



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

Stima della distanza di blazar con i raggi gamma

Relatore
Dr. Elisa Prandini
Correlatore
Dr. Cornelia Arcaro

Laureando
Giuseppe Silvestri

Anno Accademico 2020/2021

Indice

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introduzione | 2 |
| 2 | Emissione gamma da Nuclei Galattici Attivi | 3 |
| 2.1 | I Nuclei Galattici Attivi | 3 |
| 2.2 | Spettri e SED | 3 |
| 2.3 | <i>Fermi</i> /LAT e i telescopi Cherenkov | 5 |
| 2.4 | Luce Extragalattica Diffusa | 6 |
| 2.5 | Redshift | 7 |
| 3 | Studio dell'effetto dell'EBL sull'assorbimento gamma | 9 |
| 3.1 | La distribuzione spettrale di energia | 9 |
| 3.2 | Effetto dell' EBL e spettro differenziale | 9 |
| 3.3 | Spettro intrinseco di 1ES 1218+304 | 11 |
| 3.4 | Stima della distanza | 13 |
| 4 | Conclusioni | 16 |

1 Introduzione

Già dall'inizio del ventesimo secolo alcune galassie iniziarono ad interessare la comunità scientifica a causa di righe di emissione ben più luminose della media. Nel 1942 Carl Seyfert pubblicò un articolo che nel quale identificò le sorgenti di tali righe come *AGN* (dall'inglese Active Galactic Nuclei).

Inizialmente, verso il 1950, tramite l'astronomia radio, si riuscirono ad individuare dei particolari tipi di AGN detti *quasars*, mentre circa vent'anni dopo furono individuati i *blazars*.

Queste categorie di corpi celesti si possono studiare usando tutto lo spettro elettromagnetico, dal radio al gamma. Dal 1980 in poi si è iniziata a sviluppare l'astronomia γ , che utilizza la componente più energetica dello spettro elettromagnetico per osservare numerosi fenomeni nel nostro universo come i lampi di raggi gamma e buchi neri.

In questa tesi si studia la propagazione dei raggi gamma su distanze extragalattiche e si mostra come, per effetto dell'assorbimento, gli spettri emessi da blazar distanti vengano assorbiti. Questo fenomeno dipende dall'energia dei fotoni gamma e dalla distanza della sorgente. In questo lavoro si mostra come quest'effetto può essere usato per dare una stima della distanza di un blazar.

Nel Capitolo primo, si affronta la fenomenologia riguardante l'argomento della tesi, in particolare la struttura degli AGN, i loro spettri differenziali e distribuzione spettrale di energia (SED), ed infine il fondo di luce extragalattico (EBL).

Il secondo Capitolo è dedicato allo studio dell'effetto dell'EBL sullo spettro ad alte energie dei blazar. In questo capitolo viene esposta l'analisi di tre TeV-blazar di redshift diverso, 1ES 1218+304, Mkn 421 e PKS 1442+25. Si illustra inoltre un metodo per stimare la distanza di 1ES 1218+304 da dati gamma.

Il Capitolo terzo, infine, è dedicato alle conclusioni del lavoro di tesi.

2 Emissione gamma da Nuclei Galattici Attivi

2.1 I Nuclei Galattici Attivi

Gli AGN (Ghisellini, 2013) sono delle strutture presenti nelle zone centrali di una galassia, essi sono tipicamente caratterizzati da:

- Un buco nero centrale supermassivo ($10^6 M_{\odot} \leq M_{BH} \leq 10^{10} M_{\odot}$), il quale, con molta probabilità, presenta un moto di rotazione.
- Un disco di accrescimento la cui materia viene attratta dalla gravità del buco nero, formando così una spirale.
- Una corona di raggi X la cui natura non è certa, si suppone che sia o uno strato caldo oppure un ensemble di regioni clusterizzate molto attive nella parte interna del disco. Questa zona viene divisa a metà dal disco di accrescimento.
- Una regione toroidale a molti parsec di distanza dal buco nero; essa intercetta parte della radiazione generata dal disco e la converte in emissione infrarossa.
- BLR (Broad Line Region), ovvero una zona che presenta delle piccole nubi distanti $\sim 10^{12} - 10^{15}$ Km dal buco nero centrale che hanno velocità molto elevate ($\sim 3000 \frac{Km}{s}$). Tali nubi intercettano la radiazione ionizzante e la riemettono sotto forma di linee, le quali vengono allargate a causa dell'effetto Doppler.
- NLR (Narrow Line Region), una zona di nubi meno dense rispetto a quelle della BLR ma a distanza maggiore dal buco nero (~ 100 pc).
- il 10% degli AGN emette due getti di radiazione in direzione opposta.

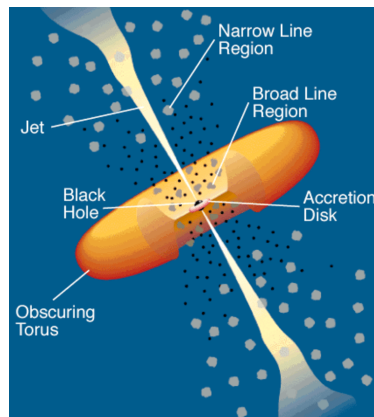


Figura 1: Struttura di un AGN con jet, immagine tratta da Urry and Padovani (1995).

In base all'angolo di incidenza rispetto all'osservatore di questi jet classifichiamo gli AGN in due categorie: i *blazars* il cui getto punta verso il nostro pianeta, e le *radio-galassie* in cui punta in direzione diversa.

In questo lavoro verrà trattato il primo tipo.

All'interno del gruppo dei blazars possono essere differenziati due diversi tipi di sorgenti: i *FSRQs* (Flat Spectrum Radio Quasars) e i *BL Lac*. La differenza principale fra i due tipi di blazar consiste nel fatto che i primi presentano delle righe di emissione dalle BLR e NLR, mentre i secondi no. L'introduzione della SED (dall'inglese Spectral Energy Distribution) permetterà, nella prossima sezione, di introdurre delle caratteristiche di natura fenomenologica che permetteranno un'ulteriore differenziazione.

2.2 Spettri e SED

Gli AGN presentano emissioni di fotoni che ricoprono tutto lo spettro elettromagnetico, le cui caratteristiche possono essere studiate attraverso due strumenti: lo spettro differenziale e la SED. Il primo è la rappresentazione del flusso differenziale $\frac{dN}{dE}$, ovvero il numero di fotoni con energia compresa fra E e $E + dE$ che sono emessi dalla sorgente per unità di area del rivelatore e di tempo, tale quantità viene espressa tipicamente in $[erg^{-1} s^{-1} cm^{-2}]$. Il flusso differenziale permette quindi di stimare il numero di fotoni per unità di energia che arriva ad un rivelatore che a sua volta, permette di ricavare delle informazioni sulla sorgente.

La SED, $E^2 \frac{dN}{dE}$ rappresenta invece la densità di energia emessa dalla sorgente ad una determinata energia

E; la forma è comune a tutti i BL Lac, infatti, vi è la presenza di due picchi la cui posizione differisce, in base al tipo di sorgente che osserviamo; infatti possiamo distinguere fra:

- Low-peaked BL (LBL) con picco nell'infrarosso (10^{13} Hz);
- Intermediate-peaked BL (IBL) con picco in ottico/ultravioletto ($10^{15} - 10^{16}$ Hz);
- High-peaked BL (HBL) con picco nell'ultravioletto/X ($10^{16} - 10^{18}$ Hz).

La forma a doppio picco caratteristica della SED è dovuta a due fenomeni, il primo è l'emissione di sincrotone, ovvero la radiazione emessa quando una particella carica è in moto in un campo magnetico. Nel caso di oggetti BL Lac, studi di variabilità hanno confermato che tipicamente la SED può essere spiegata con un semplice modello SSC (Ghisellini et al., 1996).

