



Univerzitet u Novom Sadu  
Prirodno-matematički fakultet  
Departman za fiziku

# Analiza gama-zračenja iz Mlečnog Puta u opsegu GeV-TeV energija

Završni rad

Mentor: dr Tijana Prodanović  
Student: Miloš Kovačević  
Novi Sad, 2012



## Sadržaj

1. Uvod .....	5
2. Difuzno $\gamma$ -zračenje.....	6
2.1 Kosmički zraci.....	6
2.2 Nastanak difuznog $\gamma$ -zračenja.....	8
2.3 Spektar difuznog $\gamma$ -zračenja.....	9
3. Milagro.....	10
4. Fermi-LAT.....	11
5. Analiza.....	12
5.1 Upoređivanje oblasti.....	12
5.1.1 Ograničenje latitude.....	14
5.1.2. Ograničenje longitude.....	17
5.2 Upoređivanje merenih vrednosti.....	19
6. Zaključak.....	25
Literatura.....	26



## 1. Uvod

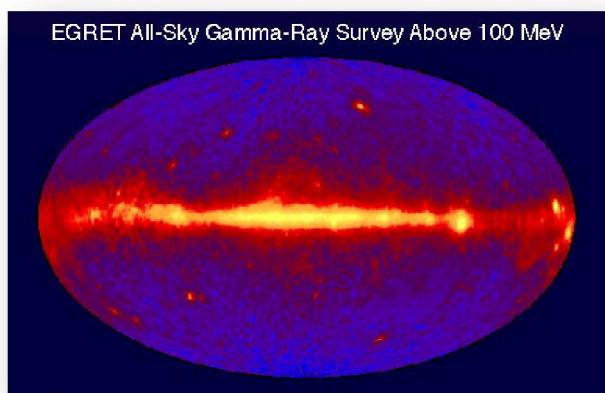
Difuzno  $\gamma$ -zračenje je blisko povezano sa kosmičkim zracima s obzirom da nastaje kao posledica interakcije kosmičkih zraka sa česticama koje čine interstelarni medijum (ISM). ISM se sastoji najviše od atoma vodonika u obliku veoma retkog gasa. Teorijski modeli koji predviđaju spektar difuznog  $\gamma$ -zračenja su nastali pre prvih merenja.

Teleskop *EGRET* je počeo sa radom 1990. godine i bio je prvi ozbiljan pokušaj da se izmeri i mapira difuzno  $\gamma$ -zračenje. On je merio zračenje u intervalu od 30 MeV do 30 GeV. Mereni fluksevi su bili veći od predviđanja teorijskih modela [4].

Detektor *Milagro* je merio difuzno  $\gamma$ -zračenje na energijama reda veličine TeV. U ovom slučaju je takođe izmeren „višak“ zračenja u odnosu na teorijski model [1]. Detektor je kasnije unapređen, a novi rezultati su bili u saglasnosti sa optimizovanim modelima (modeli kod kojih su neka stroga ograničenja parametara „olabavljena“ kako bi dali izmerene rezultate). Neke oblasti u galaksiji su, i u poređenju sa optimizovanim modelima, još uvek posedovale „višak“ zračenja. To je navelo naučnike da objašnjenje potraže u vidu izvora  $\gamma$ -zračenja kao što su ostaci supernova i neutronske zvezde [3].

Teleskop *Fermi-LAT* je lansiran 2008. godine. On vrši merenja u intervalu od 30 MeV do 300 GeV. Godine 2012. *Fermi-LAT* tim je objavio prve podatke merenja. Podaci ukazuju da ne postoji „višak“ zračenja u domenu GeV energija koje je prethodno registrovao manje precizni *EGRET* [4].

Svrha ovog rada je da uporedi merenja difuznog  $\gamma$ -zračenja koja potiču sa *Fermi-LAT* teleskopa (oblast GeV) i *Milagro* detektora (oblast TeV) kako bi se proverilo postojanje „viška“ difuznog  $\gamma$ -zračenja u oblasti TeV energija koga je ustanovio prvi *Milagro* eksperiment [1].

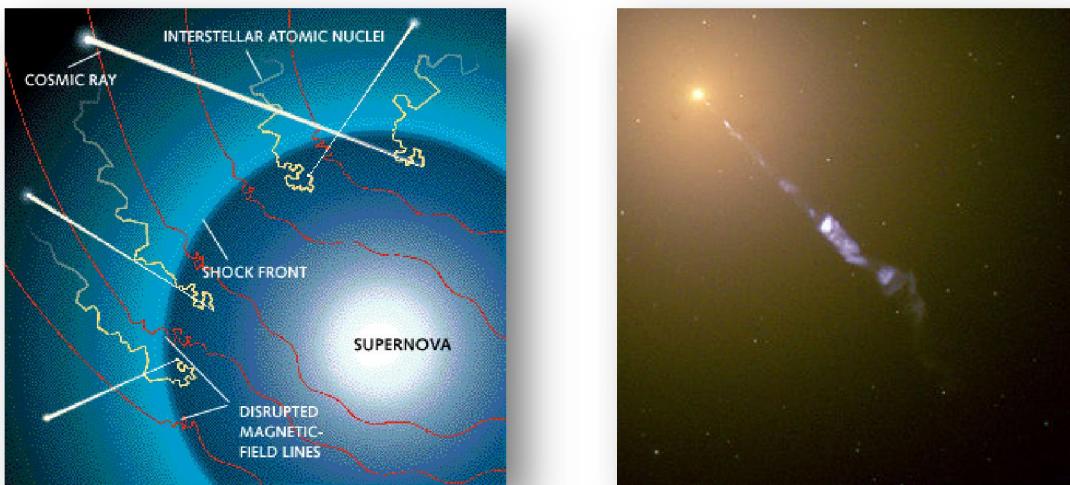


Slika 1. Prikaz  $\gamma$ -zračenja sa celog neba na energijama većim od 100 MeV, *EGRET* [5].

## 2. Difuzno $\gamma$ -zračenje

### 2.1. Kosmički zraci

Difuzno  $\gamma$ -zračenje je posledica interakcije kosmičkih zraka i ISM-a. Kosmički zraci su nanelektrisane čestice sa veoma velikim energijama. Čine ih protoni (86%),  $\alpha$ -čestice (11%), elektroni (2%) i jezgra težih elemenata. S obzirom da ove čestice u sličnim proporcijama sačinjavaju i ISM, može se zaključiti da su kosmički zraci, zapravo, ubrzane čestice ISM-a. Smatra se da ove čestice ubrzavaju kada zvezda postane supernova. Udarni talas supernove prolazi kroz ISM i stvara deformacije u magnetnom polju. Ove deformacije magnetnog polja utiču na nanelektrisane čestice tako što ih ubrzavaju kroz proces nazvan Fermijevo ubrzanje 1. reda.



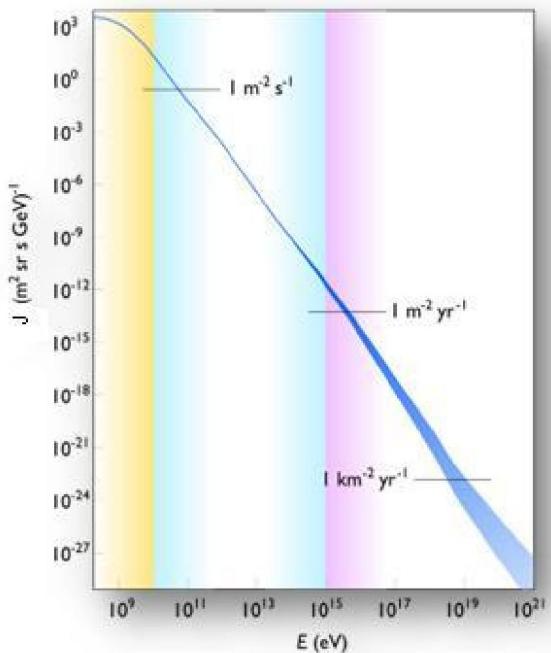
Slika 2. Udarni talas supernove ubrzava čestice ISM-a (levo), mlaz čestica dug 5000 svetlosnih godina izbačen iz AGJ-a M87 [8] (desno).

