoni incidenti gamma aumenta istantaneamente anche quello dei fotoni gamma aumenta oppure se l'aumento dei fotoni gamma aumenta dopo un certo intervallo di tempo rispetto agli ottici. Infine la sezione 6 è dedicata alle conclusioni del lavoro svolto, con particolare enfasi sui risultati ottenuti e sul verificare il raggiungimento degli obiettivi proposti.

## 2 Caratteristiche di un AGN e l'emissione dei getti

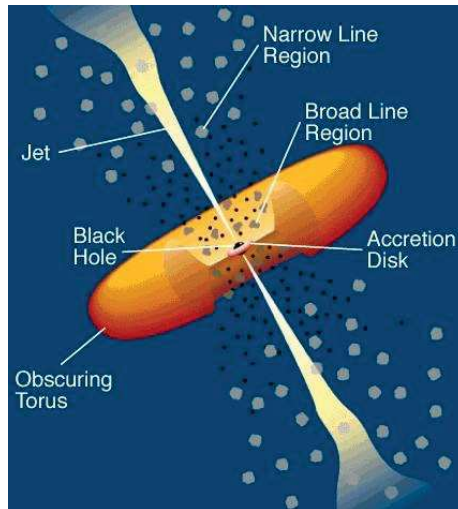
Nel seguente capitolo verranno presi in considerazione tutti i requisiti teorici utili per comprendere l'analisi dati che viene descritta nel seguito, in particolare dalla struttura dell'AGN (sez. 2.1) si vuole studiare il contesto dove si inserisce il getto formato da particelle relativistiche. A seguito dell'accelerazione delle particelle nel getto secondo meccanismi ancora in fase di studio e non totalmente risolti, si verifica un'emissione di energia tramite due processi fisici leptonici dominanti: l'emissione di sincrotrone e il self Compton. Lo studio di altri processi fisici adronici sono la sfida principale nel campo della modellizzazione dell'emissione in quanto è più difficile osservarne gli effetti (sez. 2.2). Tuttavia il quadro si complica ulteriormente poiché l'emissione delle sorgenti è variabile nel tempo su diverse scale temporali dai minuti agli anni. Nel concreto la variabilità si traduce in una variazione del flusso di fotoni incidente sugli strumenti di rivelazione utilizzati nell'ambito dell'astronomia gamma (sez. 3.1), ci sono diverse possibilità per descrivere la variabilità su breve scala di cui viene fornito un esempio (sez. 2.3). Dunque bisogna trovare una sorgente che dia la possibilità di esplorare variazioni su diverse scale in modo da avere una visione il più possibile completa della sua variabilità, a questo proposito la sorgente PG 1553+113 risulta un ottimo candidato (sez. 2.4). Per questo l'obiettivo del seguente elaborato è confrontare i risultati con l'articolo appena sottomesso dalla collaborazione MAGIC con un set più esteso di dati, e caratterizzare la variabilità del blazar PG 1553+113. A tal proposito viene data particolare attenzione alle correlazioni tra flussi indidenti sui rivelatori tra diverse bande energetiche: ottica, radio, gamma HE (energia 30 MeV-100 GeV) e gamma VHE (energia tra 100 GeV-30 TeV). L'eccezionalità della PG 1553+113 non si limita solo alle sue proprietà di emissione variabile, ma da un punto di vista strutturale potrebbe ospitare al centro un sistema binario di buchi neri legati gravitazionalmente, che durante il loro avvicinamento emettono energia gravitazionale sotto forma di onda: le cosiddette onde gravitazionali (sez. 2.5). Una stima, in prima approssimazione, del tempo di vita della PG 1553+113 prima che raggiunga la coalescenza è proposto nella sezione 2.6.

### 2.1 Struttura degli AGN

Attorno agli anni Novanta del secolo scorso nell'ambito dell'astronomia delle alte energie si viene ad affermare l'idea che le osservazioni extragalattiche di sorgenti gamma fanno parte di un'unica categoria di oggetti visti da diverse prospettive. Un'importante testimonianza viene data dall'articolo Urry and Padovani [1995] che propone uno schema unificato delle sorgenti in base ad un solo parametro: galassie "radio-loud" e non, le quali si classificano in funzione dell'angolo di vista sotto quale è visibile il getto rispetto ad un osservatore posto nel sistema di riferimento solidale con la Terra. La motivazione di questa classificazione risiede nel fatto che la direzione sotto la quale si osserva un AGN è importante poiché la radiazione osservata dipende dall'allineamento con la sorgente per effetto Doppler relativistico. Oggi ci riferiamo a tali oggetti con il termine **AGN** (*Active Galactic Nuclei*), visibile in figura 1, che corrispondono a sorgenti molto brillanti situate al centro di una galassia e strutturate come segue:

- Un buco nero supermassiccio come motore centrale della sorgente la cui massa varia da  $10^6$  a  $10^{10}$  masse solari ed è responsabile dell'attrazione, compressione, riscaldamento della materia in modo da trasformare l'energia gravitazionale in altre forme di energia;
- Il disco di accrescimento situato attorno al buco nero è composto da materiale che spiraleggia verso il buco nero per interazione con il suo campo gravitazionale riscaldandosi. Lo spettro questa regione si comporta come una somma di corpi neri a differenti temperature. Il materiale forma un disco piatto che nella regione più interna non riesce a mantenere un'orbita circolare stabile quindi "cade" nel buco nero diventando un plasma di elettroni e protoni;
- La corona di raggi X situata al di sopra del disco di accrescimento la cui origine è ancora incerta;
- Una nube toroidale di polveri che intercetta parte della radiazione dal disco di accrescimento rimettendola nell'infrarosso;

- Due regioni dette *Broad Line Region (BLR)* e *Narrow Line Region (NLR)* composte da polveri e nubi in moto Kepleriano attorno al buco nero o del materiale che sta fluendo in esso: all'interno della prima i materiali sono più veloci che nella seconda. I loro nomi derivano dalle linee di emissione dello spettro sottili in un caso e larghe nell'altro.
- Due getti formati da materia in direzioni diametralmente opposte le cui particelle vengono accelerate a velocità relativistiche e solitamente perpendicolari al piano del disco, non è una caratteristica comune di tutti gli AGN poiché solo il 10 % ne è provvisto.



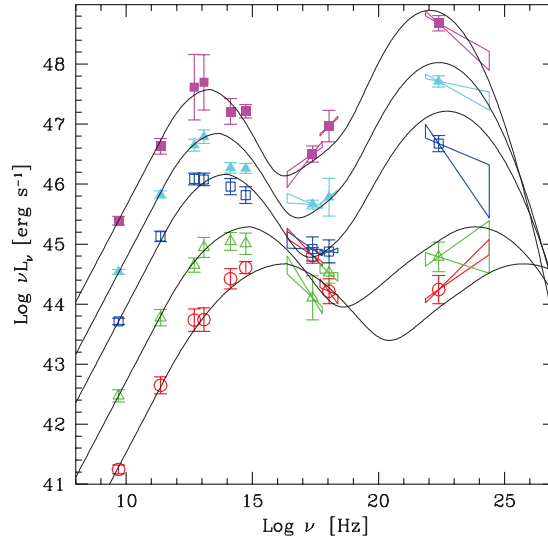
**Figura 1:** Rappresentazione della struttura di un AGN adattata da Padovani [1997]. Un AGN al centro ospita un buco nero e due getti diametralmente opposti di particelle a velocità relativistiche, all'esterno si trova il disco di accrescimento ed un toro di polveri.

In questo lavoro di tesi verranno presi in esame solamente gli AGN con uno dei due getti allineato verso la direzione di osservazione ovvero in cui l'angolo di vista della sorgente risulta circa zero gradi: tali AGN si chiamano blazar. Diversamente, se il getto non è allineato alla direzione dell'osservatore bensì è a grande angolo dall'osservatore gli AGN si definiscono radiogalassie. L'allineamento del getto ha un'importante conseguenza sperimentale: un blazar risulta più brillante, a parità di distanza, rispetto ad una radiogalassia osservata dallo stesso sistema di riferimento dell'osservatore per effetto Doppler. Inoltre avere un getto più brillante implica che l'emissione di un blazar è totalmente dominata dal suo getto.

## 2.2 Modelli di emissione dei getti nei blazars

Nei blazar, la radiazione elettromagnetica osservata è totalmente dominata dall'emissione dal getto, ove le particelle vengono accelerate a velocità ultrarelativistiche. Questa radiazione è variabile su scale di tempo che vanno dai pochi minuti agli anni.

Per quanto riguarda l'analisi dei meccanismi di accelerazione nel getto dei blazar, un importante strumento con cui ricostruire l'emissione spettrale è la **SED** (*Spectral Energy Distribution*) la cui caratteristica principale è una struttura che presenta due picchi (come raffigurato in figura 2). La SED è una funzione che presenta in ascissa il logaritmo della frequenza dei fotoni emessi dalla sorgente e che vengono raccolti dai rivelatori, invece in ordinata presenta l'energia differenziale, ossia il flusso di fotoni per unità di energia, moltiplicato per il quadrato dell'energia dei fotoni emessi e tipicamente espresso in  $\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}$ . L'area e il tempo nell'unità di misura della distribuzione spettrale di energia si riferiscono all'area effettiva e il tempo di acquisizione del rivelatore. L'importanza di questo strumento



**Figura 2:** Tipico andamento della SED per blazar adattata a partire da Fossati et al. [1998] e Donato et al. [2001]. In figura viene rappresentato il logaritmo del prodotto della frequenza e della luminosità in funzione del logaritmo della frequenza di emissione dei fotoni incidenti sugli strumenti di rivelazione. La presenza di due picchi ha un'importanza fondamentale nella comprensione della dinamica delle particelle nel getto poiché sono interpretabili come tracce di alcuni processi radiativi descrivibili con modelli leptonic o lepto-adronici

risiede nel fatto che una volta fissata l'energia di interesse è possibile calcolare il numero di fotoni che incidono sul rivelatore proveniente dalla sorgente in esame. Da un punto di vista sperimentale non esiste nessuno strumento in grado di misurare interamente la SED di un blazar dato che si estende per diversi ordini di grandezza pertanto nella sezione successiva 3.1 verranno sottolineati i domini di pertinenza di ciascuno strumento utilizzato. Definire il range di energia misurabile da un rivelatore a livello concettuale corrisponde a limitare la SED in figura 2 ad una striscia verticale.

Al fine di interpretare i processi fisici che generano tale SED sono stati proposti principalmente due modelli Prandini and Ghisellini [2022]: il modello leptonic, che vede protagonisti processi che coinvolgono solo gli elettroni (o i positroni) e che spiega una considerevole parte delle sorgenti e quello lepto-adronico che non verrà considerato nell'analisi successiva, ma di cui si vogliono sottolineare le conseguenze fenomenologiche nell'ottica dell'astrofisica multimessaggera. Quando si parla di astrofisica multimessaggera si intende lo studio dei diversi messaggeri cosmici: neutrini, raggi cosmici, raggi gamma ed onde gravitazionali con lo scopo di studiare il mezzo intergalattico e le sue sorgenti.

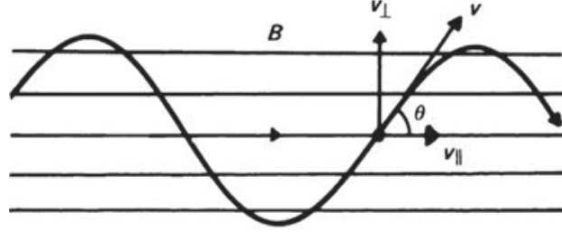
Il modello su cui si basa il seguente elaborato trova i suoi protagonisti, in particolare, in due processi che spiegano la caratteristica curva SED: l'emissione di sincrotrone che corrisponde al primo picco della SED nel range di energia che va dall'infrarosso ai raggi X, e il self Compton scattering prodotto dall'urto tra i fotoni (di sincrotrone) e gli stessi elettroni responsabili del sincrotrone (da cui il nome modello **Synchrotron Self-Compton**) che forma il secondo picco nella banda gamma [Tavecchio et al., 1998].

Nello specifico, la radiazione di sincrotrone è una diretta conseguenza del moto di una particella carica in un campo magnetico che subisce un'accelerazione a seguito della quale viene emessa energia sotto forma di fotoni a diverse frequenze. Il problema di una particella relativistica di massa  $m$ , carica  $q$  e fattore di Lorentz  $\gamma$  immersa in moto in un campo magnetico statico  $B$  con velocità  $v$  è risolvibile

analiticamente tramite la sua equazione del moto:

$$\gamma m \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} = \frac{q}{c} \frac{d\mathbf{x}}{dt} \times \mathbf{B} + q\mathbf{E} \quad (1)$$

Si assuma per semplicità il campo magnetico  $\mathbf{B} = (0, 0, B)$  in modo da trattare il problema in due dimensioni, il moto della particella, supposta con carica positiva, è elicoidale con frequenza di ciclotrone  $\omega = \frac{qB}{\gamma mc}$  nella direzione del campo magnetico come è visibile in figura 3 [Longair, 2011].



**Figura 3:** Rappresentazione schematica del moto di una particella in un campo magnetico uniforme tratta dal libro di testo Longair [2011]

Dopo una serie di conti in cui si calcolano le componenti dell'accelerazione si può derivare il tasso di perdita di energia della particella nel suo sistema a riposo pari a:

$$-\left(\frac{dE}{dt}\right) = 2\sigma_T U_B \frac{v^2}{c^2} \gamma^2 \sin^2 \theta \quad (2)$$

dove l'angolo  $\theta$  è mostrato in figura 3,  $U_B = \frac{B^2}{8\pi}$  è la densità di energia del campo magnetico,  $\sigma_T$  è la sezione d'urto Thomson. Ciò che è importante ricordare dalla relazione 2 è che, a parità del modulo della velocità, le particelle con velocità parallela al campo magnetico non contribuiscono alla perdita di energia, altresì la perdita di energia è massima per le particelle cui velocità è perpendicolare al campo.

Invece per quanto concerne il processo di self Compton sono i fotoni emessi dal sincrotrone che interagiscono con gli elettroni da cui hanno avuto origine trasferendo in modo efficiente la loro energia così da generare il secondo picco della SED. In particolare la perdita di energia degli elettroni che viene convertita in radiazione è data dalla formula:

$$\frac{dE_{rad}}{dt} = \frac{4}{3} \sigma_c \gamma^2 \frac{v^2}{c^2} U_{ph} \quad (3)$$

dove  $U_{ph}$  è la densità di energia dei fotoni prodotti dal sincrotrone, mentre  $\sigma$  è la sezione d'urto del processo. Se l'energia del fotone incidente (moltiplicata per gamma) è inferiore alla massa a riposo dell'elettrone  $\sigma = \sigma_T$  (altrimenti si entra nel regime di Klein-Nishina in cui la sezione d'urto diminuisce) per cui risulta immediato il confronto con la perdita di energia degli elettroni per sincrotrone. La differenza tra le relazioni 3 e 2 sta nel fatto che la perdita di energia degli elettroni nel sincrotrone dipende dalla densità di energia magnetica, mentre nel self-compton questa dipende dalla densità dei fotoni a disposizione prodotti dall'emissione di sincrotrone. Il modello SCC è il modello più semplice che si possa pensare per un blazar gamma tuttavia non è l'unico, bensì esistono diverse variazioni sul tema a partire proprio dal modello leptoadronico.

Da un punto di vista fenomenologico è doveroso sottolineare che il **modello leptoadronico** fornisce una spiegazione più completa del contributo delle sorgenti all'emissione dei neutrini [Cerruti, 2020]. Infatti secondo questo modello, il secondo picco della SED può talvolta includere dei contributi minoritari difficilmente apprezzabili che si riferiscono a processi fisici adronici. Sulla SED in figura 2 non sono presenti i contributi adronici perchè il modello cui si riferisce l'immagine è interamente leptonic. La difficoltà nel verificare sperimentalmente il modello leptoadronico è il numero maggiore di gradi di libertà.