Il secondo fenomeno è l'inverse Compton, ovvero lo scattering di fotoni a bassa energia da parte degli elettroni, che coinvolge l'urto fra elettroni (gli stessi che producono l'emissione di sincrotone) e i fotoni di sincrotone con la conseguente perdita ed acquisizione di energia rispettivamente da parte delle due particelle. L'emissione di sincrotone e l'SSC dominano per basse e alte energie rispettivamente (Rybicki, 1979). Per i FSRQs il secondo picco è dovuto ad un fenomeno definito come effetto Compton inverso esterno, ovvero la collisione fra elettrone energetico e fotone in cui il secondo elemento è esterno al getto.

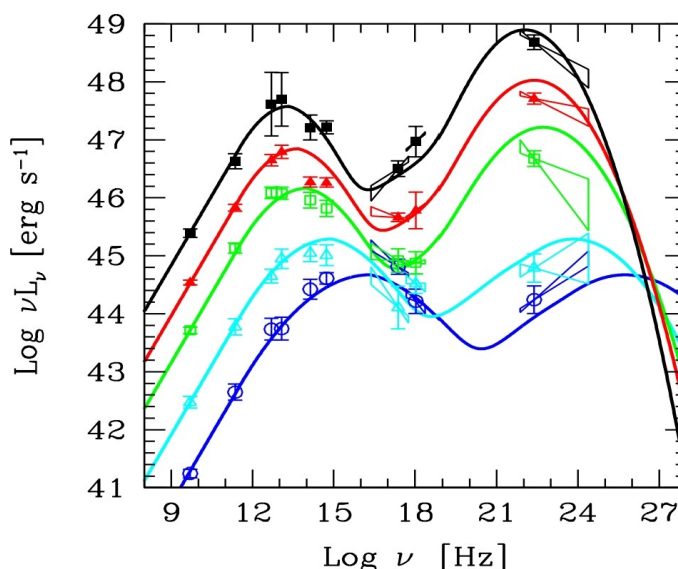


Figura 2: SED di diverse sorgenti da (Donato, D. et al., 2001; Fossati et al., 1998)

Dalla Fig. 2 possiamo distinguere le due tipologie di blazars, le FSRQs (di colore nero, rosso e verde) e i BL Lac (azzurro e blu).

Le prime presentano picchi più accentuati e nelle stesse posizioni ma con una differenza di circa 1 o 2 ordini di grandezza fra i massimi a basse ed alte energie, mentre i BL Lac presentano picchi più ampi le cui posizioni sono traslate in base al tipo di sorgente: la sorgente in azzurro è una IBL mentre l'altra è una HBL. Un'altra notevole differenza fra i due tipi di sorgenti è l'andamento ad alte energie, mentre le FSRQs hanno tutte lo stesso tipo di andamento, i blazars si estendono per energie più alte, poi successivamente vengono smorzate a causa dell'importanza degli effetti di Klein-Nishina.

Il grafico presente in Figura 2 prende il nome di sequenza blazar (Ghisellini et al., 2017; Fossati et al., 1998), esso è definito come il plot della luminosità bolometrica in funzione della frequenza e, tramite i fit della figura, si possono ricavare delle importanti informazioni sulla natura dei processi di emissione nelle sorgenti. Sebbene i FSRQs abbiano i picchi più elevati rispetto ai BL Lac, quindi una luminosità maggiore, i secondi sono più energetici in quanto spostati a frequenze più alte. Tale fenomeno è dovuto al processo di cooling degli elettroni, ovvero l'emissione di sincrotone, per i FSRQs l'irraggiamento per sincrotone è nettamente più efficiente che nei BL Lac, come conseguenza si avrà un massimo più piccato per il primo tipo di sorgente, mentre più ampio per il secondo.

Infine è di notevole importanza la conoscenza della distanza delle sorgenti, in quanto non è possibile conoscere la luminosità bolometrica senza sapere la distanza, per questo è fondamentale avere dei metodi per la stima della distanza di sorgenti TeV.

2.3 *Fermi*/LAT e i telescopi Cherenkov

Per osservare i blazars nella regione dei raggi γ si utilizzano due tipologie di telescopi: nello spazio e a terra. Un apparato che fa parte della prima categoria è il satellite *Fermi*¹, lanciato nel 2008 dalla NASA esso è costituito da due strumenti principali: GBM (Gamma-ray Burst Monitor) il quale monitora i Gamma-ray Burst e LAT (Large Area Telescope) sensibile a fenomeni transienti ed utilizzato per mappare il cielo gamma. Il fenomeno che viene sfruttato nella rilevazione dei raggi γ è quello della produzione di coppia elettrone-positrone, che consiste nell'interazione di un fotone molto energetico con un nucleo del rivelatore e come conseguenza viene generata una coppia particella-antiparticella.

LAT presenta una struttura modulare, costituita da un array 4x4 di torri identiche. Ciascuna torre di $40 \times 40 \text{ cm}^2$, è composta da un tracciatore, un calorimetro e un modulo di acquisizione dati. Il primo elemento è rappresentato da 18 strati di detector a striscia di silicio i quali presentano notevole accuratezza e risoluzione. I calorimetri in ciascuna torre sono composti da 12 barre di CsI (Ioduro di Cesio) disposte in maniera odoscopica, successivamente le rilevazioni vengono effettuate da dei fotodiodi. Le quattro torri sono coperte da uno scudo anticoincidenze che evita la rilevazione di elettroni non prodotti per pair production.

I raggi γ con energie superiori ai 300 GeV non vengono osservati da *Fermi*/LAT, in quanto non cedono tutta la loro energia al calorimetro.

Il satellite *Fermi*/LAT ha osservato 5064 sorgenti con una significanza superiore ai 4σ , più di 3130 sono blazar (Abdollahi et al., 2020).

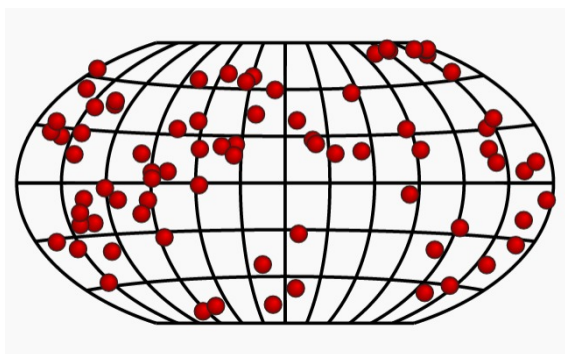


Figura 3: Mappa dei blazar con energia nel TeV tratta da TeVCat2.0, nella figura sono rappresentati 77 elementi.

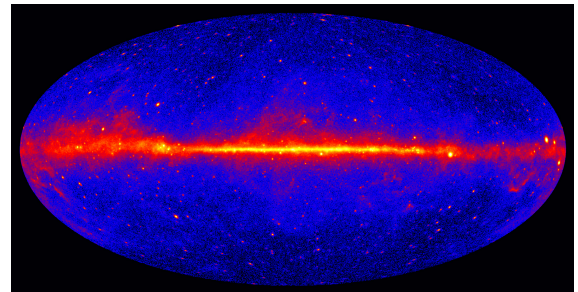


Figura 4: Immagine dell'universo γ tramite 5 anni di osservazioni con il satellite *Fermi*/LAT: Il range di energia nel quale lavora il satellite *Fermi*/LAT è fra i 10 keV e i 300 GeV

Appena entrano in contatto con l'atmosfera terrestre, a causa della loro elevata energia, i raggi gamma effettuano produzione di coppia, e le particelle prodotte emettono ancora nella regione dei gamma tramite Bremsstrahlung. Inoltre, sia la particella che l'antiparticella presentano una velocità molto elevata, e a causa di ciò avviene l'effetto Cherenkov, ovvero quando particelle cariche viaggiano in un mezzo a velocità superluminale e così emettono una radiazione elettromagnetica sulle lunghezze d'onda del visibile più basse (violetto/blu), le quali si propagano con un angolo θ dalla direzione della particella incidente dato da $\cos \theta = \frac{1}{n\beta}$ con n indice di rifrazione e β velocità relativistica della particella carica.