Međutim, ovim putem se čestice mogu najviše ubrzati do  $10^{17}$  eV a kosmički zraci mogu imati energije i do  $10^{21}$  eV. Najenergičniji kosmički zraci nastaju u oblastima koje se nazivaju aktivna galaktička jezgra (AGJ) [10]. To su galaktička jezgra koja poseduju veoma masivnu crnu rupu. U nju se „sliva“ materijal galaktičkog jezgra i pri tome se čestice sudaraju i oslobođaju ogromnu energiju.

Mereni spektar kosmičkog zračenja se može predstaviti stepenim zakonom:

$$J \equiv \frac{dF}{dE} \sim E^{-\alpha}. \quad (I)$$

Kada se predstavi u logaritamskoj skali zavisnost će biti linearna ( $\alpha$  je nagib krive).



Slika 3. Energijski spektar kosmičkog zračenja.

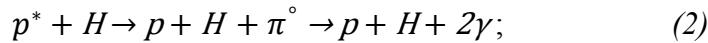
Može se primetiti da kriva dva puta menja nagib, jednom na  $10^{15}$  eV i drugi put na  $10^{19}$  eV. Koeficijent nagiba do  $10^{15}$  eV iznosi  $\alpha = -2,75$ , zatim, od  $10^{15}$  eV do  $10^{19}$  eV iznosi  $\alpha = -3,1$  a nakon  $10^{19}$  eV  $\alpha = (-1, -2)$ . Mora se uzeti u obzir da dati spektar važi za Sunčev sistem s obzirom da je tu izmeren. Mogućnost da u drugim delovima galaksije spektar ima različit nagib se počela uzimati u obzir nakon merenja izvršenih *EGRET* teleskopom i *Milagro* detektorom.

S obzirom da su kosmički zraci nanelektrisane čestice, oni skreću u magnetnom polju galaksije. Kada dođu do Zemlje, ne može se znati iz kog pravca su došli. Jedino se za čestice sa najvećim energijama zna da su došle iz AGJ-ova zato što im se upadne putanje poklapaju sa lokacijama poznatih AGJ-ova. Kosmički zraci koji su ubrzani u supernovama posle određenog vremena difunduju kroz prostor. Ako bi se posmatrala oblast ostatka supernove nedugo posle eksplozije, primetilo bi se da kosmički zraci nisu još u potpunost difundovali i utvrdilo bi se da potiču iz određenog dela prostora (ostatak supernove) koji bi delovao kao izvor kosmičkog zračenja.

## 2.2 Nastanak difuznog $\gamma$ -zračenja

Ova vrsta zračenja nastaje kao posledica interakcije kosmičkih zraka sa ISM-om. Razlikuju se sledeći mehanizmi nastanka:

- Interakcija protona (i jezgara težih atoma) sa vodonikom u ISM-u. U ovoj interakciji nastaju neutralni pioni koji se potom raspadaju na dva  $\gamma$ -fotona:



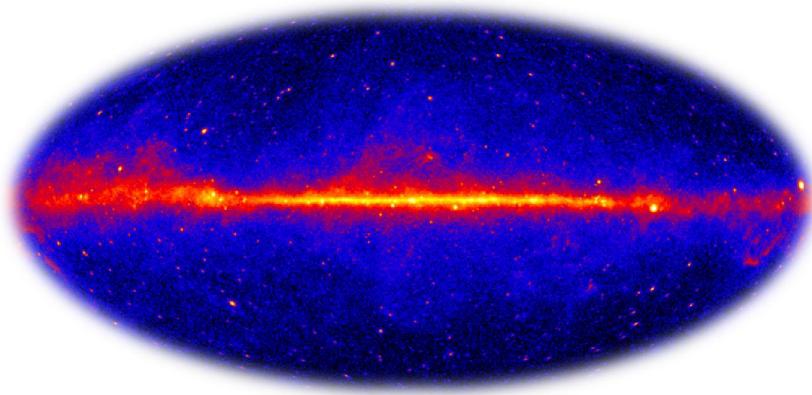
- Interakcija elektrona sa međuzvezdanim zračenjem i kosmičkim mikrotalanim pozadinskim zračenjem. Ovim procesom elektroni predaju svoju energiju optičkim i mikrotalasnim fotonima koji onda postaju  $\gamma$ -fotoni (inverzno Komptonovo zračenje):



- Interakcija elektrona sa ISM-om. U ovoj interakciji elektroni naglo koče kada se nađu blizu nanelektrisanih jona ISM-a pri čemu „isijaju“  $\gamma$ -foton (bremštralung zračenje):



Gas je najzastupljeniji u galaktičkoj ravni, stoga će difuzno  $\gamma$ -zračenje najviše poticati iz ovog dela galaksije. S obzirom da su kosmički zraci i gas kontinualno rasprostranjeni, nastalo  $\gamma$ -zračenje će imati difuzan karakter. Najprecizniji snimak gama zračenja potiče sa *Fermi-LAT* teleskopa [4]:



Slika 4. Prikaz  $\gamma$ -zračenja sa celog neba na energijama oko GeV. Difuzno  $\gamma$ -zračenje iz galaktičke ravni Mlečnog Puta i tačkasti izvori izvan Mlečnog Puta [6].

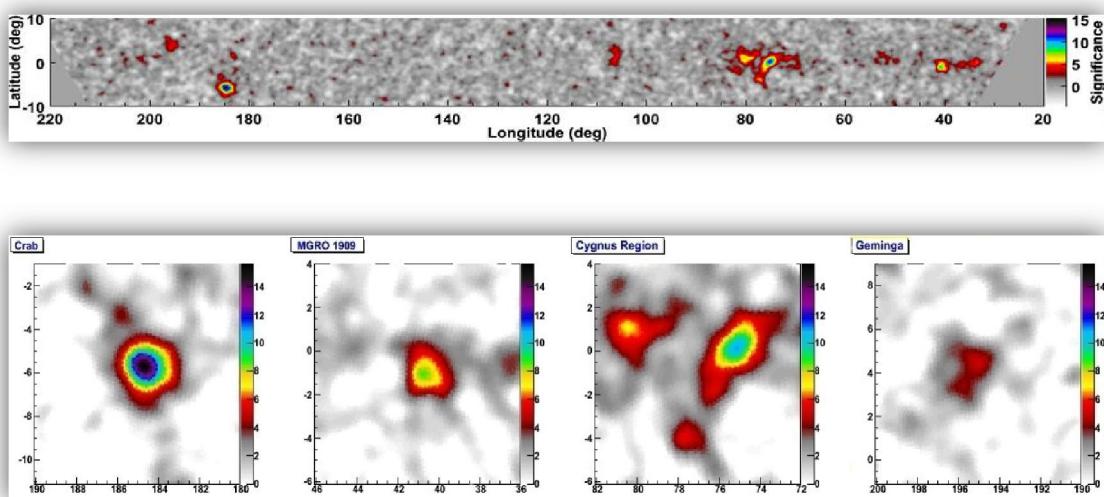
### 2.3 Spektar difuznog $\gamma$ -zračenja

Spektar difuznog  $\gamma$ -zračenja najviše zavisi od spektra kosmičkih zraka, a intenzitet zavisi od gustine gasa i fluksa kosmičkog zračenja [4]. Poznavanje raspodele gasa unutar galaksije omogućava indirektno proučavanje kosmičkih zraka širom galaksije.

Spektar zračenja nastao raspadom piona bi trebalo da poseduje simetričan izgled na logaritamskoj skali. Vrh bi se nalazio na energiji oko 0,07 GeV (polovina energije mirovanja neutralnog piona) a dugi kraci bi se protezali simetrično na obe strane. Nagib kraka koji se proteže ka višim energijama bi trebalo da asimtotski teži nagibu kosmičkog zračenja  $\alpha$ . Takođe, na višim energijama komponenta nastala usled raspada piona bi trebalo da dominira u odnosu na komponente nastale usled interakcija elektrona sa ISM-om.

Kompjuterski model koji predviđa izgled spektra difuznog  $\gamma$ -zračenja, kada se u njega „ubaci“ raspodela kosmičkog zračenja i gasa, naziva se *GALPROP*. Parametri standardnog *GALPROP* modela su podešeni tako da daju spektar kosmičkih zraka kakav je izmeren u Sunčevom sistemu. S obzirom da je *EGRET* izmerio veći intenzitet u GeV oblasti spektra od predviđenog, osmišljen je optimizovan *GALPROP* model. U njemu spektar kosmičkih zraka ne mora strogo da prati lokalno izmeren spektar i takav model daje predviđanja bliže izmerenim vrednostima.