Una delle frontiere in via di sviluppo dell'astrofisica multimessaggera riguarda la possibilità di rivelare i **neutrini** dall'emissione degli AGN. In particolar modo quando un protone nel getto viene accelerato, sono necessarie alte energie poichè i protoni pesano 2000 volte di più degli elettroni ed è difficile accelerarli, può aver luogo il processo fisico di emissione di sincrotrone per i protoni. Il fotone prodotto da tutti i processi di sincrotrone (degli elettroni a basse energie e dei protoni ad alte energie) interagisce con i protoni nel getto producendo pioni carichi e neutri ed altre particelle secondarie quali neutroni e protoni in stato eccitato [Padovani et al., 2015]. Il principale canale di decadimento per i pioni neutri sono due fotoni, invece i pioni carichi danno origine ad un muone o un elettrone e il suo neutrino. In quanto particelle neutre i neutrini sono degli ottimi candidati per gli studi dell'astrofisica multimessaggera poichè viaggiano indisturbati attraverso campi elettrici e magnetici.

La più recente conferma sperimentale a supporto del modello leptoadronico risale al Settembre 2017 quando il laboratorio IceCube, in Antartide, ha rivelato un evento di un neutrino di circa 290 TeV in coincidenza con il blazar BL Lac TXS 0506+056 [Aartsen et al., 2018], la rarità di tale evento ha segnato un fondamentale traguardo nel settore della rivelazione dei neutrini extragalattici ed è una pietra miliare dell'astrofisica multimessaggera.

### 2.3 Possibili interpretazioni della variabilità multibanda a corto termine

Dopo aver visto in che modo il getto di un blazar emette radiazione, ora è necessario entrare nel merito di quali fattori rendono tale emissione variabile, i protagonisti indiscussi, nel modello SCC, sono elettroni e fotoni. In particolar modo è importante capire cosa influenza il moto degli elettroni da cui ha origine l'emissione di sincrotrone e self compton. Nel seguito viene presentato un modello di variabilità a corto termine poichè la sorgente PG 1553+113, oggetto di questo lavoro, presenta tali variazioni. All'interno della panoramica dei blazar parlare di variabilità significa in primo luogo definire le scale temporali a cui ci si riferisce poichè si può riscontrare:

- variabilità a lungo termine dai mesi agli anni o decenni
- variabilità a corto termine tra le settimane e i mesi
- variabilità intra giorno/notte o microvariabilità

Il tempo cui si fa riferimento nella classificazione sopracitata è il tempo di osservazione della variabilità in esame che differisce dal tempo di variazione della sorgente per effetto Doppler relativistico secondo la seguente relazione:

$$t_{sorgente} = \frac{\delta}{1+z} t_{osservazione} \quad (4)$$

dove  $\delta$  è il fattore Doppler che tipicamente per i blazar è dell'ordine di grandezza di 10 e  $z$  è il redshift della sorgente che tiene conto della sua distanza dall'osservatore. Con il termine fattore Doppler si intende un parametro che è definito come segue:

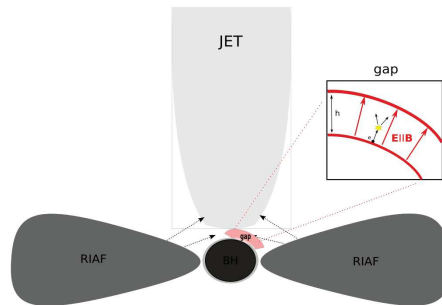
$$\delta = \frac{1}{\Gamma(1 - \beta \cos \theta_{vista})} \quad (5)$$

ovvero è legato al fattore di Lorentz  $\Gamma$ ,  $\beta = \frac{v}{c}$  e all'angolo sotto il quale la sorgente è vista detto  $\theta_{vista}$ . In pratica la formula 4 descrive il fatto che assumendo  $\delta \approx 35$  se il telescopio gamma registra una variabilità della sorgente di 4 ore la PG 1553+113 nel suo sistema di riferimento presenta una variabilità di circa 4 giorni interi (considerando il redshift della PG 1553+113 di circa 0.43).

Per quanto riguarda la variabilità su scala più breve esistono diversi modelli a disposizione, nel seguito si fornisce una sola descrizione a titolo di esempio. Le ipotesi più probabili riguardano dei meccanismi di accelerazione delle particelle relativistiche nel getto causata da: **shock** [Ghisellini, 1999], riconnessione magnetica del plasma e formazione di minigetti [Böttcher and Baring, 2019].

Nello specifico il getto è formato da un plasma di particelle che si muovono a velocità prossime a quella della luce che vengono incanalate da un campo magnetico che ha la funzione di contenere

il plasma al suo interno. Nell'ambito della magnetoidrodinamica ideale, che sfocia nello studio del confinamento magnetico di un plasma ideale, il teorema di Alfvén mostra che il flusso del plasma segue le linee di campo magnetico così come il flusso del plasma modifica le linee di campo magnetico. Tuttavia, in condizioni non ideali, il plasma può subire delle instabilità che il sistema spontaneamente non riesce a sostenere, poichè ogni plasma nel suo sistema di riferimento sopprime ogni tipo di campo elettrico imposto da eventuali turbolenze che portano a degli squilibri di carica, perciò dà luogo alla cosiddetta riconnessione del plasma. Nel 1949 Enrico Fermi propone un modello che descrive l'accelerazione delle particelle nel plasma a causa dell'agitazione non uniforme del mezzo magnetizzato in cui le particelle risiedono [Fermi, 1949]. Come si vede in figura 4 la diffusione delle particelle avviene parallelamente al campo elettrico nella regione di diffusione, denominato in figura "gap", in cui il campo magnetico non è uniforme così come la velocità del plasma nel getto. Dunque ogni volta che la particella attraversa la turbolenza nel plasma che si definisce "onda di Alfvén", questa viene accelerata passando attraverso al fronte dello shock.



**Figura 4:** Immagine tratta dall'articolo di Rieger [2019] in cui viene mostrata la formazione dello shock nel getto, in prossimità del motore centrale (tondo di colore nero) si viene a creare una regione in cui le particelle vengono accelerate da campi elettromagnetici generando una cascata di particelle e fotoni che si propagano nel getto.

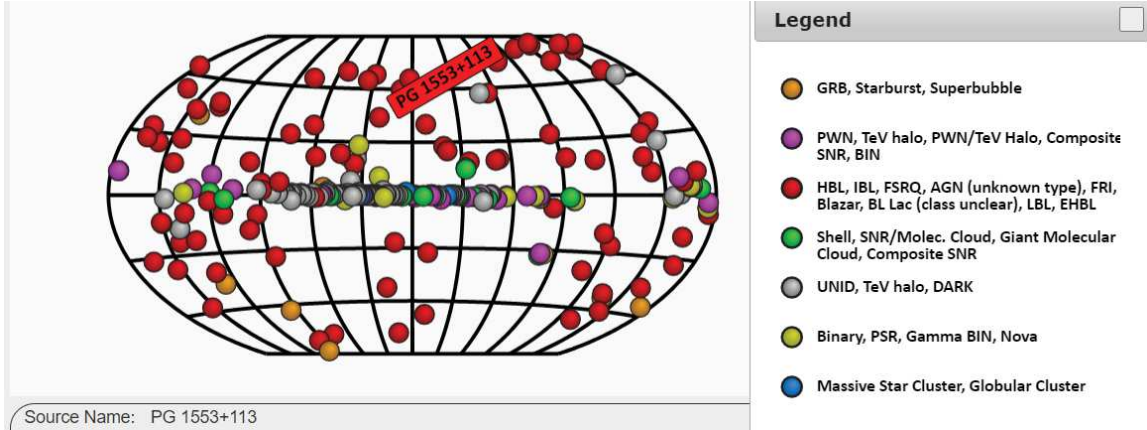
Ulteriori modelli riescono a spiegare la variabilità su diverse scale temporali, e su una o più bande specifiche come riportato nell'articolo di Singh and Meintjes [2020], tuttavia non è da escludersi la possibilità che siano un insieme di cause concomitanti perciò è importante analizzare singolarmente ciascun flare della sorgente per indagarne la causa.

## 2.4 Caratteristiche della sorgente PG 1553+113: variabilità a lungo termine

La protagonista di questo elaborato è la sorgente PG 1553+113 i cui primi dati nella banda ottica risalgono all'inizio del Novecento, ad oggi sono ancora depositate le curve di luce nel progetto DASCH (Digital Access to a Sky Century @ Harvard) a partire dal 1920 fino al 1992<sup>4</sup>. Storicamente il primo articolo pubblicato di Aharonian et al. [2006] in merito all'osservazione nella banda VHE (ossia per energie dai 100 GeV ai 30 TeV) con il telescopio Cherenkov H.E.S.S. posto in Namibia della sorgente PG 1553+113 presenta l'emissione della sorgente e la classifica come blazar. Nello specifico l'articolo presenta la SED con il picco del sincrotrone ad alte frequenze, nel dominio di UV e raggi X, dunque la sua denominazione è HSP (ENG: High Energy Peaked).

Un'altra importante caratteristica della sorgente è il suo **redshift** poichè permette di avere una stima della distanza dall'osservatore. I primi passi in tal senso sono stati mossi negli articoli di Mazin and Goebel [2008, 2007], Prandini et al. [2010] in cui viene fornito un limite superiore al redshift per poi arrivare ad una stima più precisa di  $z \approx 0.43$  negli articoli di Danforth et al. [2010], Johnson et al. [2019].

<sup>4</sup><http://dasch.rc.fas.harvard.edu/telescopes.php>



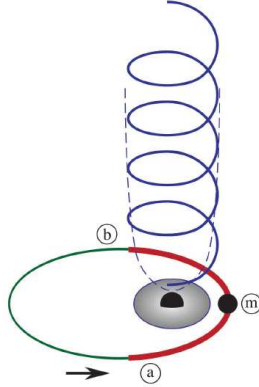
**Figura 5:** L'immagine proviene dal sito del TeVCat 2.0: <http://tevcat2.uchicago.edu/sources/ffHtfX> dove è presente un intero catalogo di sorgenti osservate al TeV. La figura ha lo scopo di mostrare la posizione della PG 1553+113 nella volta celeste rispetto alle altre sorgenti fino ad ora scoperte.

| Nome        | Redshift | Data di scoperta al TeV |
|-------------|----------|-------------------------|
| PG 1553+113 | 0.43     | 2005-10-26              |

**Tabella 1:** Nella tabella sono riassunti i dati relativi alla sorgente dagli articoli citati nella sezione 2.3 [Johnson et al., 2019, Aharonian et al., 2006] e dal sito del TeVCat 2.0. Uno dei parametri importanti è il redshift da cui si stima la distanza della sorgente della Terra.

Nell'ampio contesto dei blazar la sorgente PG 1553+113 (per i dati relativi si veda la tabella 1) presenta delle caratteristiche interessanti in termini di variabilità del flusso dei fotoni gamma raccolti dal satellite *Fermi*/LAT poiché presenta un periodo di 2.2 anni come descritto negli articoli Tavani et al. [2018], Ackermann et al. [2015] interpretabile come la presenza di un **sistema binario di buchi neri supermassicci** nella sua regione più interna. Per spiegare la variabilità biennale della sorgente PG 1553+113 nell'articolo di Tavani et al. [2018] vengono proposti due modelli: a singolo getto o a doppio getto. Il modello a getto singolo rappresentato con l'immagine 6 prevede che solo il buco nero più massiccio abbia il getto relativistico il cui flusso di fotoni viene significativamente influenzato dalla rotazione del buco nero meno massiccio in quanto quest'ultimo induce una perturbazione sia gravitazionale sia elettromagnetica sulle particelle relativistiche del getto del buco nero primario. Lo studio di Tavani et al. prevede che quando il buco nero secondario passa per (m) in figura 6 la curva di luce presenti un picco. Pertanto a partire dalla curva di luce *Fermi*/LAT della sorgente (sez. 3.1) che è periodica con un andamento sinusoidale, stimando la distanza tra due massimi adiacenti della curva di luce è possibile determinare il periodo della variabilità della sorgente. Analogamente anche nel modello a due getti, in cui anche il secondo buco nero dispone del getto, la rotazione periodica del buco nero meno massiccio attorno all'altro provoca la periodicità della curva di luce, pertanto la curva di luce e il moto di rotazione di uno attorno all'altro hanno medesimo periodo di circa due anni.

Il destino di un sistema binario è quello di raggiungere la coalescenza ovvero una condizione di fusione dei due buchi neri in uno unico che può seguire a periodi di quiescenza [Begelman et al., 1980, Colpi, 2014] quando il sistema è inattivo. Il processo di avvicinamento dei due buchi neri supermassicci provoca una perdita di energia sottoforma di onde gravitazionali le quali risultano più intense nel raggiungimento della coalescenza.



**Figura 6:** La figura soprastante è tratta da Tavani et al. [2018] è una rappresentazione schematica del modello a singolo getto: il buco nero primario è al centro provvisto del getto, invece il secondario ruota attorno al primo con un periodo  $T \approx 2.2$  anni pari alla periodicità nella curva di luce. Come descritto dall'articolo quando il secondario passa per (m) si verifica un picco nella curva di luce, le lettere (a) e (b) nella curva di luce rappresentano due picchi gemelli secondari a destra ed a sinistra di quello principale.

## 2.5 Coalescenza ed onde gravitazionali dalla sorgente PG 1553+113

Come discusso nei paragrafi precedenti, la PG 1553+113 è un sistema interessante per quanto riguarda lo studio della sua variabilità: una delle possibili interpretazioni, ma non l'unica, riguarda la possibilità che sia costituita da un sistema binario di buchi neri supermassicci [Tavani et al., 2018]. Tale interpretazione viene assunta come ipotesi per un conto semplice riguardo il tempo di vita di un sistema binario.

Prima di trattare nello specifico il sistema di PG 1553+113 è necessario contestualizzare il conto nella panoramica teorica riguardo le onde gravitazionali di cui è protagonista l'equazione di Einstein [Einstein and Rosen, 1935]:

$$R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2}g_{\alpha\beta}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\alpha\beta} \quad (6)$$

dove  $R_{\alpha\beta}$  è il tensore di Ricci che indica la curvatura dello spazio-tempo,  $g_{\alpha\beta}$  sono le componenti del tensore metrico che caratterizzano le proprietà geometriche di spazio-tempo e  $T_{\alpha\beta}$  il tensore di energia-momento. L'eleganza dell'equazione 6 risiede nella realizzazione della simmetria esistente tra geometria (a sinistra) e materia (a destra): la materia influenza la struttura dello spazio-tempo e viceversa la metrica definisce la distribuzione di materia.