I telescopi che misurano i gamma a terra sfruttano tale fenomeno per effettuare le osservazioni, essi infatti prendono il nome di IACT (dall'inglese Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope). Un telescopio di questo tipo è MAGIC² (dall'inglese Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov telescope) (Rico, 2016), esso è composto da due paraboloidi di 17 m di diametro tessellati da specchi, il primo posto nel 2004 ed il secondo nel 2009, entrambi sono situati ad un'altitudine di 2200 m sull'isola di La Palma alle Canarie. Il range energetico nel quale lavora è fra i 30 GeV e i 100 TeV, ovvero quello delle altissime energie.

Le particelle cariche appena interagiscono con l'atmosfera a circa 20 Km di altezza, e, per effetto Cherenkov, producono uno sciame, il quale può essere: adronico se la particella incidente è un adrone, oppure elettromagnetico se la particella da cui poi ha origine lo sciame è un fotone o un elettrone. Obiettivo di MAGIC è distinguere e caratterizzare gli sciami prodotti da fotoni gamma, la caratteristica principale che permette di distinguere la particella a origine della cascata è la forma delle traiettorie dei sottoprodotti: gli sciami adronici presentano una forma più ramificata, mentre i secondi hanno una forma a goccia. La forma conica della propagazione dei prodotti dell'effetto Cherenkov permette la determinazione del punto di origine di tale cascata. Inoltre si ha una luminosità variabile in base all'altezza, in quanto l'atmosfera presenta indici di rifrazioni differenti in base a tale parametro, si ha un andamento costante dell'angolo di

¹<https://fermi.gsfc.nasa.gov/science/instruments/lat.html>

²<https://magic.mpp.mpg.de/newcomers/cherenkov-telescopes/>



Figura 5: Il telescopio MAGIC II a La Palma. Foto scattata il 01/09/2021.

apertura fino ai 100 m, per poi avere un picco di luminosità e successivamente un'attenuazione progressiva. Infine tramite la rilevazione dei fotoni Cherenkov, i quali avranno lunghezza d'onda nell'ottico/UV, si possono scartare eventi di fondo dovuti a sciame adronici.

Oltre a MAGIC sono presenti altri due telescopi Cherenkov:

- H.E.S.S.³ (High Energy Stereoscopic System) quattro telescopi con 12 m di diametro e un altro di dimensione maggiore situati sull'altopiano di Khomas in Namibia;
- VERITAS⁴ (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System) composto da quattro telescopi da 12 m nel deserto dell'Arizona negli Stati Uniti.

In questo elaborato vengono utilizzati dati di MAGIC, *Fermi*/LAT e VERITAS.

2.4 Luce Extragalattica Diffusa

L'EBL (Cooray, 2016, e referenze incluse) (dall'inglese Electromagnetic Background Light) viene definita come l'intensità integrata di tutta la luce emessa nel corso della storia dell'universo e ricoprente il range dello spettro elettromagnetico che va dall'ultravioletto all'infrarosso. Vi è in realtà un'altra definizione, la quale considera il range dell'EBL l'intero spettro della luce. In questa tesi verrà usato la prima delle due definizioni in quanto quella maggiormente condivisa.

Per quanto riguarda l'intensità del fondo elettromagnetico, l'EBL è seconda solo alla CMB (Cosmic Microwave Background), mentre le altre componenti dello spettro sono di intensità inferiore come si evince dalla Fig. 6.

L'origine dell'EBL è derivata da tutte le emissioni in ottico/infrarosso da parte delle galassie. E' molto difficile stimare direttamente l'intensità di tale fondo, principalmente a causa di fattori di contaminazione quali ad esempio la luce zodiacale del sistema solare, che rende molto difficile ottenere una stima certa dell'EBL.

Però è possibile ottenere delle misure indirette, sfruttando il fenomeno dell'assorbimento dell'emissione γ da blazar. Tale fenomeno è dovuto al fatto che i fotoni dell'EBL interagiscono con i raggi gamma emessi dal getto e formano delle coppie particella-antiparticella (tipicamente $e^+ e^-$) diminuendo quindi il flusso $\frac{dN}{dE}$ osservato. Ovviamente, tale assorbimento dipende dalla distanza della sorgente e all'energia dei fotoni del getto. Per avere una stima dell'energia dei fotoni EBL in cui c'è massima probabilità di avere la produzione di coppia si utilizza:

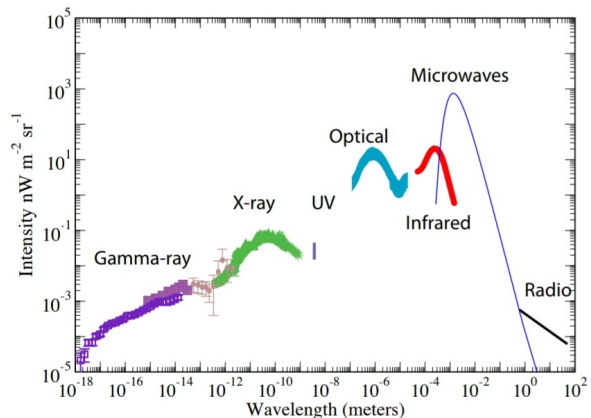


Figura 6: Intensità dei diversi fondi di luce diffusa nell'Universo. L'EBL è definita come il fondo ottico e IR, rappresentati in azzurro e rosso in figura.

³<https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/>

⁴<https://veritas.sao.arizona.edu/>

$$\varepsilon_{max} = \frac{1\text{TeV}}{2E_j} eV \quad (1)$$

| γ_j | ε_{max} |
|------------|---------------------|
| 10 TeV | 0.05 eV |
| 1 TeV | 0.5 eV |
| 100 GeV | 5 eV |
| 50 GeV | 10 eV |

Tabella 1: Energia tipica dei fotoni γ e EBL coinvolti nell'assorbimento.

Come riportato in Tab. 1, quando l'energia dei fotoni del getto sarà nel range dalle decine di GeV fino al TeV, le energie dei fotoni EBL, come evidenziato in Fig. 6, saranno dal picco ottico a quello nell'infrarosso. È importante la conoscenza della distanza perché in base ad essa cambia l'assorbimento dovuto all'EBL. Dalla Fig. 7 si può vedere come tale fenomeno dipenda molto sia dall'energia dei fotoni del getto, sia dalla distanza della sorgente, in quanto anche ad energie nell'ordine del TeV, per le sorgenti più vicine si ha solo un lieve assorbimento.

L'altra importante variabile da cui dipende tale assorbimento è la distanza della sorgente, essa viene trattata in termini di redshift z , ed ovviamente, al crescere di z , aumenta l'interazione fra γ_{EBL} e γ_{VHE} .

Avremo quindi che l'assorbimento $\tau(E, z)$ sarà funzione di due variabili, ovvero E e z . Alcuni esempi di $\tau(E, z)$ relativa a quattro valori di z sono riportati in Fig. 7.

Un modo per visualizzare gli effetti dell'assorbimento dei fotoni ad altissima energia è quello di plottare lo spettro differenziale, esso, infatti, sarà diverso da quello teorico che ci aspetteremmo senza fondo extragalattico ed è dato da:

$$\frac{dN}{dE_{obs}} = \frac{dN}{dE_{teo}} e^{-\tau(E, z)} \quad (2)$$

Quindi ad alte energie e grandi distanze, l'assorbimento sarà dominante e ciò ridurrà i valori del flusso differenziale.

Per avere una stima dell'assorbimento, se $\tau = 1$ lo spettro differenziale diminuisce di un fattore $\frac{1}{e}$, per il valore di redshift maggiore ($z = 0.939$) a $\tau = 1$ si avrà una diminuzione di $\frac{dN}{dE}$ a circa 100 GeV, mentre per $z = 0.031$ tale smorzamento sarà a 10 TeV.