Kao što je rečeno, ako se u nekoj oblasti galaksije nalazi ostatak supernove, na tom mestu kosmički zraci nisu stigli da difunduju kroz prostor i poseduju određenu usmerenost u kretanju. Samim tim, nastalo difuzno  $\gamma$ -zračenje će posedovati određenu usmerenost u kretanju. Prema tome, ta oblast galaksije će izgledati kao izvor  $\gamma$ -zračenja i odskakaće od prave difuzne komponente. Takođe, postoje direktni izvori  $\gamma$ -zračenja kao što su neutronske zvezde. Merenja *Egret* teleskopa i *Milagro* detektora ukazuju na postojanje izvora  $\gamma$ -zračenja:



Slika 5. Nebo oko galaktičke ravni na energiji oko 20 TeV (gore), izdvojeni regioni sa gornje mape u kojima se nalaze izvori  $\gamma$ -zračenja (dole) [9].

### 3. Milagro

Detektor *Milagro* (čudo na španskom jeziku) se nalazi u Sjedinjenim Američkim Državama na nadmorskoj visini od 2500 m. On posmatra  $\gamma$ -zračenje na energijama reda veličine TeV. U suštini, *Milagro* je veliki bazen sa vodom i detektorima koji se nalaze u njemu i oko njega. Kada foton velike energije (reda TeV) dospe u Zemljinu atmosferu, on stvara elektron i pozitron. Oni potom dospevaju u bazen sa vodom i emituju Čerenkovljevo zračenje koje se beleži spomenutim detektorima. Čerenkovljevo zračenje nastaje kada se čestica kreće brzinom većom od brzine prostiranja elektromagnetnih talasa za određeni medijum (za vodu,  $c^* \approx 2,25 \times 10^8 \frac{m}{s}$ ). Pošto su detektori postavljeni u mrežu, mogu se rekonstruisati putanje česticu, a samim tim, i pravac iz koga je došao foton. U samom bazenu se nalaze detektori koji mere energiju česticu, tj. energiju fotona [3].

Teleskop je vršio posmatranja u dve faze. U prvoj fazi *Milagro* je detektovao fotone sa energijom od 3,5 TeV pa naviše a oblast posmatranja je zahvatala  $l = [40^\circ, 100^\circ]$  galaktičke longitude i  $b = [-5^\circ, 5^\circ]$  galaktičke latitude. Nakon toga, teleskop je unapređen. Povećana mu je uglovna rezolucija (sa  $0,75^\circ$  na  $0,45^\circ$ ) i vidno polje ( $l = [30^\circ, 110^\circ], l = [136^\circ, 216^\circ]$  i  $b = [-10^\circ, 10^\circ]$ ) a posmatrani fotoni su imali energiju od oko 15 TeV. Novi teleskop je počeo sa merenjima 2001. godine a završio ih je 2008. kada su i objavljeni rezultati [3].



Slika 6. Detektor *Milagro*. Spolja (levo), unutra (desno) [3].

Detektor *Milagro* je prvi  $\gamma$ -detektor u TeV režimu koji je mogao kontinuirano posmatrati veliki deo neba. Ostali  $\gamma$ -detektori, *Veritas* i *Hess*, mere Čerenkovljevo zračenje koje nastaje u atmosferi kada brzi elektroni i pozitroni prolaze kroz nju. Za takvo merenje im treba veoma vedra noć i zato ne mogu kontinuirano posmatrati nebo.

U prvoj fazi *Milagro* je detektovao višak difuznog  $\gamma$ -zračenja u odnosu na teorijska predviđanja dok je u drugoj fazi detektovao difuzno  $\gamma$ -zračenje u okvirima optimizovanog *GALPROP* modela, sem za oblast Labuda, *Cygnus*,  $l = [65^\circ, 85^\circ]$  gde se prepostavlja da postoji izvor  $\gamma$ -zračenja [3].

#### 4. Fermi-LAT

Teleskop *Fermi-LAT*, *Fermi Large Area Telescope*, bivši naziv *GLAST*, *Gamma-Ray Large Area Space Telescope*, je montiran na satelit koji je lansiran u junu 2008. godine. Njegova uloga je da meri  $\gamma$ -zračenje koje dolazi iz svemira. Energijski opseg mu se kreće od 20 MeV pa sve do 300 GeV. U svakom trenutku pokriva 20% čitavog neba (2 sr) a za 3 sata „pređe“ celokupno nebo. Ima bolju uglovnu rezoluciju ( $3,5^\circ$  za  $E < 100$  MeV i  $0,15^\circ$  za  $E > 10$  GeV), energijsku rezoluciju (< 10%), vreme mrtvog hoda (< 100  $\mu$ s) i veći energijski opseg od svog prethodnika *EGRET*-a. Na satelitu se takođe nalazi teleskop, sa manjom rezolucijom ali vidnim poljem koje pokriva celo nebo, *GMB*, *Gamma-ray Burst Monitor*, čija je uloga da posmatra intenzivne izlive  $\gamma$ -zračenja [4].



Slika 7. Satelit na kome se nalaze oba teleskopa [6].

*Fermi-LAT* je zapravo detektor  $\gamma$ -zračenja sličan onim koji se koriste u nuklearnoj fizici. Foton  $\gamma$ -zraka prolazi kroz tanke ploče napravljene od volframa koji interaguje sa datim fotonom. Posle interakcije, foton proizvodi elektron i pozitron. Ove čestice imaju sličnu putanju koju je imao foton. Elektron i pozitron nastavljaju sa prolaskom kroz tanke ploče i pri tome jonizuju atome. Prateći mesta jonizacije kroz različite slojeve, može se rekonstruisati putanja ovih čestica, a potom, i pravac upadnog fotona. Elektron i pozitron izgube najveći deo energije tek na kraju kada dođu do kalorimetra gde se meri njihova energija, tj. energija fotona. Ovim postupkom se dobijaju pravac i energija upadnog zračenja [4].

Rezultati merenja ove misije se poklapaju sa predviđanjima optimizovanog *GALPROP* modela i ne registriraju „GeV višak“ koga je prethodno registrovao *EGRET* [4].

## 5. Analiza

### 5.1 Upoređivanje oblasti

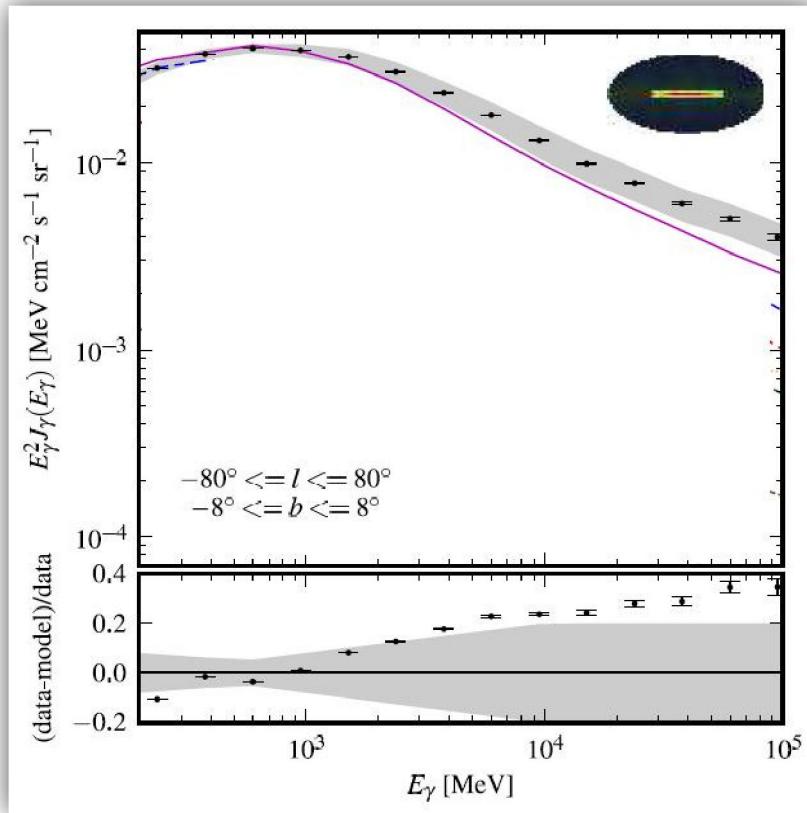
Cilj ovog rada je da utvrdi konzistentnost između *Fermi-LAT* i *Milagro* merenja. Detektor *Milagro* je merio u oblasti  $l = [30^\circ, 110^\circ]$  i  $l = [136^\circ, 216^\circ]$  galaktičke longitude i  $b = [-10^\circ, 10^\circ]$  galaktičke latitude [3]. Podaci vezani za *Milagro* eksperiment koji su bili dostupni za ovaj rad su dati u sledećoj tabeli:

Tabela 1. Difuzno  $\gamma$ -zračenje na energiji oko 15 Tev, *Milagro*. Prva greška je statističke prirode dok je druga sistematska [3].