Se all'interno del sistema viene introdotta una piccola perturbazione  $h_{\alpha\beta}$  alla metrica piatta di Minkowski rappresentata da  $\eta_{\alpha\beta}$  come segue:

$$g_{\alpha\beta} = \eta_{\alpha\beta} + h_{\alpha\beta} \quad (7)$$

nell'ipotesi di grandi distanze dalla sorgente  $T_{\alpha\beta} \approx 0$  ed espandendo al primo ordine in  $h$  dall'equazione di Einstein si ottiene la soluzione di un'onda denominata onda gravitazionale:

$$\square(h_{\alpha\beta} - \frac{1}{2}\eta_{\alpha\beta}h) = -\frac{16\pi G}{c^4}T_{\alpha\beta} \quad (8)$$

In completa analogia con le onde elettromagnetiche, le onde gravitazionali si propagano nel vuoto alla velocità della luce, quello che le distingue sono la loro origine. Da una parte le onde elettromagnetiche vengono generate dall'accelerazione di cariche elettriche e dal momento di dipolo dovuto alle

cariche opposte, invece le onde gravitazionali originano dalla variazione del momento di quadrupolo della distribuzione di massa nella sorgente e dei momenti di quadrupolo di ordine superiore. La conseguenza pratica di questa differenza è che non vengono prodotte onde gravitazionali dall'espansione o dalla contrazione simmetrica di oggetti massivi. Trattando le onde gravitazionali la deformazione dello spazio a seguito del passaggio dell'onda gravitazionale, trascurando gli ordini superiori al momento di quadrupolo, è espresso nella seguente relazione:

$$h \approx \frac{2G}{c^4} \ddot{Q} \frac{1}{D} \quad (9)$$

dove  $D$  è la distanza dalla sorgente. Una fondamentale differenza dalle onde elettromagnetiche risiede nella relazione 9 in cui la dipendenza è pari a  $D^{-1}$ , infatti delle onde gravitazionali si misura l'ampiezza, o meglio la variazione, e non l'intensità. Da un punto di vista sperimentale significa che il segnale decresce molto meno rapidamente rispetto ad un'onda elettromagnetica cui intensità asintoticamente si comporta come  $D^{-2}$ . L'immediata implicazione è che costruendo un rivelatore di onde gravitazionali con sensibilità doppia si riesce a rivelare segnali che arrivano ad una distanza doppia. Andare a considerare un volume sferico, cui il rivelatore di onde gravitazionali è al centro nel sistema di riferimento terrestre, con un raggio doppio significa avere accesso ad uno spazio di 8 volte più grande entro cui indagare i segnali delle onde gravitazionali.

## 2.6 Stima della vita del sistema binario in PG 1553+113

L'obiettivo del conto che viene proposto nel seguito è stabilire il tempo di vita previsto per il sistema binario PG 1553+113 assumendo come ipotesi iniziali le stime sperimentali dell'articolo di Tavani et al. [2018] in cui si stimano le masse dei due buchi neri:  $M_1 = 5 \times 10^8$  masse solari e  $M_2$  pari  $M_1/10$  e il periodo di variabilità pari a quello rivelato nell'emissione gamma pari a 2.2 anni. Il sistema di riferimento adottato presenta l'origine al centro del buco nero più massiccio, inoltre per studiare la dinamica dei due corpi si restringe lo spazio tridimensionale al solo piano dove giace l'orbita di  $M_2$  poichè il potenziale di attrazione è centrale dunque il moto è invariante per rotazioni del piano dell'orbita attorno al buco nero primario. In questo modo l'unico grado di libertà del problema risulta la distanza tra i due buchi neri poichè implicitamente nelle assunzioni appena citate si trascura qualsiasi altro campo di forze eccetto quello gravitazionale che dipende solo dalla coordinata radiale, infatti i calcoli seguenti si propongono di dare una stima per ordini di grandezza, calcoli più accurati esulano dallo scopo del seguente elaborato.

Per calcolare la distanza tra i due buchi neri indicata con  $a$  in prima approssimazione si può applicare la dinamica classica in quanto la scala temporale che interessa il processo è sufficientemente lunga da poter trascurare gli effetti relativistici. Si considera la dinamica del corpo  $M_2$  cui equazione del moto risulta:

$$M_2 \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{GM_1 M_2}{a^2} \quad (10)$$

Semplificando la massa  $M_2$ , nell'approssimazione di moto circolare l'accelerazione  $a_c$  è pari all'accelerazione centripeta definita come segue:

$$a_c = \omega a \quad (11)$$

che è legata al periodo dalla relazione:

$$a_c = \frac{2\pi a}{T} \quad (12)$$

Sostituendo l'accelerazione centripeta nell'equazione del moto ed isolando la distanza  $a$  tra i due buchi neri si ottiene:

$$a = \sqrt[3]{\frac{GM_1 T^2}{4\pi^2}} \quad (13)$$

dove  $G$  è la costante di gravitazione universale,  $M$  è la massa del sistema e  $T$  è il periodo di variabilità della curva di luce gamma di *Fermi*/LAT. I due buchi neri possono avvicinarsi fino ad una distanza

critica pari al raggio di Schwartzschild del sistema:

$$a_{min} = \frac{2GM_{sistema}}{c^2} \quad (14)$$

dopo la quale il sistema si fonde in un unico buco nero supermassiccio raggiungendo la coalescenza. Da un punto di vista fenomenologico uno dei parametri fondamentali da determinarsi per stimare la possibilità di rivelare un'onda gravitazionale è la potenza che viene emessa espressa dall'espressione:

$$P_{GW} = \frac{GM_1M_2}{2a^2} \frac{da}{dt} \quad (15)$$

da cui si può notare che la potenza emessa dall'onda gravitazionale dovuta al processo di coalescenza di un sistema binario è proporzionale alla variazione della distanza tra i due.

| a (pc) | $a_{min}$ (pc) | $t_{vita}$ (giorni) |
|--------|----------------|---------------------|
| 0.065  | 0.0044         | 274                 |

**Tabella 2:** Nella tabella sono riassunti i risultati dei conti che vengono proposti per calcolare la vita del sistema binario:  $a$  è la distanza attuale tra i due buchi neri,  $a_{min}$  è la distanza critica che raggiungono prima dello stadio di coalescenza e  $t_{vita}$  è il tempo in cui il sistema binario sopravvive

A partire dalla soluzione ondulatoria dell'equazione di Einstein è possibile determinare la velocità con cui i due buchi neri si avvicinano tra loro:

$$\frac{da}{dt} = \frac{64 G^3}{5 c^5} \frac{1}{a^3} (M_1 + M_2) M_1 M_2 \quad (16)$$

Poichè l'equazione differenziale 16 è a variabili separabili è possibile calcolare semplicemente il tempo di vita atteso in prima approssimazione del sistema PG 1553+113:

$$\int_a^{a_{min}} r^3 dr = \int_{t_{vita}}^0 \frac{64 G^3}{5 c^5} (M_1 + M_2) M_1 M_2 dt \quad (17)$$

Integrando la funzione polinomiale ed invertendo la relazione 17 è possibile ricavare l'espressione analitica del tempo di vita del sistema:

$$t_{vita} = \frac{5c^5}{256} \frac{a^4 - a_{min}^4}{G^3} \frac{1}{(M_1 + M_2)M_1M_2} \quad (18)$$

Sostituendo i valori numerici delle costanti, delle masse e del periodo di rotazione si ottengono i risultati in tabella 2. Siccome il tempo di vita del sistema binario è indicativo della natura del processo solo se contestualizzato sugli ordini di grandezza dei tempi di vita di altri oggetti astronomici in tabella 3 sono mostrati alcuni dati particolarmente rilevanti. Dalla tabella 2 si evince che il tempo di vita molto breve rispetto alle scale di tempo di vita di altri oggetti di interesse astronomico.

| oggetto            | vita media (anni) |
|--------------------|-------------------|
| radio galassia     | $o(10^8)$         |
| Via Lattea         | $o(10^9)$         |
| Stelle di neutroni | $o(10^4)$         |

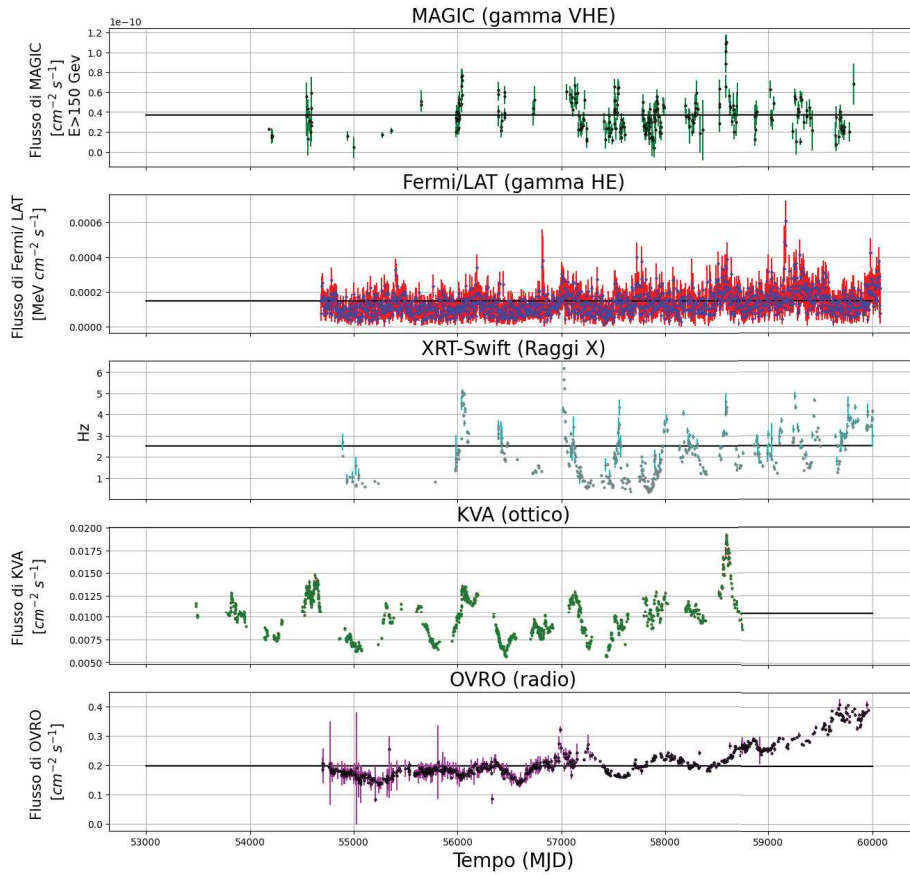
**Tabella 3:** Nella tabella sono riassunti i tempi di vita di alcuni oggetti di interesse astrofisico come confronto al calcolo del tempo di vita del sistema binario PG 1553+113 [Parma et al., 2002, Kalirai, 2012, Alpar, 2001]

La brevità di vita di un sistema binario di buchi neri rende la rivelazione di onde gravitazionali da parte di quest'ultimo particolarmente rara. Il calcolo che è stato svolto, puramente approssimativo, vuole essere una semplificazione del primo calcolo svolto su un sistema di due masse nell'articolo di Peters [1964].

### 3 Analisi multibanda della curva di luce

In questo lavoro di tesi, sono stati usati alcuni dati privati (MAGIC, OVRO e KVA) ed altri dati pubblici (*Fermi*/LAT e *XRT-Swift*) che sono stati reperiti dalla candidata in autonomia. Inoltre parte dei dati sono stati recentemente inclusi in articolo della collaborazione MAGIC (sottomesso alla rivista internazionale MNRAS). Il primo passo verso lo studio della variabilità multibanda è studiarne le curve di luce costruite a partite da campagne osservative di più strumenti che afferiscono ad un dominio delle frequenze diverso tra loro (Sez. 3.1). Seppur un'analisi visiva sia già sufficiente a notare una variabilità su larga scala (annuale) in ciascuna curva di luce indipendentemente dalla frequenza dei fotoni incidenti sui rivelatori, viene fornito un argomento statistico-quantitativo sulla non costanza della curva di luce tramite il test del chi quadro. Tutti i programmi in python utili all'analisi e alla rappresentazione grafica sono stati sviluppati dalla candidata in autonomia.

#### 3.1 Descrizione dei telescopi e presentazione dei dati



**Figura 7:** Curva di luce multibanda della sorgente PG 1553+113. Il grafico mostra il flusso di fotoni incidenti sullo strumenti di pertinenza ad una data banda in funzione del tempo di acquisizione espresso in MJD dove 1 MJD corrisponde a 24 ore, in particolare modo il set di dati analizzato copre la finestra temporale dall'Aprile 2005 (dati KVA) al Maggio 2023 (dati *Fermi*/LAT). In relazione all'analisi che è stata effettuata nel presente lavoro si evince che la sorgente PG 1553+113 è variabile in tutte le bande prese in esame. La linea nera presente nel grafico rappresenta il flusso medio di fotoni incidenti sul rivelatore.



Il grafico 7 è una **curva di luce multibanda** che riporta in ordinata il flusso di fotoni incidenti sugli strumenti adoperati (ad eccezione di *Fermi*/LAT in cui viene rappresentato il flusso di energia) e in ascissa il tempo espresso in MJD (*Modified Julian Date*) che è una scala temporale in cui 1 MJD corrisponde a 24 ore: il set di dati considerati copre la finestra temporale dal dall'Aprile 2005 (dati KVA) al Maggio 2023 (dati *Fermi*/LAT). Il flusso di fotoni incidenti rappresenta il numero di fotoni che arrivano al rivelatore per unità di superficie e tempo, è espresso in  $cm^{-2}s^{-1}$  dove l'area e il tempo si riferiscono all'area efficace del rivelatore e il tempo di acquisizione. Lo studio della curva di luce della sorgente PG 1553+113 ha interessato le diverse frequenze di emissione rilevabili da diversi **strumenti** di cui si illustrano le caratteristiche principali:

- Il telescopio MAGIC<sup>5</sup> (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov telescope) sfrutta il cosiddetto "Effetto Cherenkov" che consiste nell'emissione di un cono di luce prodotto da una particella che viaggia nell'atmosfera a velocità superiori a quella della luce. MAGIC, situato in La Palma nelle Isole Canarie, è in grado di raccogliere il segnale di raggi gamma ad alte energie VHE (tra 150 GeV-30 TeV), per ulteriori dettagli si fa riferimento a Aleksić et al. [2016]. I dati sono stati forniti cortesemente dalla collaborazione MAGIC di cui la candidata è tesista;
- Il satellite *Fermi*<sup>6</sup> messo in orbita dalla collaborazione Fermi provvisto del telescopio LAT (Large Area Telescope) i cui dati sono di dominio pubblico [Atwood et al., 2000] e riguardano la banda gamma HE (30 MeV-100 GeV). Il telescopio LAT è formato da tracciatori al silicio, in cui il passaggio di un raggio gamma genera coppie elettrone e positrone che serve per misurare la direzione del raggio incidente, e da un calorimetri elettromagnetici per la misura dell'energia tramite i processi di produzione di coppie e brehmsstrahlung. La produzione di coppie è uno degli effetti dell'interazione dei fotoni con la materia: in un mezzo materiale il fotone, se ha energia almeno uguale al doppio dell'energia a riposo dell'elettrone, produce un elettrone ed un positrone il quale si annichila quasi istantaneamente con un altro elettrone. Invece il brehmsstrahlung è un processo fisico che prevede l'emissione di un fotone quando un elettrone passa in prossimità di un nucleo presente nel mezzo materiale in cui si trova. Insieme i due processi generano una cascata di fotoni chiamato sciame elettromagnetico;

I dati sono stati reperiti, dalla candidata, in un catalogo online <sup>7</sup> dove sono raccolte le curve di luce registrate da *Fermi*/LAT da cui è possibile selezionare la sorgente, decidere il formato dei dati e le unità di misura sugli assi della curva di luce in base al flusso di energia o di fotoni incidenti.

- XRT (X Ray Telescope) dell' osservatorio *Neil Gehrels Swift*<sup>8</sup> deputato al raccoglimento della radiazione nella banda dei raggi X cui dati sono resi pubblici per l'analisi [Gehrels et al., 2004] (nel seguito indicato solo con l'acronimo *Swift*);
- KVA, responsabile delle rivelazioni nella banda ottica, è un telescopio situato a La Palma nelle isole canarie, recentemente smantellato, era controllato da remoto dal centro di comando in Finlandia, le sue osservazioni erano coordinate con il telescopio MAGIC durante la notte. Per quanto riguarda la banda ottica si fa riferimento al seguente sito<sup>9</sup> in cui sono racchiusi i principali monitoraggi costanti attualmente in essere. I dati ottici utilizzati dalla seguente analisi sono privati;
- il telescopio OVRO<sup>10</sup> (*Owens Valley Radio Observatory*) collocato negli Stati Uniti è deputato alla rivelazione della banda radio della sorgente [Richards et al., 2011]. I dati radio sono privati stati gentilmente concessi dalla collaborazione ai fini dell'analisi nel seguito di questa tesi.