Per quanto riguarda le ipotesi di intensità dell'EBL, al momento, ci sono due modelli principali i quali attribuiscono valori diversi all'intensità del fondo extragalattico:

- Dominguez (Dominguez et al., 2011);
- Franceschini (Franceschini et al., 2008).

Essi differiscono in base alle ipotesi di partenza e ai modelli di sviluppo delle galassie adottati per la stima del fondo EBL, Dominguez utilizza l'evoluzione delle popolazioni di galassie che sono osservate direttamente nel range di redshift che contribuisce significativamente all'EBL, e Franceschini utilizza un'evoluzione a ritroso, che comincia con le popolazioni di galassie esistenti e le estrapola a ritroso nel tempo.

In questo lavoro è utilizzato il modello di Dominguez con riferimento ai valori di redshift z .

2.5 Redshift

Il redshift (o spostamento verso il rosso) (Barone, 2004) è un fenomeno per il quale la lunghezza d'onda osservata è diversa da quella emessa da una sorgente, ciò è dovuto al fatto che sia osservatore che emettitore sono in movimento e quindi presentano velocità non nulle. Vedendo le velocità dei corpi considerati non si può applicare semplicemente la meccanica classica, ma bisogna considerare l'effetto Doppler relativistico; infatti, definendo v la velocità relativa fra osservatore ed emettitore e $\beta = \frac{v}{c}$ la velocità relativistica avrà che:

$$\lambda_{obs} = \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} \lambda_{eme}$$

Da tale formula è possibile ricavare la definizione di redshift come:

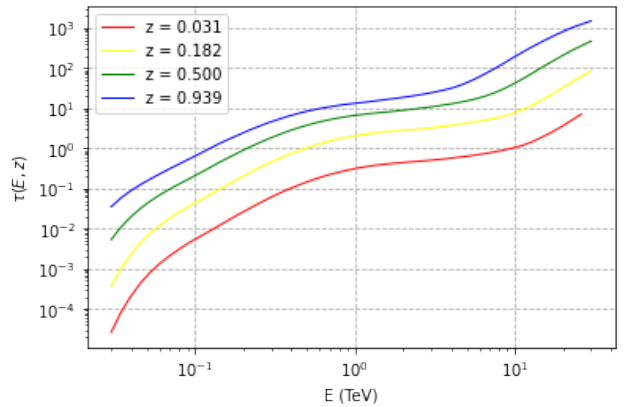


Figura 7: Coefficiente di assorbimento $\tau(E, z)$ in funzione dell'energia dei fotoni TeV, per quattro diversi valori di z (0.031, curva rossa, 0.182, curva gialla, 0.5 curva verde, 0.939, curva blu).

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{eme}}{\lambda_{eme}} = \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} - 1$$

Considerando che la velocità media degli oggetti è nettamente inferiore rispetto a quella della luce, e quindi $\beta \ll 1$, si può applicare un'approssimazione in serie di Taylor e trascurare i termini di ordine superiore al primo in β , ottenendo così:

$$z = \beta = \frac{v}{c} \implies v = c \cdot z$$

Nel 1929 Hubble trovò una relazione che lega la velocità delle galassie con la loro distanza, ovvero:

$$v = H_0 d$$

Con d distanza della sorgente e H_0 costante di Hubble, la cui stima è $H_0 = 71.9_{-3.0}^{+2.4} (s^{-1} Mpc^{-1} Km)$ (Bonvin et al., 2016). Tale legge però vale solo per corpi non molto distanti, ovvero con $z \ll 1$. Infine possiamo quindi mettere una relazione fra distanza e redshift, ed usare quest'ultima quantità come indicatore della posizione di una sorgente, il metodo utilizzato per stimare z è dato dall'analisi dello shift delle righe di emissione di una galassia.

Molto spesso però, non si conosce la distanza di un BL Lac, questo accade poichè la luminosità del getto emesso copre quella della galassia la quale risulta quindi invisibile. Utilizzando il catalogo TevCat2.0⁵ delle 77 blazar nel TeV, 15 presentano redshift ignoto. Il redshift è un parametro fondamentale per ricavare le proprietà intrinseche della sorgente, come ad esempio la sua luminosità.

⁵<http://tevcats2.uchicago.edu/>

3 Studio dell'effetto dell'EBL sull'assorbimento gamma

Nel Capitolo precedente si è discusso sulla fenomenologia riguardante gli AGN, spettri differenziali, SED, EBL e redshift. Ora invece si evidenzia come tali aspetti si intersechino, in particolare si analizzeranno gli effetti dell'EBL sullo spettro differenziale e da come dall'assorbimento dei raggi gamma si può ricavare una stima della distanza.

Le sorgenti analizzate sono MKN 421, 1ES 1218+304 e PKS 1441+25; le prime due sono delle BL Lac di tipo HBL, mentre la terza è un FSRQ.

La prima parte della discussione sull'analisi dati riguarda brevemente la SED mentre la seconda tratta gli spettri differenziali e si concentra sulla stima della distanza.

3.1 La distribuzione spettrale di energia

L'analisi dati presentata in questa tesi parte con lo studio delle SED relative a tre sorgenti con distanze diverse e relativi telescopi utilizzati per le misure:

- MKN 421 ($z=0.031$) misure MAGIC (Albert et al., 2007).
- 1ES 1218+304 ($z=0.182$) misure VERITAS (Fortin et al., 2008).
- PKS 1441+25 ($z=0.939$) misure MAGIC (Ahnen et al., 2015).

Dato che i due telescopi sopracitati effettuano misure ad alte energie, la parte di SED che si analizza è quella successiva al secondo picco.

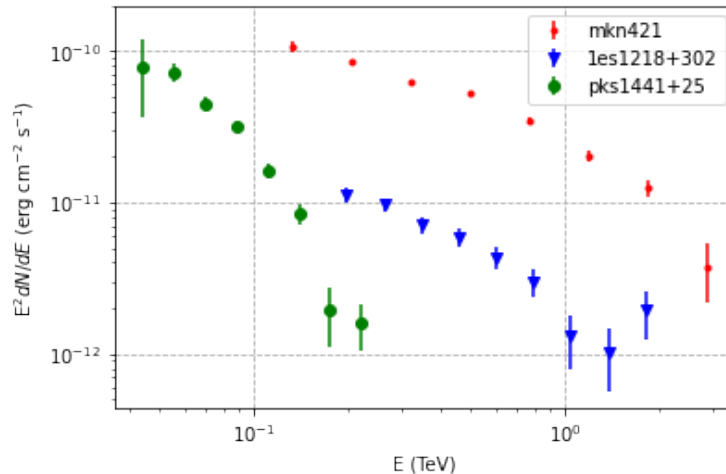


Figura 8: SED ad alte energie relativa a tre sorgenti (dal verde al rosso): PKS 1441+25, 1ES 1218+302, MKN 421. Tali oggetti presentano valori di redshift, seguendo l'ordine di prima, decrescenti. Si nota che il range di energia è esteso fino ai valori più elevati al diminuire della distanza.

Come si evince dalla Fig. 8 si ha uno shift verso sinistra all'aumentare della distanza della sorgente, questo è dovuto al fatto che l'assorbimento è maggiore e, quindi, ad alte energie, la SED viene troncata per le blazars più distanti.

Un altro elemento da evidenziare è rappresentato dagli errori nelle misure, ovvero le misure a più alta energia presentano una maggiore incertezza rispetto a quelle ad energia inferiore. Tale fenomeno è dovuto al numero di fotoni rivelati in quel range, essi infatti saranno in numero nettamente inferiore e quindi più difficili da osservare; per ottenere una stima si può invertire la definizione di spettro differenziale e calcolare il numero di fotoni rilevati ad una determinata energia.

3.2 Effetto dell' EBL e spettro differenziale

Tramite l'analisi dimensionale della SED è possibile ricavare i valori dello spettro differenziale; infatti, per passare dall'uno all'altro basta dividere la SED per il quadrato dell'energia, così da ottenere una quantità il cui valore fisico è $[erg^{-1} s^{-1} cm^{-2}]$.