$l$ za $ b  < 2^\circ$	Statistički značaj	Izmeren fluks	<b>GALPROP model</b>	
			optimizovan	standardni
[ $^\circ$ ]	[ $\sigma$ ]	[ $\times 10^{-13} \text{ TeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ ]		
30 - 65	5,1	$23,1 \pm 4,5 \begin{array}{l} +7,0 \\ -8,0 \end{array}$	20,0	4,9
65 - 85	8,6	$21,8 \pm 2,5 \begin{array}{l} +7,2 \\ -7,8 \end{array}$	10,2	2,7
85 - 110	1,3	< 7,1	5,8	1,3
136 - 216	0,8	< 5,7	3,1	0,8

Poslednje dve oblasti imaju mali statistički značaj signala prema šumu a u drugoj oblasti se nalazi izvor zračenja koji doprinosi tome da izmereni fluks bude duplo veći nego što predviđa optimizovan *GALPROP* model. Dakle, ostaje prva oblast da se uzme u obzir.

Podaci koji su bili dostupni sa *Fermi-LAT* satelita, a koji su od interesa za ovaj rad, su dati u vidu sledećeg grafika:

Slika 8. Energijski spektar  $\gamma$ -zračenja, *Fermi-LAT* [4].

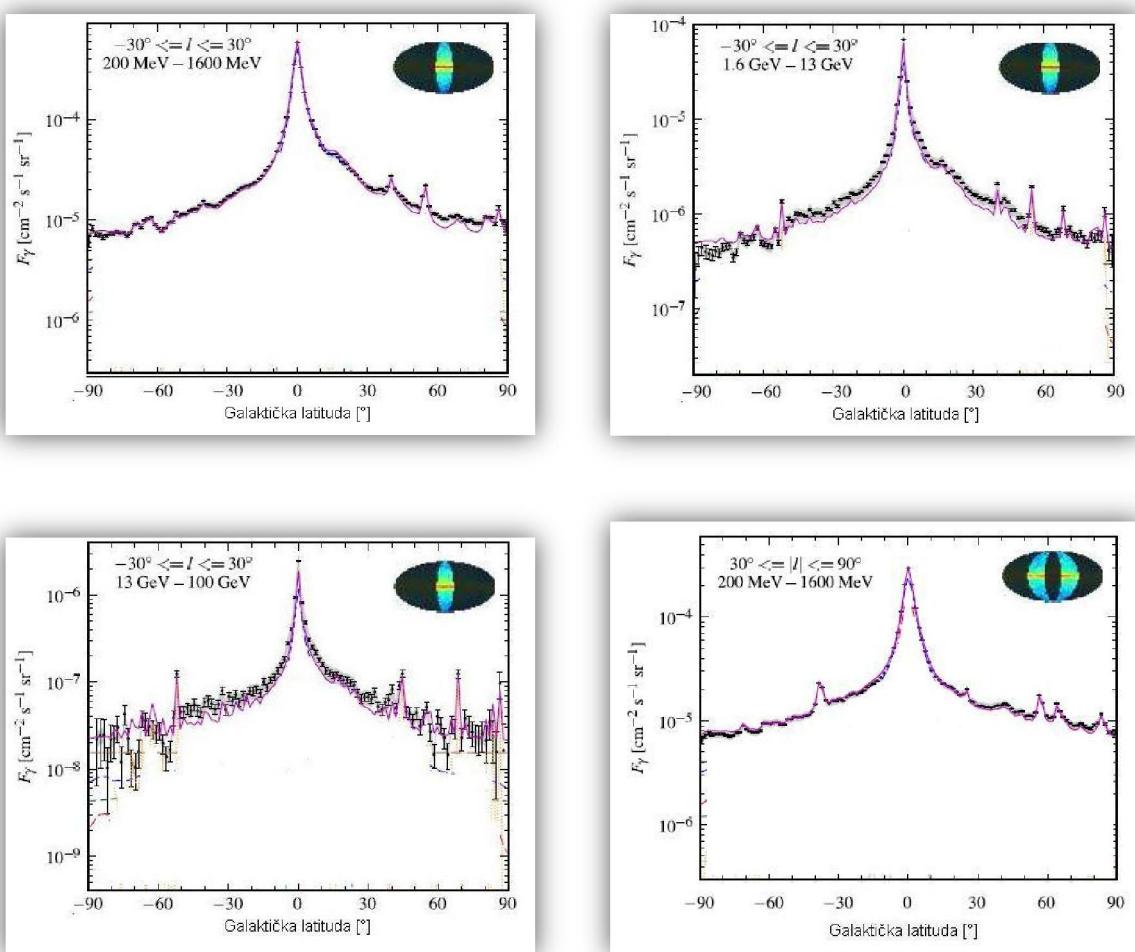
Crne tačke predstavljaju merene podatke, siva oblast predstavlja sistematsku nesigurnost, ljubičasta linija predstavlja predviđanje optimizovanog *GALPROP* modela. Donji deo slike predstavlja odstupanje merenih podataka od predviđanja spomenutog modela za različite energije. Posmatrani deo galaksije je prikazan u gornjem, desnom uglu a njegove koordinate su date u donjem, levom uglu slike.

S obzirom da se *Milagro* oblast ( $l = [30^\circ, 65^\circ]$  i  $b = [-2^\circ, 2^\circ]$ ) i *Fermi-LAT* oblast merena ( $l = [-80^\circ, 80^\circ]$  i  $b = [-8^\circ, 8^\circ]$ ) ne poklapaju, moraju se izvršiti izvesne ispravke. Ispravke su u vidu ograničavanja *Fermi-LAT* oblasti na oblast koja odgovara *Milagro* oblasti:

- $b = [-8^\circ, 8^\circ] \rightarrow b = [-2^\circ, 2^\circ];$
- $l = [-80^\circ, 80^\circ] \rightarrow l = [30^\circ, 65^\circ].$

### 5.1.1 Ograničenje latitude

Prvo se ograničava latituda  $b$  uz pomoć sledećih grafika:



Slika 9. Fluks  $\gamma$ -zračenja u zavisnosti od galaktičke latitude  $b$ , *Fermi-LAT* [4].

Prva tri grafika prikazuju zavisnost fluksa  $F_\gamma$  od galaktičke latitude  $b$  pri  $l = [-30^\circ, 30^\circ]$  dok se razlikuju po energijskim intervalima ( $E = 200 \text{ MeV} - 1600 \text{ MeV}$ ,  $E = 1.6 \text{ GeV} - 13 \text{ GeV}$  i  $E = 13 \text{ GeV} - 100 \text{ GeV}$ ). Četvrti grafik prikazuje zavisnost fluksa od galaktičke latitude pri  $|l| = [30^\circ, 90^\circ]$  za energijski interval od 200 do 1600 MeV [4].