<sup>5</sup><https://magic.mpp.mpg.de/>

<sup>6</sup><https://fermi.gsfc.nasa.gov/>

<sup>7</sup><https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/LightCurveRepository/index.html>

<sup>8</sup>[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/swift/main](https://www.nasa.gov/mission_pages/swift/main)

<sup>9</sup><https://users.utu.fi/kani/1m/>

<sup>10</sup><https://www.ovro.caltech.edu/>



Allo scopo di facilitare la visualizzazione della curva di luce è stata inserita in Fig. 7 una linea che corrisponde al flusso medio rivelato in modo da avere un’idea sulla dispersione dei dati attorno ad un fit costante. Per quanto riguarda la curva di luce nella banda X i dati sono stati analizzati dalla candidata utilizzando uno strumento di analisi online chiamato *”Swift-XRT Monitoring of Fermi-LAT Sources of Interest”*<sup>11</sup> con output il tempo, numero di conteggi al secondo e l’errore relativo in base alle impostazioni inserite in input. A partire dai dati nella banda X sono stati esclusi dall’analisi i limiti superiori e i dati con un errore inverosimilmente eccessivo rispetto agli altri.

Inoltre per reperire i dati relativi alla banda gamma HE del telescopio *Fermi*/LAT è stato utilizzato il sito dell’organizzazione<sup>12</sup> dove si trova il catalogo della curve di luci *Fermi*[Adhikari et al., 2023], dove è accessibile una rappresentazione preliminare della curva di luce, da cui sono stati scaricati i dati acquisiti con un campionamento di 3 giorni.

### 3.2 Caratterizzazione della curva di luce

L’utilità delle curve di luce è la possibilità di caratterizzare lo stato di una sorgente: in assenza di significative variazioni nell’emissione o nell’orientazione del getto il flusso di fotoni della sorgente rimane costante. In questo lavoro, la variabilità nelle diverse bande viene dapprima dimostrata dal **test del chi quadro**. Per applicare il test innanzitutto per ogni campione è stata calcolata la media pesata che rappresenta meglio il flusso di fotoni medio che incide sul rivelatore (i risultati sono visibili in tabella 4) e poi è stato calcolato il chi quadro.

| Telescopio | flusso medio  | $\chi^2$ ridotto |
|------------|---|------------------|
| MAGIC      | $3.7 \times 10^{-11} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$    | 6.71             |
| Fermi/LAT  | $1.5 \times 10^{-4} \text{ MeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ | 2.21             |
| XRT Swift  | 2.51 Hz   | 969              |
| KVA        | $1.05 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$    | 436              |
| OVRO       | $0.198 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$                  | 137              |

**Tabella 4:** Nella seguente tabella vengono rappresentati in ordine da sinistra a destra: il rivelatore di pertinenza, il flusso medio rivelato che è visibile nel grafico 7 con una linea nera e il chi quadro ridotto calcolato rispetto alla media pesata del flusso. Si nota che il valore del chi quadro ridotto è troppo alto, perciò il fit con una costante non è un buon modello per caratterizzare il flusso incidente sul rivelatore ad eccezione di *Fermi* cui variabilità verrà studiata in seguito.

La tabella 4 riassume il test del chi quadro applicato ad un fit costante ove la costante è proprio la media pesata del flusso dei fotoni incidenti sul rivelatore. Siccome tutti i chi quadro ridotti sono molto maggiori di uno si conclude che il flusso dei fotoni incidenti non è compatibile con una costante, in tal senso la sorgente è variabile.

Uno degli aspetti cruciali nella **descrizione della curva di luce** è che la banda gamma di *Fermi*/LAT del grafico 7 mostra un andamento periodico della curva di luce, calcolata nell’articolo di Ackermann et al. [2015], di circa 2.2 anni. Il test del chi quadro rende i dati *Fermi* quelli più compatibili con una costante a causa della finezza del binning della curva di luce e la grandezza degli errori associati a ciascun flusso. Similmente nella curva di luce della banda ottica è presente una struttura periodica più complessa a due picchi [Tavani et al., 2018].

Nella banda gamma VHE deputata al telescopio MAGIC tale periodicità non può essere confermata in quanto la curva di luce presenta alcuni archi temporali in cui sono mancanti dei dati a causa alla scarsa visibilità della sorgente nei periodi invernali dell’anno o durante i giorni in cui le condizioni atmosferiche non hanno permesso l’osservazione. Inoltre anche per la banda X non può essere confermata la periodicità come nella curva di luce ottenuta dai dati *Fermi*/LAT perchè i dati sono insufficienti.

<sup>11</sup>[https://www.swift.ac.uk/user\\_objects/](https://www.swift.ac.uk/user_objects/)

<sup>12</sup><https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/LightCurveRepository/>

## 4 Correlazioni dei flussi intrabande

Il cuore dell'analisi del presente elaborato risiede in questo capitolo ove ci si addentra nell'analisi delle correlazioni intrabande. Le questioni da affrontare sono: se c'è una correlazione tra bande (coefficienti di correlazione) e in caso affermativo come queste correlano in funzione del tempo (funzione di correlazione). I risultati ottenuti andranno poi interpretati sulla base dei modelli di emissione considerati per PG 1553+113. Viene prima descritto l'indicatore statistico, detto coefficiente di Spearman, che è maggiormente utilizzato in questo genere di analisi e le ipotesi sotto cui si applica. Il passo successivo è quello di valutare le correlazioni tra i flussi simultanei per le curve di luce a disposizione dall'Aprile 2005 al Maggio 2023. In secondo luogo vengono stimate le correlazioni restringendo il dominio temporale delle curve di luce ad un evento eccezionale (flare) che ha avuto luogo nell'Aprile del 2019. Infine, è stato preso in esame un campione di flussi simultanei che si trovano al di sopra dell'intensità dell'emissione media indipendentemente dalla loro distribuzione temporale. Questo lavoro è un'estensione dell'analisi proposta dalla collaborazione MAGIC (sottomessa a MNRAS), che si limita ai dati fino al 2017. Il codice per l'analisi in python è stato sviluppato in prima persona dalla candidata con la correzione guidata della Prof.ssa Prandini. L'obiettivo principale, a parte quello di studiare la variabilità della curva di luce, è quello di confrontare con l'articolo della collaborazione MAGIC i risultati derivanti da un campione più esteso di dati.

### 4.1 Indicatori di analisi statistica utilizzati

In generale per quantificare il grado di correlazione tra due campioni si usano degli indicatori statistici, per l'analisi svolta durante il seguente lavoro di tesi è stato l'indicatore di Spearman. Poiché la distribuzione del flusso non è gaussiana, ma segue una distribuzione lognormale come descritto nell'articolo Rieger [2019], non è concettualmente corretto usare altri indicatori come ad esempio il coefficiente di Pearson. Infatti il **coefficiente di Spearman** ha il vantaggio di non ereditare implicitamente l'ipotesi di fluttuazioni gaussiane, dunque è concettualmente da preferire rispetto a Pearson. La teoria sulla statistica delle correlazioni definisce il dominio in cui vivono i coefficienti di correlazione ossia  $-1 \leq \rho \leq 1$ , dove gli estremi corrispondono rispettivamente ad anticorrelazione e correlazione dei dati e all'avvicinarsi a zero i dati non risultano più correlati. Siccome i casi limite correlazione-anticorrelazione perfetta sono eventi rari che non sono stati riscontrati nella trattazione successiva, per interpretare i coefficienti di correlazione è utile stabilire degli intervalli di confidenza che non vengono definiti a priori dalla teoria, dunque è necessario scegliere delle linee interpretative riassunte in tabella 5 in modo da fornire una chiara chiave di lettura dei risultati.

Ad ogni coefficiente di correlazione viene associato un numero chiamato p-valore che quantifica la probabilità dell'ipotesi nulla di "non correlazione" dei dati: minore è il p-valore maggiore è il grado di correlazione dei dati. Per l'analisi dei dati della sorgente PG 1553+113 per calcolare il coefficiente di Spearman è stato utilizzato il pacchetto di python *scipy.stats*.

| Modulo del coefficiente | p-valore       | Interpretazione      |
|-------------------------|----------------|----------------------|
| 0-0.3                   | $\geq 10^{-3}$ | scarsa correlazione  |
| 0.31-0.6                |                | modesta correlazione |
| 0.61-1                  | $\leq 10^{-4}$ | ottima correlazione  |

**Tabella 5:** In tabella sono rappresentati i diversi range possibili per il coefficiente di correlazione e il rispettivo p-valore in base al giudizio adottato riguardo al grado di correlazione dei risultati. Queste interpretazioni sono la chiave di lettura usate per l'analisi dei dati nel seguito.

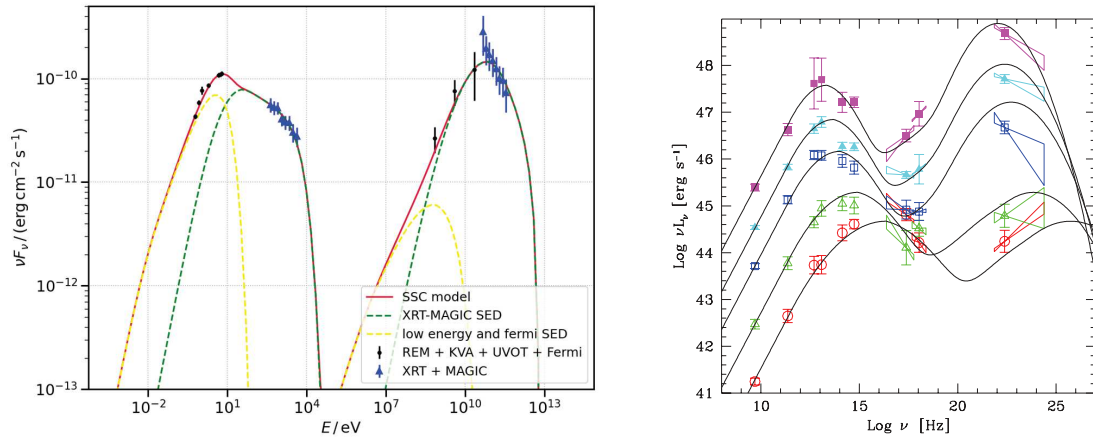
### 4.2 Relazione tra modelli di emissione del getto e correlazioni intrabande

Una delle sfide nello studio dei blazar è quella di creare dei modelli, quanto più pertinenti alle osservazioni sperimentali, in grado di spiegare l'emissione del getto. In questo ambito lo strumento più potente

per spiegare la fisica nel getto è la ricostruzione della SED implementando dei fit che riproducano le aspettative sul picco del sincrotrone e del Self Compton.

Il più semplice modello di SED è già stato descritto nel capitolo 2 ed è il risultato del **modello SSC** che viene riportato come confronto in figura 8(a destra). La caratteristica del modello SCC è quella di avere due soli picchi legati a due processi (il sincrotrone e il Compton inverso) ed ad un'unica popolazione di particelle che genera l'emissione: gli elettroni accelerati. Lo studio delle correlazioni intrabande per essere compatibili con il modello SCC devono presentare una spiccata correlazione tra le bande di pertinenza del singolo picco. Quindi le correlazioni aspettate per un modello SSC coerente sono: forte correlazione tra ottico e X e forte correlazione tra gamma HE e gamma VHE. Inoltre entrambi i picchi (sincrotrone e self compton) devono correlare tra loro in quanto sono processi praticamente simultanei e da un aumento dei fotoni del sincrotrone ci si aspetta rispettivamente un aumento delle interazioni dovute al processo di Self Compton.

Tuttavia sono possibili diverse complicazioni rispetto al modello SCC ad esempio un possibile modello di SED è un **modello a due zone** rappresentato in figura 8 (a sinistra). Per spiegare il legame tra correlazioni intrabande e la modellizzazione della SED si ricorre al grafico 8, che rappresenta un fit della SED, cortesemente fornito dal laureando magistrale Giuseppe Silvestri, a titolo di esempio. Una possibilità è che i picchi del sincrotrone e del Self Compton siano a loro volta formati da due picchi distinti sotto ai quali si diramano due regioni distinte chiamate appunto "zone", nell'esempio colorati in giallo e verde, a formare un modello a due zone distinte [MAGIC Collaboration et al., 2020]. L'analisi delle correlazioni intrabande è funzionale a determinare quali sono le due zone a partire dalle quali si studia il modello della SED. Nello specifico una zona è formata da due bande che tra loro correlano maggiormente rispetto alle altre. Nel caso della PG 1553+113, come visibile in 8 (a sinistra) il primo picco (sincrotrone) presenta a sinistra di esso i dati ottici e a destra quelli dei raggi X, invece il secondo (Self Compton) presenta a sinistra i raggi gamma HE e destra i raggi gamma VHE. In pratica, nell'esempio riportato (fig 8) la "zona" gialla comprende i dati ottici e quelli gamma HE, che richiede una correlazione più alta tra le bande ottico-gamma HE rispetto alle altre bande. Allo stesso modo si ragiona per il fit in verde che comprende i raggi X e i gamma VHE.



**Figura 8:** Il seguente grafico (a sinistra) che è stato fornito cortesemente dal laureando magistrale Giuseppe Silvestri, mostra la SED di un periodo specifico. Sull'asse delle ordinate è presente la densità spettrale di energia, invece sull'asse delle ascisse l'energia di riferimento dei fotoni incidenti sui rivelatori contrassegnati con i diversi colori nella legenda. L'interpolazione dei dati sperimentali suggerisce che, sotto ai due picchi del sincrotrone e del Self Compton, esistono due zone differenziate che contribuiscono alla SED. A confronto viene riportata a destra l'immagine adattata da Fossati et al. [1998], Donato et al. [2001] che rappresenta un modello semplice SSC.

Ed è proprio applicando ai modelli di emissione le correlazioni intrabande che si può dare un'inter-

pretazione della fisica del sistema perciò nel seguito viene approfondito tale studio.

### 4.3 Analisi delle correlazioni intrabande

L'analisi delle correlazioni intrabande ha previsto di stabilire la definizione operativa di due eventi, dove con "evento" si intende la rivelazione dei fotoni incidenti sul rivelatore, simultanei rispetto alle bande su cui si testa la correlazione. Infatti dal momento che gli strumenti di cui alla Sezione 3.1 non presentano osservazioni in coincidenza di due bande allo stesso preciso istante è necessario definire un intervallo entro cui i flussi di fotoni su due rivelatori diversi vengono considerati simultanei ai fini dell'analisi. La scelta dell'intervallo di simultaneità non può essere stabilita a priori, ma viene testata direttamente sui dati in base a:

- osservazione della variabilità non inferiore a quattro ore poichè sono rari i casi in cui la sorgente varia in modo così rapido;
- presenza di una statistica significativa effettivamente rappresentativa del campione;
- tempo di campionamento del rivelatore, in particolare i dati di *Fermi*/LAT campionati a 3 giorni non sono sensibili a cambiamenti nel flusso di fotoni avvenuti su intervalli temporali inferiori.