Si può notare come i dati in Fig. 9 presentino un andamento smorzato per le energie più alte, tale da annullare i valori per la sorgente più lontana (in blu).

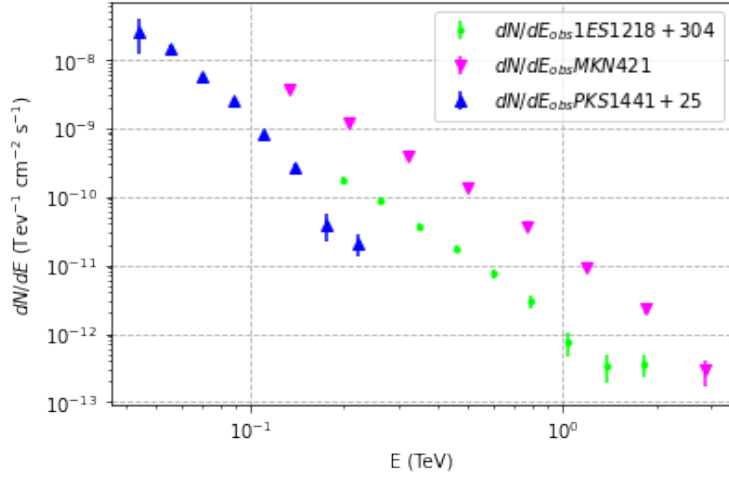


Figura 9: Spettro differenziale osservato delle tre sorgenti, il flusso di PKS 1441+25 che è la più lontana fra le tre sorgenti, viene smorzato ad energie inferiori al TeV, mentre 1ES 1218+304 e MKN 421 proseguono per un range molto più ampio, inoltre mentre MKN 421 ha un andamento più lineare, 1ES 1218+304 non presenta tale caratteristica, ciò è dovuto ai valori di τ che sono più elevati per la seconda sorgente.

I dati presentati in Fig. 9 rappresentano il flusso differenziale osservato, tale quantità, ovviamente, è soggetta agli effetti di assorbimento precedentemente descritti. Per ricavare i valori di spettro deassorbiti, e quindi lo spettro intrinseco emesso dalla sorgente, si è invertita la (2) in modo da ottenere:

$$\frac{dN}{dE_{teo}} = \frac{dN}{dE_{obs}} e^{\tau(E,z)} \quad (3)$$

Per passare allo spettro deassorbito, in primis, si ricavano i valori di $e^{-\tau(E,z)}$ corrispondenti ai tre diversi valori di z ($z = 0.031, 0.182, 0.939$) al variare dell'energia, in quanto il coefficiente τ dipende da entrambe le quantità.

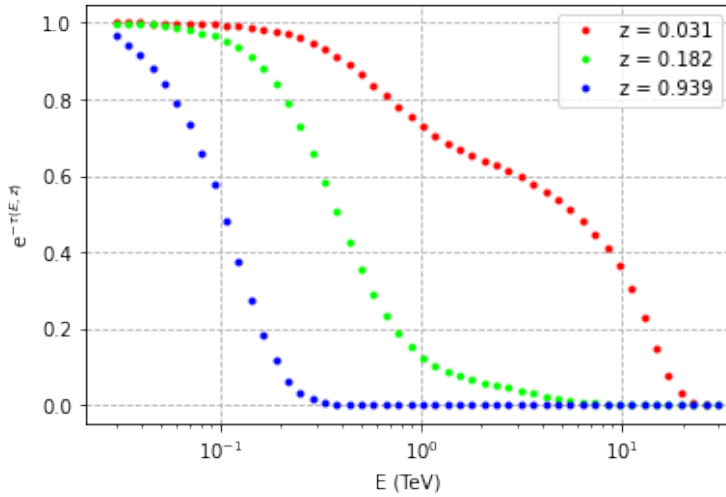


Figura 10: valori $e^{-\tau(E,z)}$ per $z=0.031$, $z=0.182$ e $z=0.939$. L'andamento delle tre curve rappresenta quello dell'assorbimento al variare dell'energia. Per le sorgenti più lontane (blu-verde) esso presenta un andamento più ripido, mentre per quella più vicina (rossa) si ha un assorbimento molto più moderato anche fino ad energie superiori al TeV.

Come si può notare dalla Fig. 10 le tre curve hanno comportamenti differenti: inanzitutto, la pendenza delle curve aumenta con z , infatti una maggiore pendenza è conseguenza di un maggiore assorbimento causato da una distanza superiore. Infatti, per la sorgente, rappresentata con il colore blu, i valori di $e^{-\tau(E,z)}$ vengono troncati a energie inferiori a quelle del TeV, mentre, per quella di colore rosso, si hanno effetti di assorbimento importanti solo per valori di energia nell'ordine della decina di TeV.

3.3 Spettro intrinseco di 1ES 1218+304

Per calcolare lo spettro intrinseco della sorgente 1ES 1218+304 si è iniziato eseguendo dei fit sui valori di $e^{-\tau(E,z)}$, così da poter applicare la (3) ad ogni punto sperimentale di VERITAS. I fit sono stati eseguiti su degli intervalli energetici ristretti, così da poterli applicare direttamente al flusso differenziale corrispondente per quel determinato valore di energia. Inoltre, in base al range considerato, è stata cambiata la funzione interpolatrice, quelle che usate sono state le polinomiali di primo, secondo e terzo grado, con rispettivamente 2,3 e 4 parametri del fit. Il motivo per cui si è reso necessario l'utilizzo di più funzioni per interpolare è legato all'andamento dei dati, non tutti i range presentavano dei valori lineari e pertanto stato necessario fare ricorso a polinomi di grado maggiore.

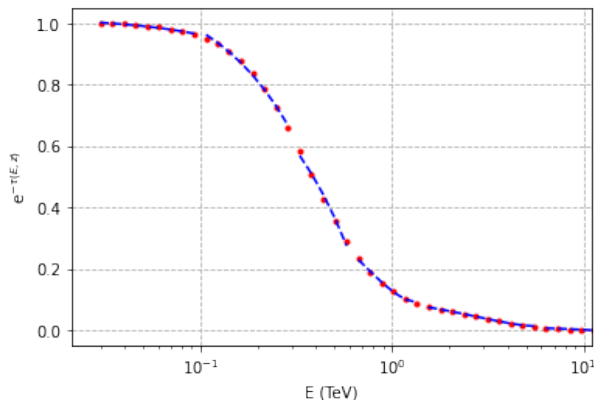


Figura 11: Fit $e^{-\tau(E,z)}$ con $z = 0.182$ in corrispondenza dei valori dello spettro differenziale di 1ES 1218+304. Le funzioni utilizzate per la regressione sono delle polinomiali di 1° e di 2° ordine. La pendenza più lieve di questi dati ha permesso un fit solo con queste due funzioni.

Fig. 12 riporta lo spettro osservato (verde) e deassorbito (rosso) di 1ES 1218+304. Come per altri TeV-blazar, lo spettro intrinseco si può fittare con una legge di potenza del tipo:

$$\frac{dN}{dE} = f_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\Gamma} \quad (4)$$

con f_0 coefficiente di rinormalizzazione, E_0 coefficiente di energia, e, infine, Γ rappresenta l'indice spettrale il quale indica la pendenza della retta che descrive il flusso differenziale. Per semplicità, i coefficienti f_0 e E_0 sono stati raccolti in un'unica costante, chiamata α .

Per ottenere una visuale più completa dell'emissione gamma dalla sorgente, occorre però avere i dati di $\frac{dN}{dE}$ per energie più basse. I dati che sono utilizzati provengono dal satellite *Fermi*, essi hanno un range che va dai 200 MeV ai 60 GeV. Ottenuti i dati *Fermi* si effettua un fit con la cui funzione per la regressione è data dalla (4), ottenendo così i valori di :

- $\alpha = (1.8 \pm 0.4) 10^{-11} \text{ (TeV}^{-1-\Gamma} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}\text{)}$;
- $\Gamma = 1.69 \pm 0.03$.