Da bi se *Fermi-LAT* oblast svela sa  $b = [-8^\circ, 8^\circ]$  na  $b = [-2^\circ, 2^\circ]$  potrebno je izračunati srednje vrednosti fluksa u ovim intervalima i podeliti ih. Količnik će biti faktor sa kojim će se množiti vrednosti sa slike 8 kako bi odgovarale intervalu latitude  $b = [-2^\circ, 2^\circ]$ . Sa datim grafika se može zaključiti da profil fluksa u intervalu  $b = [-8^\circ, 8^\circ]$  ostaje sličan za različite energije i različite galaktičke longitude. Intenzitet maksimuma krive se menja od grafika do grafika ali važno je da se odnos srednjih vrednosti u intervalu  $b = [-2^\circ, 2^\circ]$  i  $b = [-8^\circ, 8^\circ]$  ne menja

mnogo. Kao reprezentativni grafik uzet je poslednji sa slike 9 ( $E = 200 \text{ MeV} - 1600 \text{ MeV}$ ,  $|l| = [30^\circ, 90^\circ]$ ), dok je za prvi grafik ( $200 \text{ MeV} < E < 1600 \text{ MeV}$ ,  $l = [-30^\circ, 30^\circ]$ ) urađena sledeća analiza:

Srednje vrednosti su računate na dva načina:

1. Fluksevi su očitani sa grafika i nađena je njihova aritmetička sredina za oba intervala galaktičkih longituda;
2. Izračunata je površina ispod krive a zatim je podeljena sa intervalom latitude koju zahvata. Površina je računata tako što se razmak (na osi latitude) između dve susedne tačke množi sa aritmetičkom sredinom fluksa istih. Zatim se ove manje površine sabiraju u veću. Ovaj postupak je moguć s obzirom da se kriva može smatrati linearnom na intervalu između dve tačke. Takođe, u ovoj metodi su ubaćene četiri tačke  $b = [-8^\circ, -2^\circ, 2^\circ, 8^\circ]$  kako bi površine tačno zahvatale potrebne intervale. Intenziteti ovih tačaka su nađeni kao aritmetičke sredine susednih tačaka (iz ovog razloga su ubaćene još dve tačke  $b = [9.0^\circ, -8.4^\circ]$  koje su van traženih intervala).

U sledećoj tabeli se nalaze podaci očitani sa prvog grafika na slici 9:

Tabela 2. Podaci očitani sa prvog grafika na slici 9, *Fermi-LAT*.

$$E = 200 \text{ MeV} - 1600 \text{ MeV}, l = [-30^\circ, 30^\circ]$$

<b><i>b</i></b>	<b><i>log(F)</i></b>	<b><i>F</i></b>	<b><i>Δb</i></b>	<b><i>⟨F⟩</i></b>
[°]	[ $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$ ]	[ $10^{-4} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$ ]	[°]	[ $10^{-4} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$ ]
9,0	-4,19	0,65		
8,0	-4,14	0,72	0,4	0,74
7,6	-4,12	0,76	1,4	0,84
6,2	-4,03	0,93	1,6	1,06
4,6	-3,92	1,20	1,6	1,49
3,0	-3,75	1,77	1,0	2,20
2,0	-3,58	2,63	0,4	2,85
1,6	-3,51	3,08	1,6	4,36
0	-3,25	5,64	1,4	4,55
-1,4	-3,46	3,46	0,6	3,04
-2,0	-3,58	2,61	0,8	2,20
-2,8	-3,75	1,79	1,4	1,41
-4,2	-3,99	1,03	1,6	0,89
-5,8	-4,12	0,75	1,4	0,66
-7,2	-4,24	0,57	0,8	0,54
-8,0	-4,29	0,51		
-8,4	-4,32	0,48		

U kolonama su sledeće vrednosti:

1. Latitude  $b$  očitane sa grafika;
2. Logaritam flukseva  $\log(F)$  očitanih sa grafika;
3. Izračunati fluksevi  $F$ ;
4. Intervali latituda između susednih tačaka  $\Delta b$ ;
5. Aritmetičke sredine susednih tačaka  $\bar{F}$ .

Koristeći oba postupka dobijeni su sledeći faktori:

1. 2,12;
2. 2,13.

Na osnovu rezultata može se zaključiti da obe metode daju veoma slične rezultate, pogotovo ako se uzme u obzir greška nastala pri očitavanju vrednosti sa grafika, i zato će se, radi jednostavnosti, koristiti prva metoda.

Podaci vezani za poslednji grafik na slici 9 se nalaze u sledećoj tabeli:

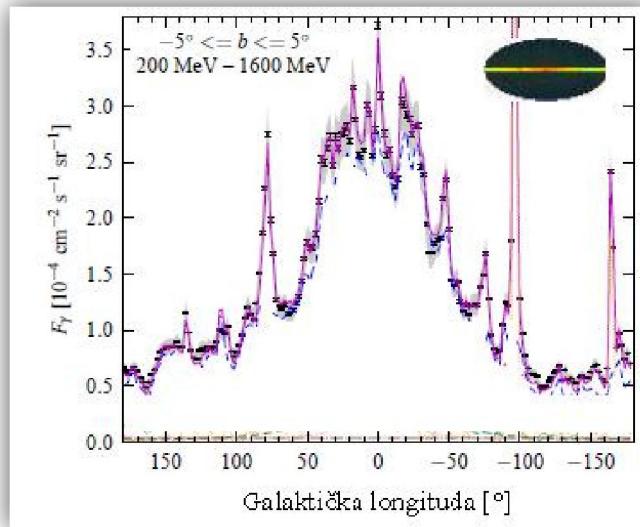
Tabela 3. Podaci očitani sa poslednjeg grafika na slici 9, *Fermi-LAT*.

<b><math>E = 200 \text{ MeV} - 1600 \text{ MeV},  l  = [30^\circ, 90^\circ]</math></b>		
<b><math>b</math></b>	<b><math>\log(F)</math></b>	<b><math>F</math></b>
[ $^\circ$ ]	[ $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$ ]	[ $10^{-4} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$ ]
7,0	-4,33	0,47
6,2	-4,22	0,60
4,8	-4,10	0,79
3,1	-3,91	1,24
1,4	-3,70	2,01
0	-3,54	2,90
-1,4	-3,69	2,06
-3,1	-3,95	1,12
-4,5	-4,14	0,72
-5,9	-4,30	0,51
-7,0	-4,39	0,41

Jednostavnost prve metode u odnosu na drugu se ogleda u veličini tabela potrebnih za njihovo korišćenje. Faktor koji se dobija korišćenjem prve metode iznosi 1,99. S obzirom da gornja tabela važi za interval longituda koji se bolje slaže sa intervalom longituda *Milagro* detektora  $l = [30^\circ, 65^\circ]$ , u nastavku rada je korišćen faktor 1,99 dok je faktor dobijen uz pomoć prvog grafika (2,12) zanemaren.

### 5.1.2 Ograničenje longitude

Dalje je potrebno ograničiti longitudu sa  $l = [-80^\circ, 80^\circ]$  na  $l = [30^\circ, 65^\circ]$ . U ovu svrhu se koristi sledeći grafik:



Slika 10. Promena fluksa  $\gamma$ -zračenja sa galaktičkom longitudom  $l$ , *Fermi-LAT*.

Na slici 10 je predstavljena promena fluksa sa galaktičkom longitudom  $l$  za  $b = [-5^\circ, 5^\circ]$  i  $E = 200 \text{ MeV} - 1600 \text{ MeV}$ . Pod pretpostavkom da je zavisnost slična i na većim energijama možemo primeniti prethodni postupak. Očitane tačke se nalaze u sledećoj tabeli:

Tabela 4. Podaci očitani sa slike 10, *Fermi-LAT*.

$E = 200 \text{ MeV} - 1600 \text{ MeV}, b = [-5^\circ, 5^\circ]$

$l [^\circ]$		$F [10^{-4} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}]$					
80	2,25	36	2,70	-8	2,60	-60	1,25
76	1,67	32	2,72	-12	2,27	-64	1,22
72	1,27	28	2,74	-16	3,03	-68	1,23
68	1,18	24	2,80	-20	2,92	-72	1,38
64	1,15	20	3,17	-24	2,74	-76	1,67
60	1,18	16	2,87	-28	2,82	-80	0,95
56	1,29	12	2,54	-32	2,39		
52	1,63	8	2,99	-36	1,94		
48	1,73	4	2,56	-40	1,76		
44	2,14	0	3,71	-44	1,80		
40	2,49	-4	2,74	-48	2,33		

Obojene kolone predstavljaju galaktičku longitudu  $l$  a u belim kolonama se nalaze odgovarajući fluksevi. Slično postupku računanja faktora za latitudu, nalaze se srednje vrednosti za određene intervale longituda ( $l = [30^\circ, 65^\circ]$  i  $l = [-80^\circ, 80^\circ]$  ) i potom se dele kako bi se dobio željeni faktor. Radi jednostavnosti prikaza u tabeli se nalazi svaka druga tačka. Naravno, sve tačke su uzete u obzir pri računanju faktora koji iznosi 0,817.