Per selezionare all'interno dei set di dati gli eventi simultanei su due diverse bande è stato utilizzato un programma python<sup>13</sup> appositamente implementato a tale scopo. Innanzitutto come input al codice è stato definito il range di simultaneità come la dispersione temporale massima tra due eventi afferenti a due bande differenti da testare come descritto da:

$$\delta t = t(MJD)_{banda1} - t(MJD)_{banda2} \quad (19)$$

dove *banda 1* e *banda 2* si riferiscono al dominio delle frequenze dei fotoni che vengono confrontate, le scelte effettuate per ciascun campione di dati sono riassunte in tabella 6.

Una volta stabilito il range di simultaneità conveniente viene implementato il programma python che minimizza il  $\delta t$  in modo da creare un campione di dati intrabanda il più possibile simultanei. Il passo successivo è computare il valore relativo del coefficiente di Spearman disponibile nel riassunto completo dei risultati per la stima della correlazione in tabella 6.

In tabella 6 le prime due colonne indicano le bande su cui è stata testata la correlazione seguite dal coefficiente di Spearman e il p-valore calcolato dall'analisi della candidata. Invece, la colonna denominata "Articolo coll. MAGIC" si riferisce ad i coefficienti di Spearman che sono presenti sull'articolo appena sottomesso della collaborazione MAGIC. A tal proposito l'obiettivo principale è confrontare i risultati tenendo presente ciò che segue:

- i dati analizzati dalla candidata prendono in esame un intervallo temporale più ampio dal dall'Aprile 2005 al Maggio 2023 a differenza dell'articolo della collaborazione MAGIC che tiene in considerazione solo l'arco temporale dal 2007 al 2017;
- i dati *Fermi*/LAT nell'analisi della collaborazione MAGIC sono stati binnati a 20 giorni, invece i dati più recenti, analizzati dalla candidata, presentano un campionamento a 3 giorni.

L'indicazione del p-valore ha lo scopo porre l'attenzione sulla confidenza con cui si mostra la correlazione. Nell'analisi il p-valore più alto si riferisce alla correlazione tra l'ottico e il radio e a seguire radio e raggi X. Il p-valore alto e il coefficiente di Spearman basso delle correlazioni con la **banda radio** porta a concludere che quest'ultima non mostra evidenti correlazioni con le altre bande considerate. Il motivo risiede nel fatto che è presente un ritardo rispetto alla banda gamma HE analizzato in maniera più approfondita nella **sezione 5**. Un'altra caratteristica curiosa della banda radio è l'innalzamento sistematico del flusso di fotoni a partire dalla fine del 2014 che certamente ha un

<sup>13</sup>Gentilmente fornito dalla Prof.ssa Elisa Prandini

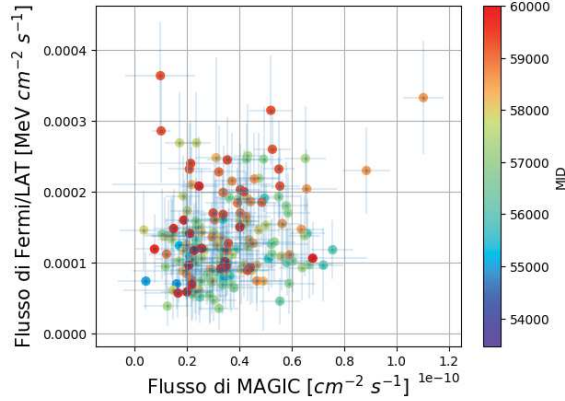
| Banda 1   | Banda 2   | Spearman 2005-2023 | p-valore             | $\delta t$ (MJD) | Articolo coll. MAGIC |
|-----------|-----------|--------------------|----------------------|------------------|----------------------|
| Raggi X   | Ottico    | 0.49               | $4 \times 10^{-11}$  | 1.5              | 0.37                 |
| Raggi X   | Gamma VHE | 0.44               | $4 \times 10^{-6}$   | 1.5              | 0.60                 |
| Gamma VHE | Ottico    | 0.41               | $3.5 \times 10^{-7}$ | 1.5              | 0.35                 |
| Gamma HE  | Ottico    | 0.41               | $7 \times 10^{-17}$  | 1.5              | 0.63                 |
| Radio     | Ottico    | 0.38               | $9 \times 10^{-9}$   | 1.5              | *                    |
| Radio     | Gamma HE  | 0.27               | $2 \times 10^{-11}$  | 1.5              | *                    |
| Raggi X   | Gamma HE  | 0.21               | $1 \times 10^{-4}$   | 1.5              | 0.32                 |
| Gamma HE  | Gamma VHE | 0.21               | 0.01                 | 1.5              | 0.39                 |
| Radio     | Raggi X   | 0.20               | 0.02                 | 1.5              | *                    |
| Ottico    | Gamma VHE | -0.10              | 0.42                 | 1.5              | *                    |

**Tabella 6:** In tabella viene mostrato il valore del coefficiente di Spearman e il relativo p-value. Il test di correlazione sull'intero campione di dati mostra che le bande maggiormente correlate sono ottico-gamma e banda X-gamma. Per quanto riguarda la banda gamma rappresentata da MAGIC e *Fermi*/LAT si può notare che non sono correlate. L'ultima colonna denominata "Confronto" riporta i coefficienti di Spearman dell'articolo di riferimento della collaborazione MAGIC. I dati segnati con (\*) sono mancanti nell'articolo della collaborazione perchè la banda radio ha un ritardo rispetto le altre che rende il calcolo del coefficiente di Spearman inconcludente.

impatto sulle correlazioni. Un'unica eccezione alla tendenza a non correlare con le altre bande risiede nella correlazione radio-ottico che potrebbe imputarsi al ritardo della banda ottica [Ackermann et al., 2015] rispetto al gamma HE, minore del radio, ma a sufficiente a mostrare una maggiore correlazione dei flussi simultanei oppure ad altre cause. Tuttavia per approfondire tale correlazione sono necessari ulteriori studi, valutando tutte le possibili ipotesi nella loro complessità. Come primo passo dell'analisi si propone un **confronto** tra le correlazioni pubblicate nell'articolo della collaborazione MAGIC e i risultati ottenuti dall'analisi recente (2005-2023). Innanzitutto la correlazione tra l'ottico e il gamma si comporta in maniera duplice in relazione a quelle dell'articolo: aumenta per l'ottico e il gamma VHE, ma diminuisce per l'ottico e il gamma HE. Difatti le due bande gamma correlano allo stesso modo con l'ottico a differenza di quanto riportato nell'articolo della collaborazione dove l'ottico correla in maniera nettamente maggiore con la banda HE. Un'altra differenza risiede nella relazione tra la banda X e le altre in quanto presenta un'alta correlazione con l'ottico (la maggiore correlazione tra bande in assoluto) che aumenta rispetto ai risultati del 2017. Inoltre è diminuita la correlazione tra raggi X con gamma VHE e gamma HE, ma indipendentemente dalla diminuzione dei coefficienti ciò che risalta è che la banda gamma (HE e VHE) correla in modo molto diverso con i raggi X (con coefficienti rispettivamente di 0.21 e 0.44) come si conferma dall'analisi della collaborazione cui coefficienti sono di 0.32 e 0.60. Da una parte se l'articolo della collaborazione MAGIC vede una maggiore correlazione tra gamma HE-ottico e gamma VHE-raggi X, dall'altra l'analisi recente porta a pensare che ci sia stato un cambiamento sostanziale di forte correlazione tra ottico-raggi X, raggi X-gamma VHE e tra l'ottico e il gamma, quest'ultima correlazione è la stessa sia in base a gamma HE che a VHE. Infine l'analisi conferma la scarsa correlazione tra le banda gamma HE e gamma VHE e tra gamma HE e raggi X come già previsto dall'articolo della collaborazione.

Di tutte le possibili correlazioni analizzate l'obiettivo della seguente analisi è studiare le bande maggiormente correlate di cui si fornisce la **descrizione dei grafici** nel dettaglio. Delle bande non correlate l'analisi si limita al calcolo del coefficiente di Spearman ad eccezione della scarsa correlazione dei fotoni raccolti dai telescopi *Fermi*/LAT e MAGIC come si vede in figura 9 poichè ha conseguenze importanti sulle conclusioni riguardo al modello SCC.

Il flusso dei fotoni presente in figura 9 appartiene al dominio dei fotoni **gamma ad alta frequenza HE e VHE**, in riferimento alla SED (Fig. 2) costituiscono il suo secondo picco: MAGIC misura i fotoni più energetici a destra del secondo picco invece *Fermi*/LAT rivela i fotoni a sinistra del secondo picco. Il fatto che i due strumenti rivelino flussi di gamma che non correlano nonostante siano causati



**Figura 9:** In figura è rappresentato il flusso dei fotoni rivelati da *Fermi*/LAT in funzione di quelli raccolti da MAGIC, la scala cromatica rappresenta la data di acquisizione. I punti sono colorati diversamente in base alla data in cui sono stati rivelati da entrambi i rivelatori. Tali bande HE e VHE non sono correlate tra loro anche se entrambi i fotoni sono molto probabilmente prodotti dallo stesso fenomeno: il processo Self Compton che costituisce il secondo picco della SED.

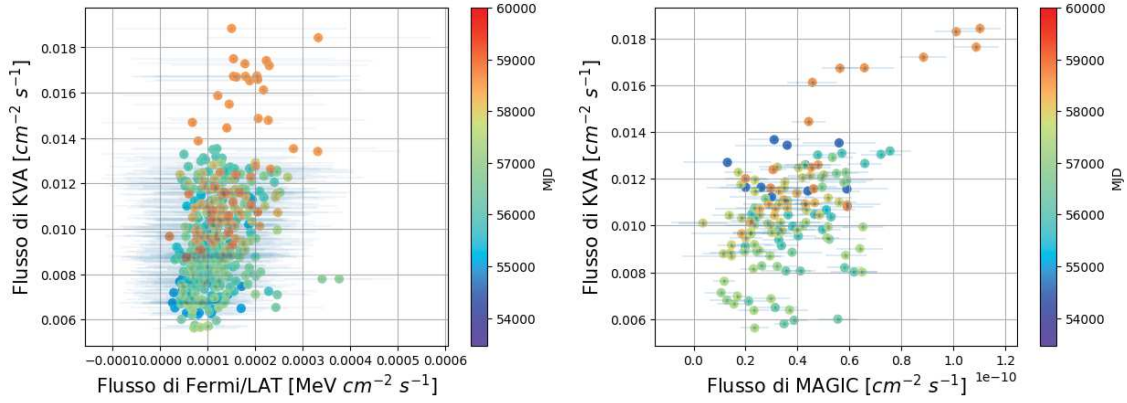
dallo stesso processo può essere dovuto alla diverse sistematiche intrinseche ai due strumenti, ma anche alla presenza di qualche fenomeno nel getto che causa un'importante frattura nel comportamento dei fotoni in base alla loro energia. Dalla figura 9 si evince che la scarsa correlazione è indipendente dalla finestra temporale dei flussi simultanei poichè non vi è differenza dell'andamento dei punti del grafico in base all'indice di colori rappresentanti la distribuzione dei dati rispetto la data in MJD.

Per quanto concerne le bande particolarmente correlate il punto di partenza dell'analisi coinvolge **la banda ottica e quella gamma** cui indice di Spearman è 0.41: come viene raffigurato nell'immagine 10 (a destra) sugli assi coordinati sono posti i flussi relativi ai fotoni rivelati da MAGIC e dal telescopio KVA, a completare il grafico un terzo asse mostra il tempo in cui è avvenuta la rivelazione mediante un'opportuna scala di colori. A partire dal grafico si nota che le rivelazioni avvenute nella stessa finestra temporale (di cui si può avere un'indicazione osservando il terzo asse colorato "MJD") si riferiscono ad un flusso di fotoni che mostra un chiaro andamento lineare, inoltre il grande numero di dati rende la statistica particolarmente nutrita dunque rappresentativa del campione. Dalla distribuzione dei punti sul grafico di figura 5 (a sinistra) si possono distinguere due popolazioni dominanti disposte a formare una regressione lineare con diversa pendenza: quella in rosso corrispondente ad un intervallo temporale dal 2018 al 2023 ( $\geq 58000$  MJD) e quella in blu che si riferisce ad un arco temporale cui limite superiore è 2014. Delle due popolazioni è fondamentale osservare che la popolazione in rosso ha tendenzialmente flusso nella banda ottica maggiore della popolazione in blu, in particolare si estende nella regione  $0.009-0.019 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  in modo da dividere il grafico in due zone cromatiche differenti. Con lo scopo di indagare le correlazioni intrabande in funzione dello stato della sorgente (si veda sezione 4.3-4.4) si rimanda lo studio approfondito di tale fenomeno al paragrafo successivo.

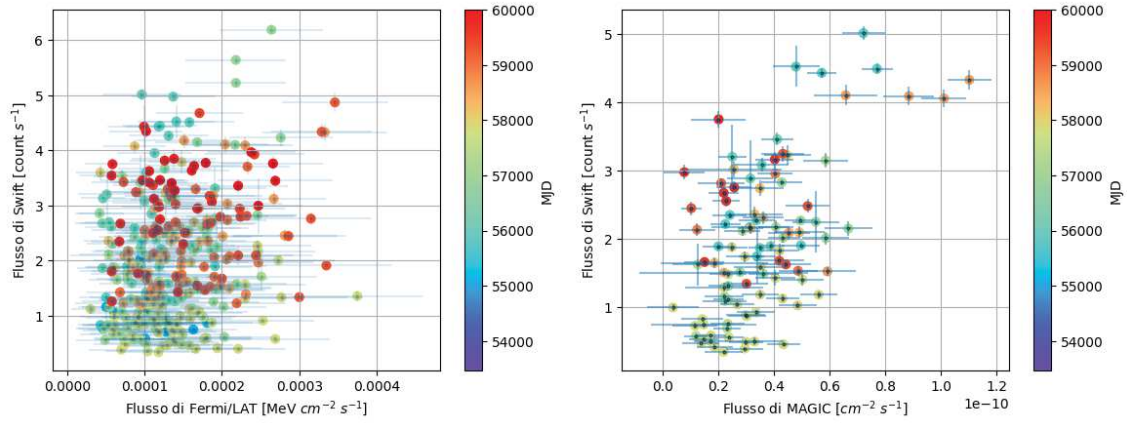
Oltre alla banda ottica e gamma, un'ulteriore correlazione che domina l'intero set di dati è quella tra la **banda X e quella gamma** di cui si mostrano le principali caratteristiche in figura 11: la particolarità immediatamente apprezzabile è il diverso comportamento dei flussi gamma rivelati da MAGIC e *Fermi*/LAT poichè solo MAGIC correla con la banda X di Swift.

In primo luogo si può evincere dall'immagine 11 (a destra) che sono visibili principalmente tre popolazioni: in azzurro con il flusso simultaneo più alto, in rosso e in verde con il flusso più basso tuttavia si nota che hanno lo stesso andamento sul grafico indipendentemente dall'intensità del flusso incidente. Per quanto riguarda la correlazione tra i dati di Swift e *Fermi*/LAT le tre popolazioni non si possono confrontare in base all'intensità del flusso della sorgente poichè convivono nella stessa regione di grafico, inoltre non è presente una chiara regressione lineare dei risultati rispetto la correlazione dei





**Figura 10:** In figura viene mostrato sulle ordinate il flusso di fotoni gamma ottici rivelati dal telescopio KVA in funzione di quelli VHE e HE rivelati dal telescopio MAGIC (a destra) E Fermi/LAT (a sinistra). I punti del grafico sono colorati in maniera differente in base al momento in cui sono stati rivelati per visualizzare più agilmente la relazione esistente tra incremento del flusso di fotoni e momento in cui questo si è verificato.