Per capire come una assunzione errata sul redshift della sorgente influisca sulla stima dello spettro intrinseco, sono stati stimati gli spettri di 1ES 1218+304 assumendo $z=0.031$ e $z=0.939$ Fig. 15 e Fig. 16. I fit degli spettri così ottenuti tramite la (4), sono riassunti nella tabella sottostante.

| z | α | σ_α | Γ | σ_Γ |
|-------|------------------------|------------------------|----------|-----------------|
| 0.182 | $1.07 \cdot 10^{-11}$ | $0.8 \cdot 10^{-11}$ | 1.77 | 0.04 |
| 0.031 | $1.140 \cdot 10^{-12}$ | $0.005 \cdot 10^{-12}$ | 3.20 | 0.02 |
| 0.939 | $1.135 \cdot 10^{-06}$ | $0.001 \cdot 10^{-06}$ | -3.9 | 0.2 |

Tabella 2: Valori fit dello spettro differenziale deassorbito di 1ES 1218+304 a tre diversi valori di z . Dai valori riportati risulta evidente come a $z=0.182$ si abbia la migliore concordanza di Γ e di α fra quelli ad alte energie e quelli derivanti dai dati *Fermi*.

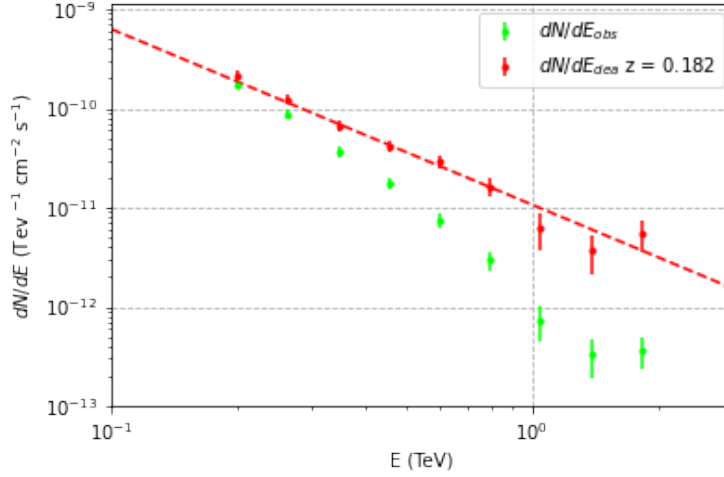


Figura 12: Spettro differenziale deassorbito con $z=0.182$ della sorgente 1ES 1218+304. In verde i dati osservati, mentre in rosso i valori deassorbiti ed il relativo fit. Tale redshift è quello corretto in quanto il Γ derivato è compatibile con quello dei dati *Fermi*. Si può osservare come l'effetto dell'assorbimento dipenda dall'energia in quanto i primi punti ad energie dei 100 GeV siano poco deassorbiti se confrontati con quelli nel TeV. Tale andamento rispetta i valori rappresentati in Fig. 7.

Dall'analisi delle Figure e della tabella si evince che mentre lo spettro, nell'ipotesi di $z=0.031$, è molto ripido, assumendo una distanza $z=0.939$ risulterebbe in uno spettro crescente con una pendenza maggiore di quella dei dati *Fermi*. Quest'ultimo andamento è inatteso sulla base delle osservazioni fin'ora fatte di TeV-blazar. Pertanto, si intuisce che l'utilizzo combinato dello spettro *Fermi* e di quello alle alte energie può fornire una stima della distanza del blazar.

Una caratteristica importante della sorgente 1ES 1218+304 si evince dalla SED deassorbita in Fig. 14, tale oggetto è una BL Lac estrema, ovvero il secondo picco non è fra i GeV ed i TeV ma è a frequenze ancora più alte. Questa proprietà si può dedurre dal fatto che i valori deassorbiti hanno una pendenza simile a quella *Fermi*. Inoltre è presente un dislivello fra i dati *Fermi* e quelli ad alte energie, ciò è dovuto ad un differente tempo di presa dati, mentre per *Fermi* tale tempo viene integrato per anni, quelli di VERITAS, oltre ad essere più vecchi (circa del 2008-2009), sono integrati in tempi dell'ordine delle ore.

Un'ulteriore conferma della validità di tale fit proviene da (Acciari and E. Aliu, 2009), nel quale viene stimato un valore di Γ pari a 1.87 ± 0.37 , il quale ha una compatibilità con quello appena trovato di 0.24. Tale compatibilità tra i valori è risultata ottima.

Dall'analisi spettroscopica si è misurato il redshift di 1ES 1218+304 ottenendo come valore $z=0.182$. Il metodo esposto ci permette di escludere valori di z non possibili per la sorgente, infatti applicando il deassorbimento del flusso differenziale con i valori di $z=0.031$ e $z=0.939$ risulta evidente come si discostino molto dall'andamento dei dati *Fermi*. Infatti per $z=0.031$ i dati deassorbiti sono coincidenti con quelli osservati, ciò deriva dal fatto che a questa distanza l'assorbimento è minimo come si evince anche dalla Fig. 10, mentre per $z=0.939$ si ha l'andamento opposto, in quanto si ha un assorbimento eccessivo ed i dati deassorbiti non seguono l'andamento *Fermi*.

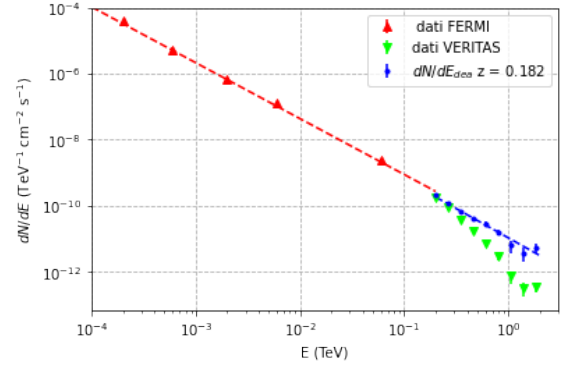


Figura 13: Spettro differenziale della sorgente 1ES 1218+304. In rosso sono evidenziati i dati Fermi ed il corrispettivo fit, in blu i valori di $\frac{dN}{dE}$ deassorbiti con $z=0.182$ e il fit corrispettivo, ed infine in verde ci sono i valori di $\frac{dN}{dE}$ osservati. Si nota una buona continuità dell'andamento fra le energie di *Fermi* e le alte energie.

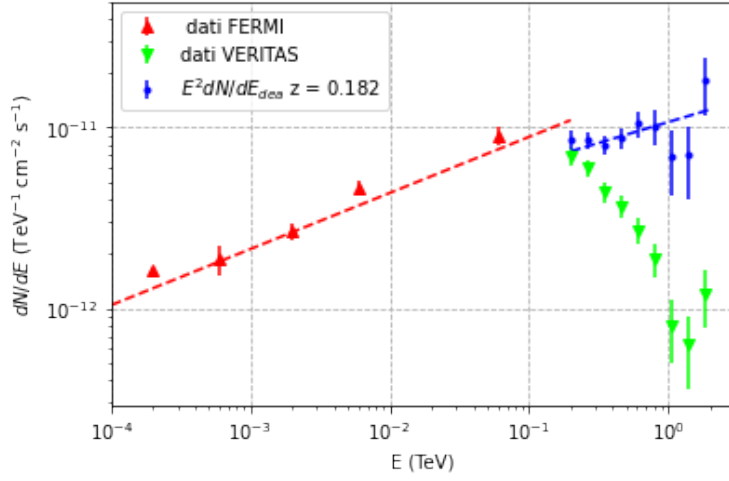


Figura 14: Distribuzione spettrale di energia di 1ES 1218+304 con componente deassorbita a $z=0.182$. In rosso i dati Fermi con relativo fit, in verde la SED osservata da VERITAS mentre in blu la SED deassorbita con il relativo fit. E' molto importante notare che 1ES 1218+304 è una sorgente estrema ovvero la posizione del suo secondo picco è ad altissime frequenze, ciò si vede dal fatto che la SED deassorbita non presenta il massimo fra i dati Fermi e quelli Cherenkov.