Kada se uzmu u obzir oba postupka (skaliranje latitude  $b$  i longitude  $l$ ), nalazi se da podatke na slici 8 treba pomnožiti sa  $1,99 \times 0,817 = 1,63$  kako bi podaci sa *Fermi-LAT* satelita odgovarali oblasti  $b = [-2^\circ, 2^\circ]$  i  $l = [30^\circ, 65^\circ]$ .

## 5.2 Upoređivanje merenih vrednosti

Teleskop *Fermi-LAT* je merio na energijama reda veličine GeV dok je *Milagro* to činio za TeV energije. Vrednosti očitane sa slike 8 i jedna ubačena *Milagro* tačka iz tabele 1 se nalaze u sledećoj tabeli:

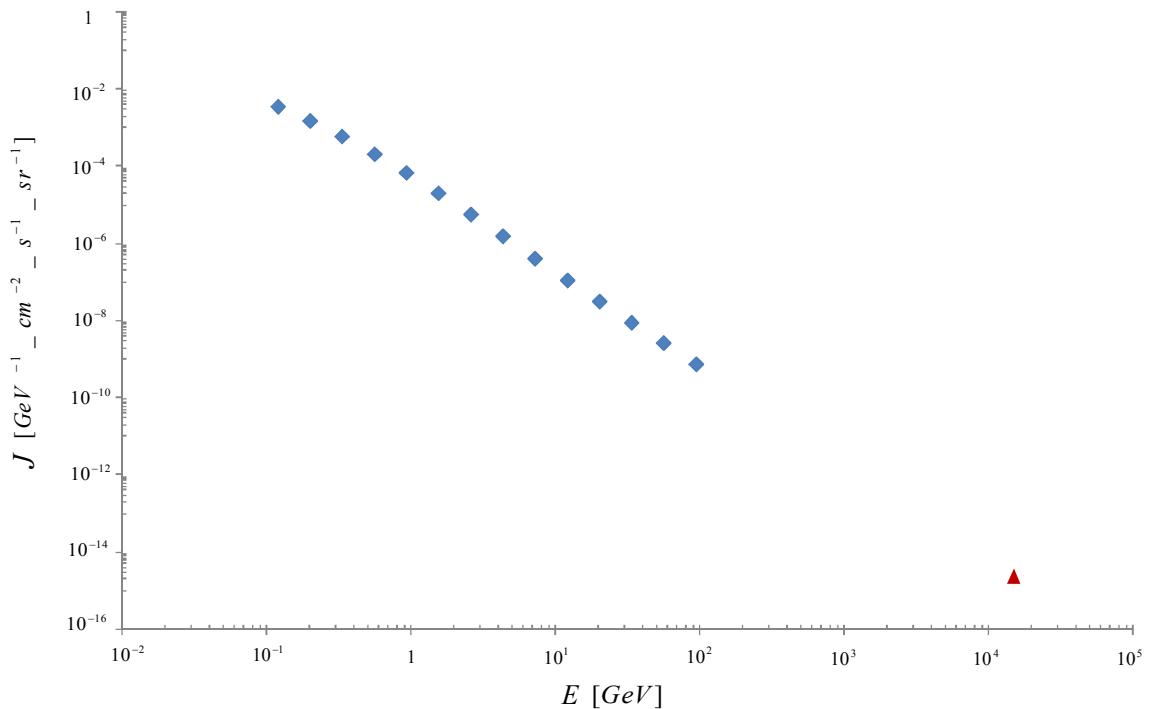
Tabela 5. Očitani podaci sa slike 8 i jedna ubačena *Milagro* tačka.

$\text{Log}(E)$	$\text{Log}(E^2 J)$	$E$	$J$	$E^2 J$
[MeV]	[MeV cm $^{-2}$ s $^{-1}$ sr $^{-1}$ ]	[GeV]	[GeV $^{-1}$ cm $^{-2}$ s $^{-1}$ sr $^{-1}$ ]	[GeV cm $^{-2}$ s $^{-1}$ sr $^{-1}$ ]
2,08	-1,49	0,12	$3,64 \times 10^{-3}$	$5,22 \times 10^{-5}$
2,30	-1,42	0,20	$1,55 \times 10^{-3}$	$6,18 \times 10^{-5}$
2,52	-1,39	0,33	$6,02 \times 10^{-4}$	$6,65 \times 10^{-5}$
2,75	-1,39	0,56	$2,10 \times 10^{-4}$	$6,57 \times 10^{-5}$
2,97	-1,44	0,93	$6,87 \times 10^{-5}$	$5,91 \times 10^{-5}$
3,19	-1,52	1,55	$2,04 \times 10^{-5}$	$4,91 \times 10^{-5}$
3,42	-1,63	2,61	$5,65 \times 10^{-6}$	$3,85 \times 10^{-5}$
3,64	-1,75	4,35	$1,54 \times 10^{-6}$	$2,92 \times 10^{-5}$
3,86	-1,88	7,24	$4,05 \times 10^{-7}$	$2,13 \times 10^{-5}$
4,09	-2,00	12,2	$1,10 \times 10^{-7}$	$1,63 \times 10^{-5}$
4,31	-2,11	20,3	$3,10 \times 10^{-8}$	$1,28 \times 10^{-5}$
4,53	-2,22	33,8	$8,67 \times 10^{-9}$	$9,92 \times 10^{-6}$
4,75	-2,29	56,3	$2,61 \times 10^{-9}$	$8,27 \times 10^{-6}$
4,98	-2,39	94,8	$7,30 \times 10^{-10}$	$6,57 \times 10^{-6}$
		$15 \times 10^3$	$2,31 \times 10^{-15}$	$5,20 \times 10^{-7}$

*Fermi-LAT* podaci su plave i bele boje a *Milagro* podatak je crvene boje. Kolone sadrže sledeće podatke:

1. Direktno očitan logaritam energije;
2. Direktno očitan logaritam gustine fluksa pomnožen kvadratom energije;
3. Energija u GeV;
4. Gustina fluksa korigovana na *Milagro* oblast;
5. Gustina fluksa korigovana na *Milagro* oblast pomnožena kvadratom odgovarajuće energije.

Na sledećem grafiku je prikazana gustina fluksa u zavisnosti od energije (obe ose su u logaritamskoj skali):



Grafik 1. Zavisnost gustine fluksa od energije, 14 Fermi-LAT tačaka (plavo) i Milagro tačka (crveno).

Plavi kvadratići predstavljaju *Fermi-LAT* merenja a crveni trougao prestavlja *Milagro* merenje. Na većim energijama nagib spektra difuznog  $\gamma$ -zračenja bi trebalo da teži nagibu spektra kosmičkog zračenja  $\alpha$ . Sve tačke na grafiku 1 praktično „leže“ na jednoj liniji. Nagib ove linije bi, prema teoriji, trebalo da odgovara nagibu spektra kosmičkog zračenja  $\alpha$  (spektralni indeks). Međutim, tačke na nižim energijama odstupaju od ovog pravila. Da bi se utvrdilo koje tačke treba uzeti u obzir pri računanju spektralnog indeksa, urađena je sledeća analiza:

Pomoću metode najmanjih kvadrata za stepeni zakon nađena je vrednost spektralnog indeksa. Takođe, računat je korelacioni faktor  $R^2$ . Ovaj postupak je prvo urađen za sve tačke. Zatim, jedna po jedna, počev od najmanje energije, tačke su izostavljane iz računa. Rezultati ovog postupka se nalaze u sledećoj tabeli:

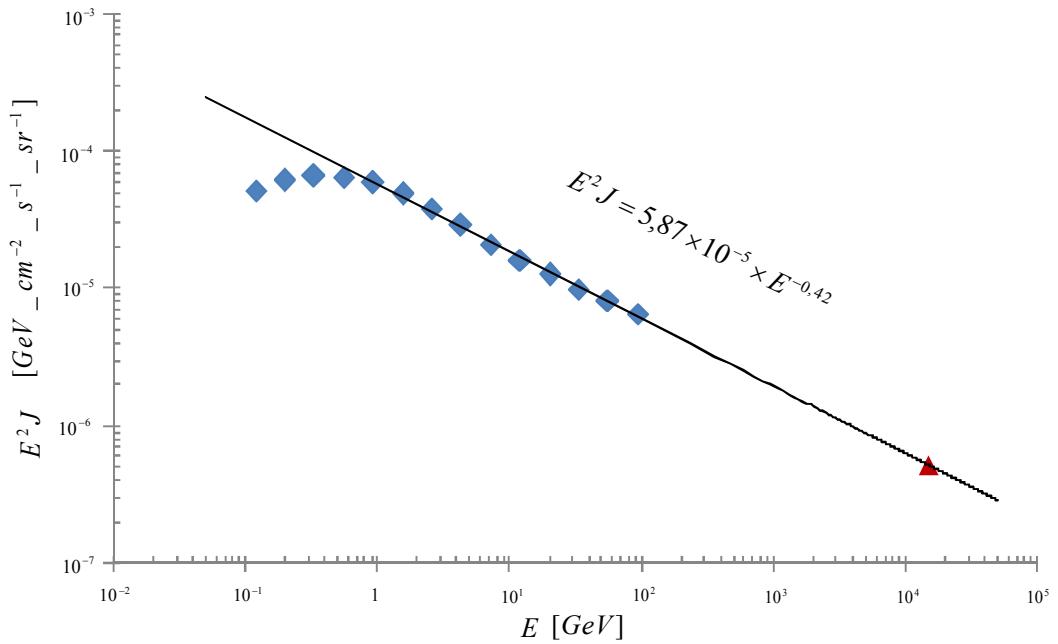
Tabela 6.

Tačke	$E[GeV]$	Spektralni indeks	$R^2$
1 - 15	$0,12 - 15 \times 10^3$	2,43	0,9985
2 - 15	$0,20 - 15 \times 10^3$	2,45	0,9993
3 - 15	$0,33 - 15 \times 10^3$	2,47	0,9997
4 - 15	$0,56 - 15 \times 10^3$	2,49	0,9999
5 - 15	$0,93 - 15 \times 10^3$	2,49	1,0000
6 - 15	$1,55 - 15 \times 10^3$	2,50	1,0000
7 - 15	$2,61 - 15 \times 10^3$	2,49	1,0000
8 - 15	$4,35 - 15 \times 10^3$	2,49	1,0000
9 - 15	$7,24 - 15 \times 10^3$	2,49	1,0000
10 - 15	$12,2 - 15 \times 10^3$	2,49	1,0000
11 - 15	$20,3 - 15 \times 10^3$	2,49	1,0000
12 - 15	$33,8 - 15 \times 10^3$	2,49	1,0000
13 - 15	$56,3 - 15 \times 10^3$	2,50	1,0000
14 - 15	$94,8 - 15 \times 10^3$	2,51	1

U kolonama su sledeće vrednosti:

1. Redni broj tačaka koje su uzete u račun;
2. Interval energije koje date tačke zahvataju;
3. Spektralni indeks (nagib) izračunat metodom najmanjih kvadrata za stepeni zakon;
4. Konzistencija tačaka prikazana kroz korelacioni faktor  $R^2$ .

Može se primetiti da sa isključenjem početnih tačaka iz računa nagib teži vrednosti 2,49. Takođe, korelacioni faktor  $R^2$  teži broju 1 kako se nagib približava vrednosti 2,49. Ovi rezultati se potpuno slažu sa teorijom da nagib spektra difuznog  $\gamma$ -zračenja teži određenoj vrednosti sa povećanjem energije. Da bi se ovo jasno uočilo na grafiku, gustina fluksa je pomnožena sa kvadratom energije i prikazana u funkciji od energije. Ova korekcija povećava nagib bilo koje linearne krive sa prethodnog grafika za faktor 2.



Grafik 2. Gustina fluksa pomnožena kvadratom energije u zavisnosti od energije.

Na grafiku 2 se mogu jasno uočiti tačke koje odstupaju od spomenutog pravila. To su četiri tačke na najnižim energijama. Kriva na grafiku 2 odgovara 5. redu u tabeli 6, tj. dobijena je metodom najmanjih kvadrata za stepeni zakon koristeći tačke rednih brojeva od 5 do 15. Jednačina krive je data na grafiku. Stepen u jednačini iznosi 0,42 zato što je gustina fluksa pomnožena kvadratom energije. Odgovarajući spektralni indeks iznosi 2,42.

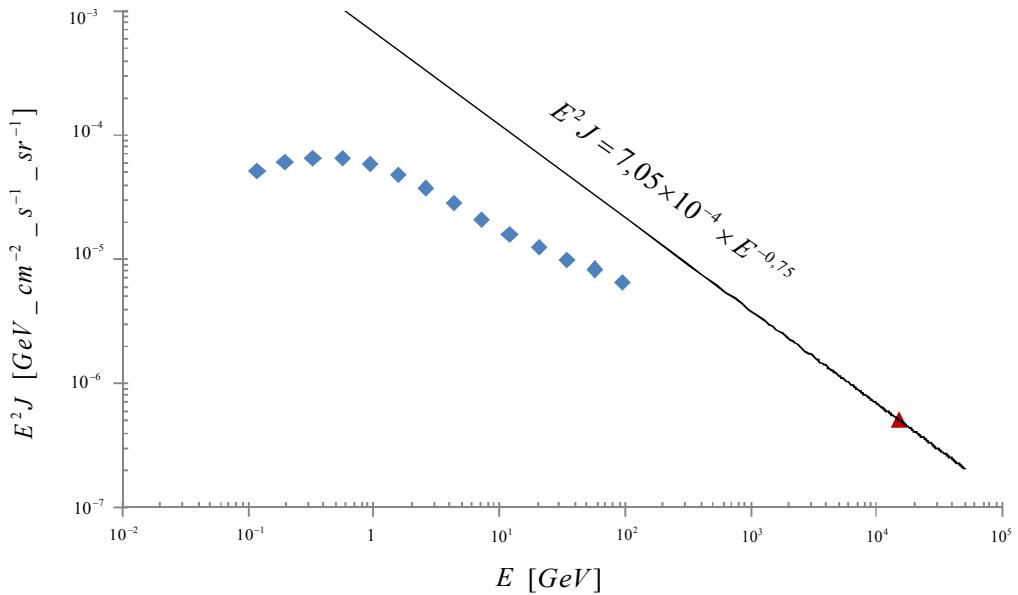
Sada je pretpostavljeni da je spektar kosmičkih zraka  $\alpha = 2,75$  što odgovara izmerenoj vrednosti u Sunčevom sistemu. Merenje *Milagro* detektora se nalazi na energiji od 15 TeV. Na toj energiji ideo pionskog zračenja sigurno dominira i nagib spektra mu se sigurno poklapa sa  $\alpha$ . Dakle, kroz tačku *Milagro* merenja je povučena kriva sa nagibom -2,75 (-0,75 kada se gustina fluksa pomnoži kvadratom energije) i posmatrana su njena odstupanja od *Fermi-LAT* podataka:

Tabela 7.

$E$	$E^2 J$	$E^2 J = 7,05 \times 10^{-4} \times E^{-0,75}$	Odnos
[GeV]	[GeV cm $^{-2}$ s $^{-1}$ sr $^{-1}$ ]	[GeV cm $^{-2}$ s $^{-1}$ sr $^{-1}$ ]	
0,12	$5,22 \times 10^{-5}$	$3,46 \times 10^{-3}$	66,3
0,20	$6,18 \times 10^{-5}$	$2,36 \times 10^{-3}$	38,2
0,33	$6,65 \times 10^{-5}$	$1,61 \times 10^{-3}$	24,2
0,56	$6,57 \times 10^{-5}$	$1,09 \times 10^{-3}$	16,6
0,93	$5,91 \times 10^{-5}$	$7,43 \times 10^{-4}$	12,5
1,55	$4,91 \times 10^{-5}$	$5,07 \times 10^{-4}$	10,3
2,61	$3,85 \times 10^{-5}$	$3,43 \times 10^{-4}$	8,90
4,35	$2,92 \times 10^{-5}$	$2,34 \times 10^{-4}$	8,02
7,24	$2,13 \times 10^{-5}$	$1,60 \times 10^{-4}$	7,50
12,2	$1,63 \times 10^{-5}$	$1,08 \times 10^{-4}$	6,63
20,3	$1,28 \times 10^{-5}$	$7,37 \times 10^{-5}$	5,76
33,8	$9,92 \times 10^{-6}$	$5,03 \times 10^{-5}$	5,07
56,3	$8,27 \times 10^{-6}$	$3,43 \times 10^{-5}$	4,15
94,8	$6,57 \times 10^{-6}$	$2,32 \times 10^{-5}$	3,53
<b>15,0 × 10<sup>3</sup></b>	<b><math>5,20 \times 10^{-7}</math></b>	<b><math>5,20 \times 10^{-7}</math></b>	<b>1</b>

U kolonama su sledeće vrednosti:

1. Energija;
2. Gustina fluksa pomnožena kvadratom energije, *Fermi-LAT* i *Milagro*;
3. Gustina fluksa pomnožena kvadratom energije sa nagibom -0,75 (spektralni nagib 2,75) i koeficijentom  $7,05 \times 10^{-4}$  (kako bi prolazio kroz *Milagro* tačku);
4. Odnos vrednosti iz 3. i 2. kolone.