**Figura 11:** La figura rappresenta il flusso di fotoni del telescopio *Swift*-XRT XRT-Swift in funzione dei flussi simultanei rivelato dal telescopio MAGIC (a sinistra) e il telescopio *Fermi*/LAT (a destra). A sinistra la correlazione tra la popolazione rossa, azzurra e verde ha lo stesso andamento, invece a destra il grafico non mostra particolare correlazione come confermato dal coefficiente di Spearman in tabella 6.

dati come confermato dal coefficiente di Spearman nella tabella 6.

I ragionamenti proposti fino a questo punto suggeriscono che i telescopi MAGIC e *Fermi*/LAT rilevano fotoni indipendentemente, tuttavia i dati MAGIC correlano con la banda X di XRT-Swift ed entrambi le emissioni gamma (*Fermi*/LAT e MAGIC) correlano con l'ottico.

L'**interpretazione dei risultati** conferma in parte il modello SSC poichè l'importante correlazione tra l'ottico e i raggi X conferma che il flusso incidente sui rivelatori di pertinenza è da ricondurre allo stesso processo dell'emissione di sincrotrone. Se da un lato la correlazione tra le bande nel picco del sincrotrone dà una conferma sul modello SCC dall'altra una frattura rispetto alle previsioni del modello SCC è proprio la scarsa correlazione tra la banda gamma HE e gamma VHE, che oltre ciò mostrano comportamenti diversi rispetto alla correlazione con i raggi X. A tal proposito la correlazione

tra i raggi X e gamma VHE porta a pensare che questi possano costituire una "zona" che si influenza reciprocamente: un aumento del flusso di fotoni in banda X porta ad un aumento del flusso di fotoni in banda gamma VHE. Invece il fatto che entrambe le bande gamma correlino allo stesso modo con l'ottico potrebbe escludere un modello a due zone come in figura 8. Quello che si desume dall'analisi è che sono necessari ulteriori studi, preferibilmente restringendo il dominio temporale ad eventi specifici.

#### 4.4 Analisi del flare dell'Aprile 2019

L'analisi qui proposta ha lo scopo di studiare le correlazioni intrabande dopo aver ristretto il set di dati ad un evento specifico in cui si è realizzato un flare, la finestra temporale comprende i dati dall'inizio di Gennaio 2019 fino a fine agosto 2019. Durante la scelta dei dati simultanei candidati per il test di correlazione la scarsa statistica a supporto ha reso accessibili all'analisi solo alcune delle bande di interesse effettivamente significative per rappresentare il campione le quali vengono mostrate nella tabella 7.

La tabella 7, in analogia alla tabella 6 sulle correlazioni sulle curve di luce integrali, presenta nelle prime due colonne le bande da testare ed a seguire il coefficiente di Spearman con il suo p-valore associato. La sua utilità risiede nel fatto che offre la possibilità di un confronto diretto con le correlazioni estese alle curve di luce presenti in tabella 6 poichè durante il flare le bande di interesse sono maggiormente correlate tra loro. Di fatto è ragionevole pensare che una stessa perturbazione, che è causa della variabilità della curva di luce, interessi contemporaneamente più bande in modo che alla variazione del flusso di fotoni ad una data energia corrisponda una variazione in un'altra banda energetica.

| Banda 1   | Banda 2   | Spearman | p-valore          | $\delta t$ (MJD) | Spearman 2008-2023 |
|-----------|-----------|----------|-------------------|------------------|--------------------|
| Raggi X   | Ottico    | 0.89     | $5 \cdot 10^{-6}$ | 1.5              | 0.49               |
| Gamma VHE | Ottico    | 0.73     | $2 \cdot 10^{-3}$ | 1.5              | 0.41               |
| Raggi X   | Gamma VHE | 0.71 *   | 0.1               | 1.5              | 0.44               |
| Gamma HE  | Ottico    | 0.49     | $5 \cdot 10^{-3}$ | 1.5              | 0.41               |
| Raggi X   | Gamma HE  | 0.38     | 0.1               | 1.5              | 0.21               |
| Gamma VHE | Gamma HE  | 0.33     | 0.2               | 1.5              | 0.21               |

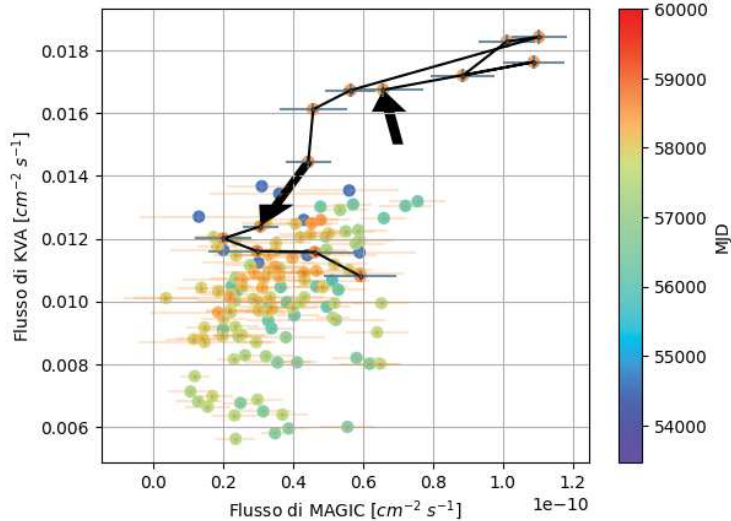
**Tabella 7:** In tabella viene mostrato il valore del coefficiente di Spearman e il relativo p-value relativi al flare del 2019. la segnalazione tramite il simbolo (\*) si riferisce ai telescopi cui statistica non supera i 5 dati simultanei intrabande. Un'osservazione complessiva rispetto ai risultati del coefficiente di correlazione è l'aumento in tutti i campioni del grado di correlazione durante il flare.

Questa parte di analisi mostra come restringendosi ad un periodo specifico di flare le correlazione cambiano visibilmente. Oltre all'aumento dei coefficienti di Spearman si conferma un'importante correlazione tra l'ottico e i raggi X, invece la relazione tra ottico e gamma cambia in base all'energia: la banda più correlata è tra ottico e gamma VHE. Per quanto riguarda il discorso sulla correlazione dei flussi incidenti dell'ottico e gamma HE in cui erano presenti due popolazioni in figura 5, la popolazione rossa comprende i fotoni del flare qui analizzato, dunque osservando la tabella 7 si evince che un'analisi separata della sola popolazione rossa non inficia particolarmente sulla correlazione (il coefficiente di Spearman passa da 0.41 a 0.49).

L'interpretazione delle correlazioni nel caso del flare dell'Aprile 2019 conferma il modello SCC per il picco di sincrotrone poichè la banda X e l'ottico restano le bande più correlate come nell'analisi della sezione 4.3. Resta la discrepanza con il modello per quanto riguarda il picco di Self Compton poichè anche nel flare si conferma una scarsa correlazione tra i gamma HE e gamma VHE. Inoltre la grande correlazione confrontabile tra gamma VHE e HE porta ad escludere la presenza di un modello a due zone, altrimenti l'ottico correlerebbe preferenzialmente con una delle due bande.



In secondo luogo sono stati analizzati i grafici con i flussi correlati con l'obiettivo di trovare degli schemi ben precisi della variazione dei due flussi in particolare degli andamenti che assomigliano a cicli di isteresi.



**Figura 12:** Nella figura in sovrapposizione sono presenti i dati relativi al flare dell'aprile 2019 cui punti sono collegati con una linea continua nera, con una freccia nera viene indicato l'inizio del ciclo di isteresi e il verso di percorrenza del ciclo rispetto ai dati analizzati. Sullo sfondo vengono rappresentati i flussi simultanei dell'intero set di dati per fornire la percezione della regione interessata dal ciclo di isteresi rispetto alle correlazioni integrali. Inoltre si dall'immagine si evince che il flare ha interessato entrambe le bande (gamma e ottico) poichè i dati occupano una regione di spazio estrema inesplorata dagli altri dati simultanei (in alto a destra)

Lo studio di questo tipo di fenomenologia è importante per ricavare delle informazioni sui meccanismi di emissione dei blazar e le caratteristiche del campo magnetico o sulle dimensioni della zona di emissione.

L'unico set di dati di interesse è relativo ai flussi simultanei correlati della **banda ottica KVA e quella gamma di MAGIC** che presenta un'isteresi ben visibile in 12. Il verso di percorrenza del ciclo è sinistrorso: l'inizio è segnato dalla freccia in nero cui segue un aumento di entrambi i flussi fino a quando KVA rileva  $0.018423 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Dopo aver raggiunto il massimo l'intensità del flusso di entrambe le bande precipita fino a  $0.010808 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  completando la parte inferiore dell'isteresi. Nell'articolo di Abeysekara et al. [2017] viene mostrata un'applicazione di tale studio sulla sorgente Markarian 521 fornendo delle interpretazioni riguardo all'insorgenza di alcune figure ricorsive nel grafico di correlazione incrociata di due bande diverse. La formazione di strutture simili a cicli di isteresi è dovuta ai due processi complementari: accelerazione delle particelle nel getto ed il loro raffreddamento su scale temporali compatibili tra loro. Un importante parametro del ciclo è il suo verso di percorrenza: se il ciclo di isteresi è orario si parla di "soft lags" altrimenti se il verso è antiorario si tratta di "hard lags" i quali indicano un grande ritardo di emissione di una banda rispetto ad un'altra o un ritardo piccolo tale da avere delle curve di luce multibanda che realizzano un flare quasi contemporaneamente. Infatti l'evento rappresentato in figura 12 si può caratterizzare nel dominio dei "hard lags" in quanto il verso di percorrenza del ciclo è antiorario. Una serie di linee interpretative recentemente si stanno diramando per comprendere il motivo per cui una banda energetica sia in ritardo rispetto ad un'altra.

La candidata al termine dell'analisi qui proposta ha voluto sondare altre possibilità per caratterizzare l'evoluzione temporale del sistema, infatti nel seguito viene proposto un metodo per verificare ci siano ritardi nella correlazione di una banda con l'altra.

## 5 Analisi della funzione di correlazione e autocorrelazione

Fino a questo momento è stata testata la correlazione tra eventi simultanei, pertanto eventi che entro un certo intervallo si potevano considerare avvenuti allo stesso tempo. Tuttavia rimane così inevasa la possibilità che una data banda energetica correli con un'altra o addirittura con se stessa dopo un certo ritardo. Nel primo caso si studia la correlazione tra due bande diverse in cui l'aumento del flusso di fotoni in una porta all'aumento del flusso di fotoni dell'altra, dopo un certo tempo  $\tau$ , detto lag, dove si realizza il picco della funzione di correlazione (sez. 5.1). Un esempio di questo tipo di processo è il ritardo tra la banda radio (dati OVRO) e la gamma HE (dati *Fermi*/LAT) che verrà discusso più nel dettaglio nella sez. 5.3. Alla luce dei risultati precedenti sulle correlazioni ci si aspetta che le bande che si sono rivelate essere quelle più correlate siano quelle che presentano un picco di correlazione attorno allo zero-lag, altrimenti la correlazione tra il flusso di fotoni simultanei sarebbe stata scarsa. Invece, quando si studia l'autocorrelazione di una curva di luce si intende correlare una curva di luce con se stessa alla ricerca di una periodicità, ossia uno schema fisso in cui sempre dopo un certo intervallo di tempo  $\tau$  si nota un massimo della correlazione. Perciò per confermare la periodicità della curva di luce *Fermi*/LAT è stata utilizzata la funzione di autocorrelazione nella sez. 5.2. La candidata si è avvalsa di un pacchetto python disponibile in rete di cui ha dovuto capire il funzionamento e modificare dei parametri dallo script.

Il seguito non vuole essere un'analisi esaustiva sulle bande di confidenza e sul fit per determinare con precisione il ritardo bensì un'analisi visiva che illustra le opportunità che lo strumento della autocorrelazione può offrire. Inoltre è un'opportunità per ripercorrere i risultati in letteratura e confrontare con un set di dati più ampio se ci sono modifiche sostanziali.

### 5.1 Definizione della funzione di correlazione e di autocorrelazione

Prima di occuparsi di mostrare i risultati sui set di dati viene fornita una breve introduzione teorica al metodo statistico utilizzato così da sottolinearne le implicazioni dell'analisi seguente. Siano  $\{x_i\}, \{y_i\}$  i due set di dati che rappresentano le curve di luce su cui si testa la correlazione si definiscono le correlazioni discrete senza bin (ENG:unbinned discrete correlations):

$$UDCF_{ij} = \frac{(x_i - \langle x \rangle)(y_j - \langle y \rangle)}{\sqrt{(\sigma_x^2 - e_x^2)(\sigma_y^2 - e_y^2)}} \quad (20)$$

dove  $\langle x \rangle$  e  $\langle y \rangle$  sono i valori medi,  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  è la deviazione standard ed infine  $e_x, e_y$  sono gli errori sulla media di entrambe le popolazioni. La **funzione di correlazione** viene espressa in funzione della distanza temporale dei due eventi ossia si definisce  $\tau$ , da qui in poi detto "lag":

$$\tau = t_i - t_j \quad (21)$$

da cui vengono esclusi tutti i punti tali per cui  $i=j$  in modo da eliminare gli errori di sfasamento sulla correlazione [Edelson and Krolik, 1988]. Dunque dato  $N$  il numero di elementi  $(x_i, y_i)$  all'interno del bin di riferimento è possibile definire conseguentemente la funzione di correlazione:

$$DCF_\tau = \frac{1}{N} UDCF_{ij} \quad (22)$$

Per assegnare la deviazione standard della funzione di correlazione si implementa la formula seguente:

$$\sigma_{DCF(\tau)} = \frac{1}{N-1} \sqrt{\sum (UDCF_{ij} - DCF_\tau)^2} \quad (23)$$

Utilizzare lo strumento della funzione di correlazione fornisce un'informazione aggiuntiva sul ritardo della correlazione di una banda rispetto all'altra rispetto ai coefficienti di correlazione di Pearson e Spearman che intervengono esclusivamente sui flussi della sorgente ignorando la data di rivelazione.

Inoltre tramite delle simulazioni Montecarlo delle curve di luce è possibile stabilire degli intervalli di confidenza della bontà della correlazione.

Nel momento in cui viene rappresentata la funzione di correlazione in funzione del ritardo tra le bande ogni picco corrisponde ad un massimo della correlazione dei flussi tra le bande e il rispettivo  $\tau$  indica il ritardo tra l'una e l'altra. Un ulteriore strumento del tutto analogo risiede nella funzione di autocorrelazione che testa la correlazione del flusso di una curva di luce rispetto se stessa. Un picco della funzione di autocorrelazione spostato rispetto a  $\tau = 0$  mostra la periodicità dell'emissione della sorgente.

Nell'analisi successiva è stato utilizzato il pacchetto python pyzdcf.1.0.0 [Jankov et al., 2022] che utilizza la *z-transformed correlation function* [Alexander, 2013] che sfrutta gli stessi principi della funzione di correlazione, però facendo un cambio di variabile in modo da risolvere alcuni problemi tra cui il fatto che funzione di distribuzione dei flussi non è normale, dunque stimare  $UDCF_{i,j}$  usando le deviazioni standard come errori sulle misure può portare a risultati inaccurati. Quando i due campioni  $\{x_i\}, \{y_i\}$  si discostano da una distribuzione normale è possibile trasformare la variabile  $UDCF_{i,j}$  nella variabile  $z$  di Fisher, che approssimativamente segue una distribuzione gaussiana, definita da:

$$z = \frac{1}{2} \log \frac{1 + UDCF_{ij}}{1 - UDCF_{ij}} \quad (24)$$

Indipendentemente dalla variabile di Fisher i ragionamenti espressi per interpretare i picchi della funzione di correlazione sono analoghi nel caso della  $z$ -dcf.