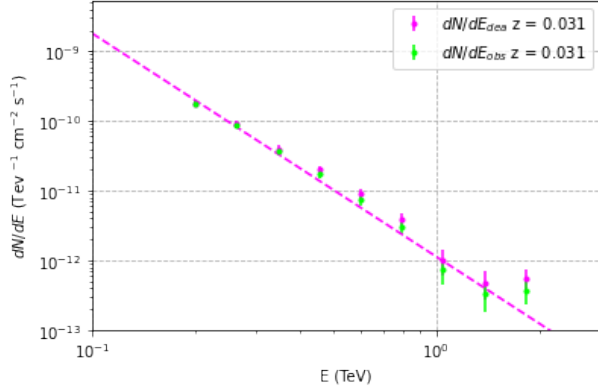


Figura 15: Spettro differenziale deassorbito con $z=0.031$ della sorgente 1ES 1218+304. In verde i dati osservati, mentre in magenta i valori deassorbiti ed il relativo fit. Essendo il redshift più basso fra i tre considerati si può notare come il deassorbimento sia molto debole, si ha solo un leggero distacco con i dati osservati. Tale andamento rispetta i valori rappresentati in Fig. 7.

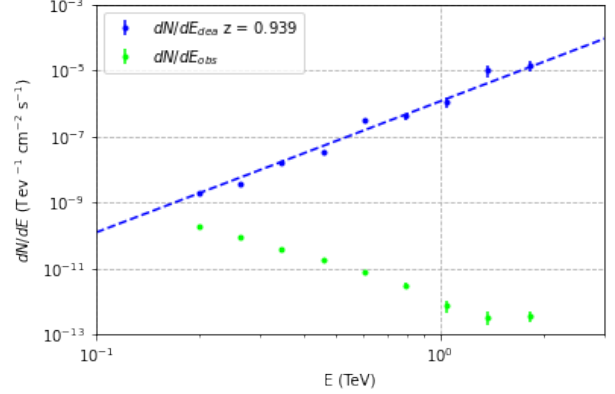


Figura 16: Spettro differenziale deassorbito con $z=0.939$ della sorgente 1ES 1218+304. In verde i dati osservati, mentre in blu i valori deassorbiti ed il relativo fit. Essendo il redshift più alto fra i tre considerati si può notare come il deassorbimento sia elevato. Tale andamento rispetta i valori rappresentati in Fig. 7.

3.4 Stima della distanza

Il redshift, nel caso di 1ES 1218+304, è noto da misure sulle righe di emissione della galassia ospite; però non è possibile sempre sfruttare l'analisi spettroscopica di una sorgente poichè è molto probabile che il getto emesso dal BL Lac copra la luce emessa dalla galassia ospitante.

Per ottenere una stima sul limite superiore del redshift si può utilizzare il metodo esposto in Prandini et al. (2010), esso si basa sulle stesse ipotesi poste precedentemente, ovvero che l'andamento dello spettro differenziale ad energie di *Fermi* (ordine dei GeV) rappresenta un limite alle alte energie. Empiricamente, questo si riflette in uno spettro differenziale con pendenza non superiore a quella misurata nel range *Fermi*. Dal punto di vista teorico, questo significa che la SED presenta un picco ad alte energie con andamento regolare (concavo) senza ulteriori picchi o componenti aggiuntive, come suggerito da numerose osservazioni di sorgenti vicine in cui l'effetto dell'EBL è trascurabile fino ad energie elevate. La metodologia si può schematizzare con:

- Calcolo del coefficiente spettrale Γ_F dei dati di Fermi/LAT tramite fit usando (4), oppure prendendolo da uno dei cataloghi Fermi;

- Scelta di un intervallo in cui è contenuto z^* , tipicamente è quello fra 0 ed 1, ovvero in cui vale l'ipotesi di linearità fra velocità e distanza;
- Calcolo del coefficiente spettrale Γ_{dea} dei dati ad alte energie tramite fit usando (4) e considerando z_m , ovvero il valore mediano dell'insieme di z ;
- Calcolo di $\Delta\Gamma = \Gamma_F - \Gamma_{dea}$, se tale quantità è > 0 allora bisogna tornare al punto due e sostituire z_m all'estremo superiore, mentre se è < 0 si sostituisce z_m all'estremo inferiore.

Quest'algoritmo viene fermato quando la differenza fra due Γ_{dea} successivi è zero.

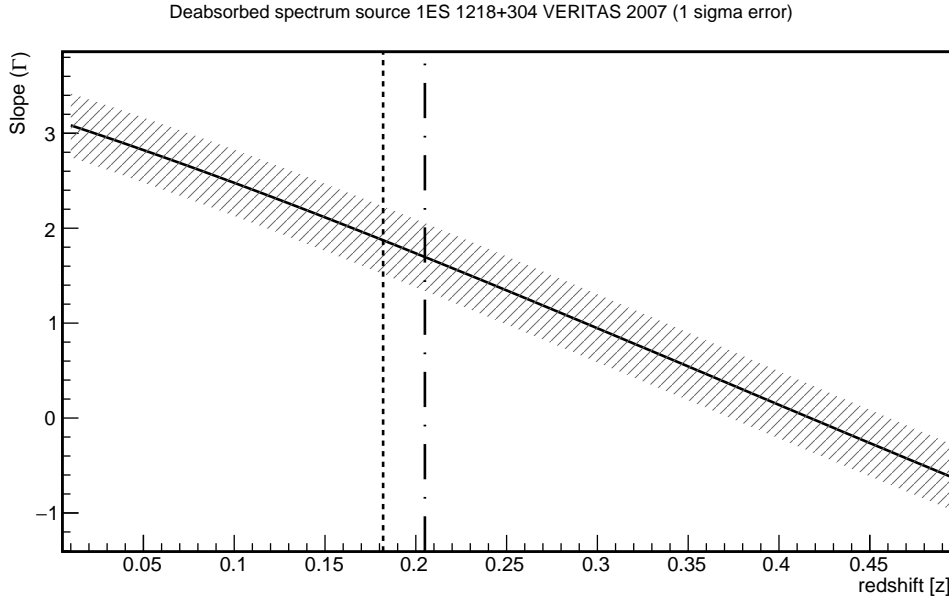


Figura 17: Valori di Γ al variare di z . La linea tratteggiata verticale rappresenta il redshift vero di 1ES 1218+304 ottenuto tramite misure spettroscopiche, mentre la linea a $z=0.202$ indica il redshift z^* al quale la pendenza dei dati Fermi coincide con quella dei dati ad alta energia. Per ricavare l'indice spettrale dei dati Fermi si è utilizzato il catalogo Fermi 1-year.

Il valore dell'indice spettrale dei dati Fermi, utilizzato per calibrare il metodo, è stato preso dal catalogo Fermi 1-year⁶.

Tramite tale metodo è stato possibile ottenere un valore di $z^* = 0.202 \pm 0.055$, questa stima è molto buona come limite superiore, in quanto si ha $z^* > z = 0.182$.

Molti blazar presentano ad oggi redshift ignoto, tramite l'applicazione di quest'algoritmo si potrebbero ottenere delle stime sulle distanze di alcune sorgenti, fra cui 1ES 322-409 oppure PKS 1424+240.