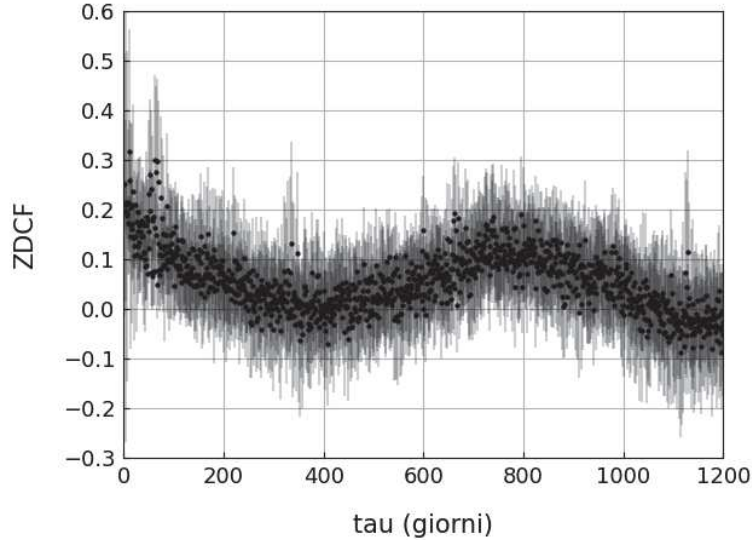
## 5.2 Analisi della funzione di autocorrelazione dei dati Fermi/LAT

Una prima applicazione della **funzione di autocorrelazione** è l'analisi della periodicità del flusso di fotoni raccolti da Fermi/LAT poichè il campionamento a 3 giorni continuativo fornisce un set di dati particolarmente nutrito. Per implementare la  $z$ -dcf il programma usato in questa analisi richiede in input la curva di luce da autocorrelare e restituisce una lista di variabili: il valore del ritardo  $\tau$  ed il suo errore, il valore numerico della dcf e il suo errore ed il numero di bin in cui il dato si trova. Il parametro che definisce la finezza del binning è la risoluzione che è stata manualmente modificata dallo script del programma pyzdcf.

La figura 13 mostra un focus della  $z$ -dcf in funzione dell'intervallo temporale  $\tau$  come definito sopra, essa ha un andamento che presenta più picchi che corrispondono alla massima correlazione osservabile della curva di luce *Fermi* con se stessa. Nel caso si analizzasse un segnale ideale completamente privo di periodicità ci si aspetterebbe un unico picco di correlazione nell'intorno dello zero-lag ( $\tau = 0$ ) poichè il flusso simultaneo dei dati ha un ritardo nullo rispetto a se stesso. Tuttavia prendendo in considerazione **la curva di luce Fermi** (fig. 13) si nota che come in ogni funzione di autocorrelazione il primo picco allo zero-lag, ma la particolarità che indica una vera e propria periodicità riguarda la presenza di picchi in posizioni diverse da zero. Avere un picco fuori dall'intorno di zero-lag significa che osservando allo zero-lag o al tempo  $\tau$  si descrive la stessa emissione, pertanto il comportamento è periodico. Inoltre il periodo della variabilità corrisponde esattamente al ritardo rispetto allo zero-lag. Dal grafico 13 si può osservare che il **secondo picco** dopo lo zero-lag è attorno ai 750-800 giorni che è compatibile con la periodicità dell'articolo di Ackermann et al. [2015] da cui stima la periodicità della curva di luce *Fermi* di circa 2.2 anni.

Per quantificare se il picco ritardato rispetto allo zero-lag in figura 13 è confrontabile con il picco allo zero-lag si dovrebbero stimare gli intervalli di confidenza sulla bontà della correlazione a  $1\sigma$ ,  $2\sigma$  e  $3\sigma$  che corrispondono rispettivamente ad una confidenza del 68.3 %, 95.5% e 99.7%. Per definire gli intervalli di confidenza sulla correlazione dei dati si eseguono un centinaio di simulazioni Montecarlo della curva di luce *Fermi*, poi su ciascuna è stata calcolata la distribuzione della funzione di correlazione. Tuttavia un'analisi così approfondita esula dagli scopi dell'elaborato.

Nonostante l'analisi approssimata utilizzando il set di dati esteso dal 2008 al 2023 viene a conferinarsi la stessa periodicità dell'articolo [Ackermann et al., 2015].



**Figura 13:** Nella figura viene rappresentata la z-dcf in funzione del ritardo  $\tau$  ristretta al primo picco dopo lo zero-lag dei dati Fermi/LAT. Visivamente è possibile notare che dopo lo zero-lag esiste un secondo picco di correlazione attorno ai 750-800 giorni coerentemente con quanto già pubblicato nell'articolo Ackermann et al. [2015].

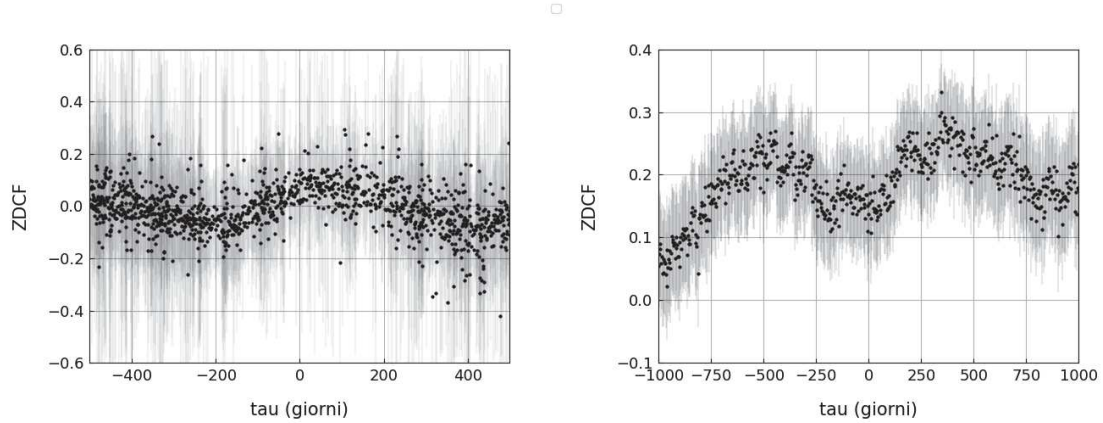
### 5.3 Analisi delle funzioni di correlazione della banda radio (OVRO) e gamma (Fermi/LAT)

Dalla sezione precedente sulle correlazioni intrabande simultanee si evince che la **banda radio** non correla con nessuna delle altre bande prese in considerazione se si confrontano i flussi simultanei. Ed è proprio la caratteristica della non simultaneità della banda radio rispetto alle altre che rende quell'analisi inefficace al fine di studiare la correlazione che quest'ultima instaura con le altre bande. Il fatto che il coefficiente di Spearman abbia suggerito una scarsa correlazione non significa che non ci sia correlazione tra la banda radio e le altre poichè l'ipotesi di simultaneità toglie un grado di libertà nell'analisi, ossia l'informazione sull'evoluzione temporale dell'emissione. Infatti, ad esempio, la banda radio presenta un **ritardo** rispetto alla banda gamma HE del flusso dei fotoni incidenti su *Fermi*/LAT che si traduce in un picco della funzione di correlazione traslato rispetto allo zero-lag. Ed è proprio tale traslazione temporale che stima il ritardo della banda radio rispetto alla gamma HE.

Lo scopo che ci si propone è mostrare come la funzione di correlazione è utile a confermare un ritardo di una banda rispetto all'altra confrontando i risultati con l'articolo di Ackermann et al. [2015] che prevede un ritardo di  $(158 \pm 10)$  giorni. Poichè il campione dell'articolo [Ackermann et al., 2015] prende in considerazione i dati *Fermi*/LAT, dal 4 Agosto 2008 al 19 Luglio 2015 (54682.65– 57222.65 MJD), e i dati OVRO, dal 9 Agosto 2008 al 18 Maggio 2014 (54697-56795 MJD), si vuole verificare se sono avvenute variazioni. Per quanto riguarda il campione di dati esteso sono stati usate le curve di luce di *Fermi*/LAT dal 6 Agosto 2008 al 9 Maggio 2023 (54684.5-60073.5 MJD) e di OVRO dal 18 Agosto 2008 al 12 Gennaio 2023 (54696.9675-59956.76234 MJD).

In analogia all'analisi della funzione di autocorrelazione della banda gamma rivelata da *Fermi*/LAT viene proposto lo stesso metodo per visualizzare il ritardo della banda radio rispetto alla banda gamma. L'unica differenza risiede nel fatto che ora vengono correlate due curve diverse a partire dai dati OVRO (banda radio) e *Fermi*/LAT (gamma HE) anzichè confrontare la curva di luce con se stessa.

Siccome il riferimento resta la letteratura già in essere sull'argomento l'analisi viene svolta a con-



**Figura 14:** Nella seguente figura viene rappresentata la z-dcf in funzione del ritardo  $\tau$  tra le banda radio di OVRO e quella gamma HE di *Fermi*/LAT. A sinistra viene mostrato un focus sul picco previsto dall'articolo Ackermann et al. [2015] attorno ai 160 giorni rinvenuto utilizzando lo stesso set di dati dell'articolo dal 4 Agosto 2008 al 19 Luglio 2015 (54682.65– 57222.65 MJD) per i dati *Fermi*/LAT e dal 9 Agosto 2008 al 18 Maggio 2014 (54697-56795 MJD) per i dati OVRO . Invece a destra viene preso in considerazione un intervallo più ampio in cui si realizza un picco tra circa 375-425 giorni. A prescindere dalla stima esatta che esula dagli scopi della tesi viene confermato il ritardo della banda radio rispetto alla gamma HE.

frontare l'articolo Ackermann et al. [2015] sul set di dati utilizzato dalla collaborazione *Fermi* e poi aggiornata al set di dati più esteso a disposizione usando lo stesso programma pyzdcf.

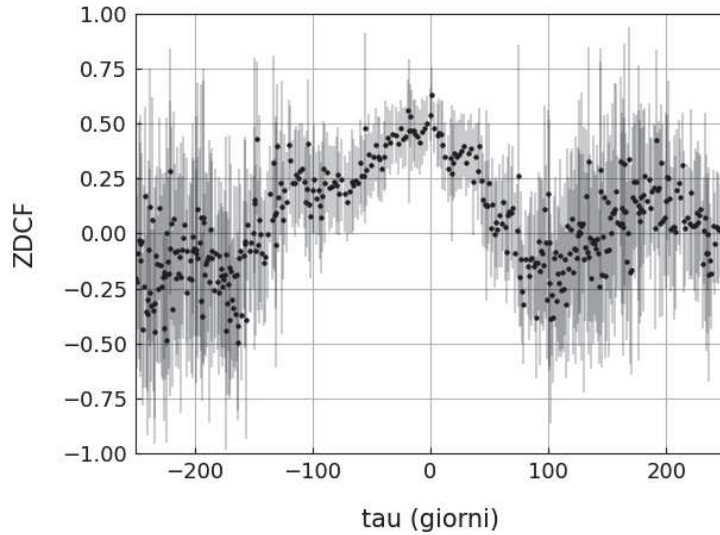
Dall'immagine 14 (a destra) si può notare un ritardo delle due bande che si traduce nella realizzazione di un picco della funzione di correlazione cui centroide non cade in prossimità dello zero-lag, bensì attorno a 350-400 giorni. A conferma dell'articolo Ackermann et al. [2015] si nota che esiste un picco più basso a 150-200 giorni che è il primo a realizzarsi nella z-dcf (fig. 14 destra). Tuttavia se si confrontano i risultati ottenuti con il set di dati dell'articolo Ackermann et al. [2015] (fig. 14 sinistra) si nota che il picco a 400 giorni non è presente bensì è quello a circa 160 giorni ad essere preponderante. Infatti, ritornando alla curva di luce radio in figura 7 dalla fine del 2014 (57000 MJD) si verifica un aumento sistematico del flusso di fotoni rivelati da OVRO. Si ipotizza che possa essere questa l'origine di tale variazione nel ritardo del radio rispetto alla gamma HE.

Questo conferma la complessità dello studio in multifrequenza delle curve di luce e quanto un campione di dati più esteso può variare il risultato sul ritardo di una banda rispetto ad un'altra. Dopotutto tale variazione sostanziale tra l'articolo e i risultati qui ottenuti è solo un punto di partenza che si presta ad ulteriori analisi approfondite, che in questo elaborato rimarranno inevase.

Ciò che importa al fine dei ragionamenti sul tema è che indipendentemente dal valore esatto del ritardo della banda radio rispetto a *Fermi*, si può notare che attorno allo zero-lag la z-dcf ha un minimo: ciò conferma la presenza del ritardo tra le due bande e giustifica la scarsa correlazione dei dati OVRO rispetto a tutti gli altri dati.

#### 5.4 Analisi della funzione di correlazione della banda ottica (KVA) e X (*XRT-Swift*)

Dopo aver visto la potenza dello strumento della z-dcf nell'analisi di periodicità di una banda o di ritardo di una banda rispetto all'altra, nel seguito si descrive cosa si evince dalla z-dcf di due bande i cui cambiamenti di flusso dei fotoni sono simultanei. Perciò si esamina la z-dcf delle curve di luce ottica e in X poichè sono due bande i cui flussi simultanei correlano maggiormente.



**Figura 15:** In figura si rappresenta la z-dcf in funzione del ritardo  $\tau$  tra le bande ottico-raggi X. Un'importante caratteristica di questo grafico è la presenza di un picco attorno allo zero-lag infatti la correlazione dei loro flussi simultanei in tabella 6 è la più alta. Di fatto l'aumento o la diminuzione del flusso incidente di fotoni in ottico e in X sono eventi simultanei.

Infatti il primo passo per l'analisi delle correlazioni nella sezione 4 è stato computare quali flussi rientravano in un intervallo di simultaneità accettabile per essere testati. Cercare i **flussi simultanei** ha semplificato il problema poichè il tempo per ogni coppia di flussi da testare è fissato dunque è stato tolto un grado di libertà durante il test sulla correlazione. A partire dalle correlazioni simultanee intrabanda tramite il coefficiente di Spearman si evince che le bande maggiormente correlate sono l'ottico e i raggi X. Il fatto che siano le bande più correlate significa ci si aspetta un picco della funzione della correlazione attorno a  $\tau = 0$  ossia il flusso aumenta e diminuisce simultaneamente in una banda e nell'altra. Da un punto di vista operativo viene sfruttato lo stesso codice pyzdcf e la stessa metodologia già descritta sopra.

L'immagine 15 rappresenta la funzione di correlazione z-dcf in funzione del ritardo tra le bande prese in esame. Come previsto dalle correlazioni dei flussi simultanei intrabande la funzione di correlazione presenta un picco attorno allo zero-lag ossia quando gli eventi avvengono nello stesso istante. Il fatto che attorno allo zero-lag ci sia un massimo della funzione di correlazione avvalorava la presenza di una correlazione tra bande già indagata con il coefficiente di correlazione di Spearman.

Il concetto più importante che si vuole sottolineare con l'analisi qualitativa della funzione di correlazione è che l'evoluzione temporale complica notevolmente lo studio delle correlazioni. Infatti per inquadrare il problema delle correlazioni tra flussi non è possibile solo analizzare un'istantanea del flusso incidente sui rivelatori, bensì la finestra temporale dei dati a disposizione ha un'importanza fondamentale.



## 6 Conclusioni

A conclusione di questo percorso condiviso con la PG 1553+113 si propone un riassunto dei risultati ottenuti e una verifica a posteriori sul raggiungimento degli obiettivi. Dallo studio della PG 1553+113 risulta che, sotto l'ipotesi che ospiti un sistema binario al suo interno, il **tempo di vita** (rispetto ai dati dell'articolo Tavani et al. [2018]) prima della coalescenza dei due buchi neri supermassicci è di circa 276 giorni al termine dei quali potrebbe rilasciare un segnale sotto forma di onda gravitazionale. Nonostante il sistema binario sia giunto alla fine della sua vita, siccome le onde gravitazionali si propagano alla velocità della luce e la distanza della PG 1553+113 è circa 1500 Mpc, tale segnale non sarà rivelabile in tempi brevi.

Per quanto riguarda la **variabilità** dell'emissione del getto, questa ha fornito un'enorme ricchezza di possibilità di studio, oltre a tutte quelle rimaste inevase nel seguente elaborato per motivi di tempo. Innanzitutto osservando la curva di luce *Fermi*/LAT è visibile una periodicità della banda HE che viene interpretata come la conseguenza del moto di rotazione del buco nero meno massivo attorno a quello primario. Per indagare la periodicità della curva di luce viene implementata la funzione di autocorrelazione che presenta il primo picco tra i 750-800 giorni coerentemente con l'articolo di riferimento Ackermann et al. [2015]. Nella sezione 4 un risultato importante è stato ottenuto a partire dalle correlazioni della curva di luce dall'Aprile 2005 al Maggio 2023 che presenta una più spiccata correlazione la banda ottica (KVA) e la banda gamma (sia *Fermi*/LAT che MAGIC), la banda X (XRT) con quella ottica (KVA) e la banda X (XRT) con quella gamma (sia *Fermi*/LAT che MAGIC), tuttavia la banda gamma HE (*Fermi*/LAT) e la banda gamma VHE (MAGIC) tra loro presentano una scarsa correlazione. Confrontando i risultati con l'articolo appena sottomesso dalla collaborazione MAGIC si evince una modifica rispetto alla tendenza registrata tra il 2007 al 2017 poichè in tale analisi risultavano più correlate ottico-gamma HE e raggi X-gamma VHE. Ulteriori studi sono necessari per individuare il giusto modello di emissione del getto di PG 1553+113. Una peculiarità dei risultati dell'analisi è che la **banda radio** (OVRO) non correla con nessuna delle bande prese in esame poichè presenta un ritardo nell'emissione rispetto alla banda gamma che è stato verificato con la funzione di correlazione che subisce delle modifiche rispetto alla letteratura esistente da 158 giorni di ritardo a circa 400. I risultati in questo elaborato non sono che un punto di partenza per approfondimenti successivi, ma già a questo livello si capisce la complessità della variabilità di PG 1553+113 in relazione alla sua evoluzione temporale.

Successivamente restringendosi all'analisi del solo **flare dell'Aprile 2019**, nonostante ci siano meno dati a disposizione rispetto alla curva di luce integrale, si confermano le correlazioni in essere nell'analisi precedente con un aumento del coefficiente di correlazione nelle bande che già hanno risposto positivamente alla correlazione dei dati dal 2005 al 2023. A partire dalle correlazioni risultanti è stata analizzata nello specifico la correlazione incrociata tra i flussi simultanei incidenti su MAGIC e KVA da cui, collegando gli eventi consequenziali, è risultato un grafico di isteresi quasi completo. Da tale scoperta si evince che la correlazione tra i flussi delle tue bande energetiche nasconde uno schema interpretabile con il ritardo di una banda rispetto ad un'altra, nello specifico la banda ottica è in ritardo rispetto alla gamma HE.

Se si dovesse scegliere una parola con cui descrivere la PG 1553+113 sarebbe appropriato definirla un diamante dalle mille sfaccettature, incastonato nell'universo, cui visione d'insieme non si arresta all'astronomia gamma, ma risiede nell'astrofisica multimessaggera. Siccome è una sorgente al TeV si presta allo studio dei neutrini extragalattici e lo studio dei raggi cosmici, oltre che essere una delle più promettenti sorgenti ospitanti un sistema binario di buchi neri da cui potrebbe essere possibile rivelare onde gravitazionali. Una delle **ultime novità** proprio in merito alla variabilità della PG 1553+113 è la scoperta di una modulazione della curva di luce di circa 22, cui massimo è previsto nel Luglio 2025 [Adhikari et al., 2023] a dimostrazione che la PG 1553+113 sia tra le più interessanti sorgenti extragalattiche nel cielo gamma.

## 7 Ringraziamenti

Un ringraziamento particolare alle organizzazioni che hanno condiviso i loro dati che sono stati usati nell'analisi: *Fermi*/LAT, OVRO, KVA e XRT-*Swift*.

This research has made use of data from the OVRO 40-m monitoring program (Richards, J. L. et al. 2011, ApJS, 194, 29), supported by private funding from the California Institute of Technology and the Max Planck Institute for Radio Astronomy, and by NASA grants NNX08AW31G, NNX11A043G, and NNX14AQ89G and NSF grants AST-0808050 and AST- 1109911. 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. The Tuorla Observatory blazar monitoring team is acknowledged for allowing the use of observational data reported in <https://users.utu.fi/kani/1m/>.

Inoltre, una menzione speciale va a tutta la collaborazione MAGIC che oltre ad aver fornito i dati mi ha accolta come tesista dandomi l'opportunità di apprendere quanto più possibile della ricerca nel settore dell'astrofisica delle alte energie. In particolare è stato davvero costruttivo, sotto ogni punto di vista, integrarmi nel gruppo *heap* di Padova che mi ha gentilmente accolta. Oltre che ai ricercatori un pensiero va ai dottorandi e agli studenti con cui ho collaborato in questi mesi, in particolare al Dott. Giuseppe Silvestri che ha condiviso con me una parte del suo lavoro di tesi e delle sue conoscenze in merito alla PG 1553+113. Un ringraziamento davvero sentito va alla Prof.ssa Elisa Prandini che mi ha formata e mi ha permesso di partecipare ai meeting in modo da orientarmi nel percorso successivo alla laurea triennale. Inoltre si è mostrata sempre disponibile ad assecondare i miei interessi durante l'intero internato di tesi, lasciandomi la possibilità di imparare molto di più rispetto al progetto iniziale guidandomi nel momento del bisogno. A tal proposito ringrazio il Dr. Antonio Stamerra per avermi seguito ed incuriosito riguardo lo studio sulle onde gravitazionali a cui intendo dare un seguito nel percorso magistrale.

Per ultimo, ma non per importanza i miei ringraziamenti vanno ai miei fedeli compagni di viaggio ossia la mia famiglia: genitori, la nonna e zii che mi hanno sostenuta e continuano a sostenermi nel mio progetto di studio in ogni modo possibile. In particolare ringrazio mia sorella Elisa per la pazienza e il costante supporto: geograficamente lontana, ma la cui vicinanza si è sentita in ogni passaggio bello e difficoltoso di questo percorso.

Infine ringrazio tutti coloro con cui ho condiviso parte o l'intero percorso che considero niente di meno del mio trampolino di lancio per i miei progetti futuri, a suo modo ciascun incontro è stato indispensabile per portare a termine i miei obiettivi fino a questo momento.



## Riferimenti bibliografici

- M. G. Aartsen et al. Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert. *Science*, 361(6398):147–151, 2018. doi: 10.1126/science.aat2890.
- A. U. Abeysekara, S. Archambault, Archer, and et al. A Search for Spectral Hysteresis and Energy-dependent Time Lags from X-Ray and TeV Gamma-Ray Observations of Mrk 421. , 834(1):2, Jan. 2017. doi: 10.3847/1538-4357/834/1/2.
- M. Ackermann, M. Ajello, Albert, and et al. Multiwavelength Evidence for Quasi-periodic Modulation in the Gamma-Ray Blazar PG 1553+113. , 813(2):L41, Nov. 2015. doi: 10.1088/2041-8205/813/2/L41.
- S. Adhikari, P. Penil, J. R. Westernacher-Schneider, A. Dominguez, M. Ajello, S. Buson, A. Rico, and J. Zrake. Constraining the PG 1553+113 binary hypothesis: interpreting a new, 22-year period. *arXiv e-prints*, art. arXiv:2307.11696, July 2023. doi: 10.48550/arXiv.2307.11696.
- F. Aharonian, A. G. Akhperjanian, and a. e. Bazer-Bachi. Evidence for VHE  $\gamma$ -ray emission from the distant BL Lac PG 1553+113. , 448(2):L19–L23, Mar. 2006. doi: 10.1051/0004-6361:200600010.
- J. Aleksić, S. Ansoldi, and a. e. Antonelli. The major upgrade of the MAGIC telescopes, Part II: A performance study using observations of the Crab Nebula. *Astroparticle Physics*, 72:76–94, Jan. 2016.
- T. Alexander. Improved AGN light curve analysis with the z-transformed discrete correlation function. 2 2013.
- M. A. Alpar. On Young Neutron Stars as Propellers and Accretors with Conventional Magnetic Fields. , 554(2):1245–1254, June 2001. doi: 10.1086/321393.
- W. B. Atwood, S. Ritz, and a. e. Anthony. Beam test of gamma-ray large area space telescope components. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 446(3):444–460, May 2000. doi: 10.1016/S0168-9002(99)00980-8.
- M. C. Begelman, R. D. Blandford, and M. J. Rees. Massive black hole binaries in active galactic nuclei. , 287(5780):307–309, Sept. 1980. doi: 10.1038/287307a0.
- M. Böttcher and M. G. Baring. Multi-wavelength Variability Signatures of Relativistic Shocks in Blazar Jets. , 887(2):133, Dec. 2019. doi: 10.3847/1538-4357/ab552a.
- M. Cerruti. Leptonic and Hadronic Radiative Processes in Supermassive-Black-Hole Jets. *Galaxies*, 8(4):72, 2020. doi: 10.3390/galaxies8040072.
- M. Colpi. Massive binary black holes in galactic nuclei and their path to coalescence. *Space Sci Rev*, page 189–221, 2014. doi: https://doi.org/10.1007/s11214-014-0067-1.
- C. W. Danforth, B. A. Keeney, J. T. Stocke, J. M. Shull, and Y. Yao. HST/COS Observations of the Ly alpha Forest toward the BL Lac Object 1ES1553+113. *Astrophys. J.*, 720:976–986, 2010. doi: 10.1088/0004-637X/720/1/976.
- D. Donato, G. Ghisellini, G. Tagliaferri, and G. Fossati. Hard X-ray properties of blazars. , 375:739–751, Sept. 2001. doi: 10.1051/0004-6361:20010675.
- R. A. Edelson and J. H. Krolik. The Discrete Correlation Function: A New Method for Analyzing Unevenly Sampled Variability Data. , 333:646, Oct. 1988. doi: 10.1086/166773.
- A. Einstein and N. Rosen. The Particle Problem in the General Theory of Relativity. *Physical Review*, 48(1):73–77, July 1935. doi: 10.1103/PhysRev.48.73.

- E. Fermi. On the origin of the cosmic radiation. *Phys. Rev.*, 75:1169–1174, Apr 1949. doi: 10.1103/PhysRev.75.1169. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.75.1169>.
- G. Fossati, L. Maraschi, A. Celotti, A. Comastri, and G. Ghisellini. A unifying view of the spectral energy distributions of blazars. , 299(2):433–448, Sept. 1998. doi: 10.1046/j.1365-8711.1998.01828.x.
- N. Gehrels, G. Chincarini, and a. e. Giommi. The Swift Gamma-Ray Burst Mission. , 611(2):1005–1020, Aug. 2004. doi: 10.1086/422091.
- G. Ghisellini. Internal shocks in blazar jets. *Astron. Nachr.*, 320:232, 1999. doi: 10.1002/1521-3994(199908)320:4/5<232::AID-ASNA232>3.0.CO;2-B.
- I. Jankov, A. B. Kovačević, D. Ilić, P. Sánchez-Sáez, and R. Nikutta. pyzdf: Initial release, Oct. 2022. URL <https://doi.org/10.5281/zenodo.7253034>.
- S. D. Johnson, J. S. Mulchaey, Chen, and 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. , 884(2):L31, Oct. 2019. doi: 10.3847/2041-8213/ab479a.
- J. S. Kalirai. The age of the Milky Way inner halo. , 486(7401):90–92, June 2012. doi: 10.1038/nature11062.
- M. S. Longair. *High Energy Astrophysics*. 2011.
- MAGIC Collaboration, V. A. Acciari, and a. e. Ansoldi. Testing two-component models on very high-energy gamma-ray-emitting BL Lac objects. , 640:A132, Aug. 2020. doi: 10.1051/0004-6361/202037811.
- D. Mazin and F. Goebel. Break in the Very High Energy Spectrum of PG 1553+113: New Upper Limit on Its Redshift? , 655(1):L13–L16, Jan. 2007. doi: 10.1086/511751.
- D. Mazin and F. Goebel. Break in the VHE spectrum of PG 1553+113: new upper limit on its redshift? In *International Cosmic Ray Conference*, volume 3 of *International Cosmic Ray Conference*, pages 1037–1040, Jan. 2008.
- P. Padovani. Unified schemes for radio-loud AGN: recent results. , 68:47–54, Jan. 1997. doi: 10.48550/arXiv.astro-ph/9701074.
- P. Padovani, M. Petropoulou, P. Giommi, and E. Resconi. A simplified view of blazars: the neutrino background. , 452(2):1877–1887, Sept. 2015. doi: 10.1093/mnras/stv1467.
- P. Parma, M. Murgia, H. de Ruiter, and R. Fanti. The lives of fir i radio galaxies. *New Astronomy Reviews*, 46(2):313–325, 2002. ISSN 1387-6473. doi: [https://doi.org/10.1016/S1387-6473\(01\)00201-9](https://doi.org/10.1016/S1387-6473(01)00201-9). URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1387647301002019>. Lifecycles of radio galaxies.
- P. C. Peters. Gravitational Radiation and the Motion of Two Point Masses. *Physical Review*, 136(4B):1224–1232, Nov. 1964. doi: 10.1103/PhysRev.136.B1224.
- E. Prandini and G. Ghisellini. The Blazar Sequence and Its Physical Understanding. *Galaxies*, 10(1):35, 2022. doi: 10.3390/galaxies10010035.
- E. Prandini, G. Bonnili, L. Maraschi, M. Mariotti, and F. Tavecchio. TeV blazars and their distance. In M. Raue, T. Kneiske, D. Horns, D. Elsaesser, and P. Hauschildt, editors, *Cosmic Radiation Fields: Sources in the early Universe (CRF 2010)*, page 12, Jan. 2010. doi: 10.22323/1.121.0012.
- J. L. Richards, W. Max-Moerbeck, V. Pavlidou, and et al. Blazars in the fermi era: The ovro 40 m telescope monitoring program. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 194(2):29, may 2011. doi: 10.1088/0067-0049/194/2/29. URL <https://dx.doi.org/10.1088/0067-0049/194/2/29>.

- F. Rieger. Gamma-Ray Astrophysics in the Time Domain. *Galaxies*, 7(1):28, Jan. 2019. doi: 10.3390/galaxies7010028.
- K. K. Singh and P. J. Meintjes. Characterization of Variability in Blazar Light curves. *Astron. Nachr.*, 341(6-7):713–725, 2020. doi: 10.1002/asna.202013731.
- M. Tavani, A. Cavaliere, P. Munar-Adrover, and A. Argan. The Blazar PG 1553+113 as a Binary System of Supermassive Black Holes. , 854(1):11, Feb. 2018. doi: 10.3847/1538-4357/aaa3f4.
- F. Tavecchio, L. Maraschi, and G. Ghisellini. Constraints on the physical parameters of tev blazars. *The Astrophysical Journal*, 509(2):608, dec 1998. doi: 10.1086/306526. URL <https://dx.doi.org/10.1086/306526>.
- C. M. Urry and P. Padovani. Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei. , 107:803, Sept. 1995. doi: 10.1086/133630.