In (Prandini et al., 2010) è esposto un metodo per passare dal limite superiore z^* ad una stima vera e propria del redshift, tramite la relazione:

$$z^* = A + B \cdot z_{vero} \quad (5)$$

In cui A e B sono dei parametri che dipendono dal modello di EBL considerato.

| Modello | A | B |
|--------------|-------------------|-----------------|
| Franceschini | 0.030 ± 0.014 | 1.58 ± 0.14 |
| Dominiguez | 0.036 ± 0.014 | 1.60 ± 0.14 |

Tabella 3: Valori delle costanti A e B in base ai modelli di Franceschini e Dominiguez. E' evidente come la scelta fra i due modelli non influisca molto su z_{vero} in quanto sia A che B hanno valori molto simili.

Invertendo la formula precedente esposta, per $z^* = 0.202 \pm 0.055$ si ottiene $z_{vero} = 0.104 \pm 0.037$ questo valore si discosta molto con quello ottenuto tramite misure spettroscopiche, infatti presentano una compatibilità pessima, ciò è dovuto al fatto che 1ES 1218+304 è una sorgente estrema e quindi non rispetta le ipotesi

⁶<https://www.ssdc.asi.it/fermilfgl/>

per l'utilizzo di tale metodo per la stima della distanza.

Il metodo esposto, seppur calibrato con un numero ridotto di sorgenti, è stato applicato a numerose sorgenti TeV, quali ad esempio PKS 0447-439 (Prandini et al., 2012)

4 Conclusioni

In questa tesi è stato approfondito il fenomeno di propagazione ed assorbimento dei raggi gamma extragalattici e presentato un metodo per stimare la distanza dei blazar.

Tali oggetti sono la base degli AGN delle strutture presenti all'interno di numerose galassie, e tramite i loro getti siamo in grado di studiarne le caratteristiche. Sfruttando la distribuzione spettrale di energia e il flusso differenziale possiamo evidenziare i fenomeni legati all'emissione gamma e numerose proprietà dei blazar. Tramite telescopi in orbita come *Fermi*/LAT e quelli a terra come MAGIC, VERITAS e H.E.S.S. siamo in grado di osservare l'emissione elettromagnetica dai 10 keV ai 100 TeV. Inoltre sono stati evidenziati gli effetti di assorbimento dell'emissione γ legati al fondo EBL, il quale ha un'interazione più probabile proprio alle energie dei fotoni emessi dal getto.

Sono state analizzate le SED di 1ES 1218+304, MKN 421 e PKS 1441+25 ed evidenziato le differenze che intercorrono fra queste tre sorgenti. E' stato trattato l'effetto dell' EBL sul flusso differenziale e, tramite la (3), si è ricavato lo spettro deassorbito. Utilizzando la (4) sono stati effettuati dei fit sugli spettri deassorbiti e tramite la metodologia esposta si è visto un metodo applicabile per trovare la distanza della sorgente, inoltre tramite i dati deassorbiti si è potuta notare la natura di BL Lac estrema della sorgente 1ES 1218+304. Infine si è mostrato il metodo esposto in Prandini et al. (2010), il quale si è visto essere ottimo nello stimare il limite superiore al redshift di una blazar.

Per quanto riguarda l'astronomia gamma si attende la costruzione di due array di telescopi CTA NORTH e CTA SOUTH, il primo situato a La Palma mentre il secondo sulle Ande. La caratteristica principale è che questi array di telescopi, in totale sono 100, riescono a coprire un'area molto elevata e presentano una sensibilità 10 volte superiore a quella degli attuali telescopi Cherenkov.

Inoltre si potrebbe aggiornare il metodo per ricavare il limite superiore testandolo sulle nuove sorgenti, in quanto alla data della pubblicazione di (Prandini et al., 2010) tale routine era stata applicata solo a 16 blazar TeV su 31 scoperte. Ad oggi tale numero è 77 di cui 15 presentano redshift ignoto, il metodo proposto potrebbe essere utilizzato per la stima della distanza di sorgenti come 1ES 2322-409 oppure PKS 1424+240.

Riferimenti bibliografici

- Abdollahi, S., Acero, F., Ackermann, M., Ajello, M., Atwood, W. B., Axelsson, M., Baldini, L., Ballet, J., Barbiellini, G., and et al., D. B. (2020). Fermi large area telescope fourth source catalog. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 247(1):33.
- Acciari, V. A. and E. Aliu, e. a. (2009). VERITAS OBSERVATIONS OF THE BL LAC OBJECT 1es 1218304. *The Astrophysical Journal*, 695(2):1370–1375.
- Ahnen, M. L., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Antoranz, P., Babic, A., Banerjee, B., Bangale, P., Almeida, U. B. d., Barrio, J. A., Bednarek, W., and et al. (2015). Very high energy γ -rays from the universe’s middle age: Detection of the $z = 0.940$ blazar pks 1441+25 with magic. *The Astrophysical Journal*, 815(2):L23.
- Albert, J., Aliu, E., Anderhub, H., Antoranz, P., Armada, A., Asensio, M., Baixeras, C., Barrio, J. A., Bartko, H., Bastieri, D., and et al. (2007). Observations of markarian 421 with the magic telescope. *The Astrophysical Journal*, 663(1):125–138.
- Barone, V. (2004). Relatività : principi e applicazioni / vincenzo barone.
- Bonvin, V., Courbin, F., Suyu, S. H., Marshall, P. J., Rusu, C. E., Sluse, D., Tewes, M., Wong, K. C., Collett, T., Fassnacht, C. D., and et al. (2016). Holicow – v. new cosmograil time delays of he 04351223:h0to 3.8 per cent precision from strong lensing in a flat cdm model. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 465(4):4914–4930.
- Cooray, A. (2016). Extragalactic background light: Measurements and applications.
- Domínguez, A., Primack, J. R., Rosario, D. J., Prada, F., Gilmore, R. C., Faber, S. M., Koo, D. C., Somerville, R. S., Pérez-Torres, M. A., Pérez-González, P., Huang, J. S., Davis, M., Guhathakurta, P., Barmby, P., Conselice, C. J., Lozano, M., Newman, J. A., and Cooper, M. C. (2011). Extragalactic background light inferred from AEGIS galaxy-SED-type fractions. , 410(4):2556–2578.
- Donato, D., Ghisellini, G., Tagliaferri, G., and Fossati, G. (2001). Hard x-ray properties of blazars*. *A&A*, 375(3):739–751.
- Fortin, P., Aharonian, F. A., Hofmann, W., and Rieger, F. (2008). Veritas observations of the bl lac object 1es 1218+304. *AIP Conference Proceedings*.
- Fossati, G., Maraschi, L., Celotti, A., Comastri, A., and Ghisellini, G. (1998). A unifying view of the spectral energy distributions of blazars. , 299(2):433–448.
- Franceschini, A., Rodighiero, G., and Vaccari, M. (2008). Extragalactic optical-infrared background radiation, its time evolution and the cosmic photon-photon opacity. *Astronomy Astrophysics*, 487(3):837–852.
- Ghisellini, G. (2013). Radiative processes in high energy astrophysics. *Lecture Notes in Physics*.
- Ghisellini, G., Maraschi, L., and Dondi, L. (1996). Diagnostics of Inverse-Compton models for the γ -ray emission of 3C 279 and MKN 421. , 120:503–506.
- Ghisellini, G., Righi, C., Costamante, L., and Tavecchio, F. (2017). The fermi blazar sequence. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 469(1):255–266.
- Prandini, E., Bonnoli, G., Maraschi, L., Mariotti, M., and Tavecchio, F. (2010). Constraining blazar distances with combined fermi and tev data: an empirical approach. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 405(1):L76–L80.
- Prandini, E., Bonnoli, G., and Tavecchio, F. (2012). Estimating the redshift of PKS 0447-439 through its GeV-TeV emission. , 543:A111.
- Rico, J. (2016). Overview of magic results. *Nuclear and Particle Physics Proceedings*, 273-275:328–333. 37th International Conference on High Energy Physics (ICHEP).
- Rybicki, G. B. (2004 - 1979). Radiative processes in astrophysics.
- Urry, C. M. and Padovani, P. (1995). Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei. , 107:803.