Grafik 3.

Može se primetiti da je ostupanje najmanje za 14. tačku (najveća energija) i da raste kako se ide ka poslednjoj vrednosti (najmanja energija), što je i bilo za očekivati. Tačke *Fermi-LAT* mnogo odstupaju od prepostavljenog nagiba  $\alpha = 2,75$ .

## **6. Zaključak**

Teleskop *Fermi-LAT* je merio difuzno  $\gamma$ -zračenje na GeV energijama a detektor *Mialgro* na TeV energijama. Nijedan eksperiment nije registrovao „višak“ zračenja u odnosu na optimizovan *GALPROP* model. U ovom radu su upoređena oba merenja tako što je fitovana teorijska zavisnost gustine zračenja od energije. Rezultati fitovanja su pokazali da su obe vrednosti veoma konzistentne. Ova činjenica vodi ka zaključku da je optimizovan *GALPROP* model dobar za opisivanje spektra difuznog  $\gamma$ -zračenja, i ako postoje odstupanja, ona su usled postojanja nerazlučenih izvora  $\gamma$ -zračenja.

Poređenjem merenja *Fermi-LAT* i *Milagro* tima, dobija se spektralni indeks  $\alpha = 2,49$ .

Izmeren spektralni indeks u Sunčevom sistemu iznosi  $\alpha = 2,75$ . Kada se sa datim indeksom uporede merenja dobija se veliko odstupanje. Ovo dovodi do zaključka da indeks sa nagibom  $\alpha = 2,75$  važi samo u blizini Sunčevog sistema a ne i širom galaksije. Takođe, do ovog zaključka su došli *Fermi-LAT* tim [4] i *Milagro* tim [3].

Tokom analize su korišćeni nepotpuni podaci. Odredene vrednosti su očitavane sa grafika dok su druge dobijane iz dostupnih tabela. Sigurno bi bilo mnogo tačnije uzeti izvorene podatke od *Fermi-LAT* i *Milagro* tima. Nažalost, to bi zahtevalo obiman rad sa programiranjem s obzirom da se podaci čuvaju u nekomercijalnim formatima. U svakom slučaju, pojednostavljenja analiza je pokazala da se rezultati oba eksperimenta dobro slažu i da se spektralni indeks izmeren u Sunčevom sistemu ne može koristiti kao univerzalni. Prostor za detaljniji rad sa izvornim podacima je ostavljen za budući mater rad.

## Literatura

- [1] Tijana Prodanović, Brian D. Fields, John F. Beacom, *Diffuse gamma rays from the Galactic Plane: Probing the ‘‘GeV excess’’ and identifying the ‘‘TeV excess’’*, Astroparticle Physics, Volume 27, Issue 1, February 2007, Pages 10-20;
- [2] Danica Drašković, *Difuzno galaktičko gama-zračenje na TeV energijama*, Diplomski rad, Prirodno-matematički fakultet u Novom Sadu, 2010;
- [3] Milagro Collaboration, *A MEASUREMENT OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF DIFFUSE TeV GAMMA-RAY EMISSION FROM THE GALACTIC PLANE WITH MILAGRO*, The Astrophysical Journal, 688:1078Y1083, 2008 December 1;
- [4] Fermi-LAT Collaboration, *Fermi-LAT Observations of the Diffuse  $\gamma$ -ray Emission: Implications for Cosmic Rays and the Interstellar Medium*, arXiv:1202.4039v2 [astro-ph.HE] 21 Feb 2012;
- [5] <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/egret/>;
- [6] <http://www-glast.stanford.edu/pictures.html>;
- [7] <http://www.lanl.gov/milagro/>;
- [8] <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2000/20/image/a/>;
- [9] <http://umdgrb.umd.edu/cosmic/milagro.html>;
- [10] [http://www.auger.org/cosmic\\_rays/](http://www.auger.org/cosmic_rays/).

## **Biografija**



Miloš Kovačević je rođen 05. 06. 1985. godine u Novom Sadu. Završio je osnovnu školu „Jovan Popović“ i prirodni smer gimnazije „Isidora Sekulić“ u Novom Sadu. Upisao je Prirodno-matematički fakultet u Novom Sadu na Departmanu za fiziku, smer astrofizika 2007. godine.

**Univerzitet u Novom Sadu**  
**Prirodno-matematički fakultet**  
**Ključna dokumentacijska informacija**

Redni broj:

RDB

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije: Monografska

TD

Tip zapisa: Tekstualni štampani materijal

TZ

Vrsta rada: Završni (diplomski) rad

VR

Autor: Miloš Kovačević

AU

Mentor: dr Tijana Prodanović

MN

Naslov rada: Analiza gama-zračenja iz Mlečnog Puta u oblastu GeV-TeV energija

NR

Jezik (i pismo) publikacije: Srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda: Srpski/Engleski

JI

Zemlja publikovanja: Srbija

ZP

Uže geografsko područje: Vojvodina

UGP

Godina: 2012.

Izdavač: Autorski reprint  
IZ

Mesto i adresa: Novi Sad, Departman za Fiziku, PMF, Trg Dositeja Obradovića 4  
MA

Fizički opis rada: Poglavlja (6), str. (26), tabela (7), slika (13), lit. navoda (10)  
FO

Naučna oblast: Fizika  
NO

Naučna disciplina: Astrofizika  
ND

Ključne reči: Difuzno gama-zračenje, Mlečni Put, *Fermi-LAT*, *Milagro*  
KR

Univerzalna decimalna klasifikacija:  
UDK

Čuva se: Biblioteka Departmana za fiziku, PMF, Novi Sad  
ČU

Važna napomena:  
BN

Izvod:  
IZ

Uvod o kosmičkom i difuznom gama-zračenju. Opis *Fermi-LAT* teleskopa i *Milagro* detektora. Opis dostupnih podataka sa spomenutih instrumenata. Opis i prikaz skaliranja galaktičke latitude i longitude. Upoređivanje merenja oba instrumenta sa teorijskim modelom.

Datum prihvatanja teme od strane NN veća: 2012.  
DP

Datum odbrane: 25.09.2012.  
DO

Članovi komisije:  
KO

Predsednik: dr Agneš Kapor, redovni profesor, PMF Novi Sad  
Mentor: dr Tijana Prodanović, vanredni profesor, PMF Novi Sad  
Član: dr Dušan Mrđa, vanredni profesor, PMF Novi Sad

**University of Novi Sad**

**Faculty of Sciences**

**Keywords Documentation**

Accessio number:

ANO

Identification number:

INO

Document type: Monograph type

DT

Type of record: Printed text

TR

Contents code: Thesis after 4 years

CC

Author: Miloš Kovačević

AU

Mentor: Dr. Tijana Prodanović

MN

Title: Analysis of Diffuse Gamma Rays from Milky Way in GeV-TeV band

TL

Language of text: Serbian

LT

Language of abstract: Serbian/English

LA

Country of publication: Serbia

CP

Locality of publication: Vojvodina

LP

Publication year: 2012.

PY

Publisher: Author's reprint

PU

Publ. Place: Novi Sad, Department of Physics, Faculty of Sciences, Trg Dositeja Obradovića 2

Physical description: chapters (6), pages (26), tables (7), figures (13), references (10)  
PD

Scientific field: Physics

SF

Scientific discipline: Astrophysics

SD

Key words: gamma radiation, Milky Way, *Fermi-LAT*, *Milagro*

KW

Universal decimal classification:

UDC

Holding data: The Library of Dept. of Physics, Faculty of Sciences, University of Novi Sad,  
Trg Dositeja Obradovića 2, 21000 Novi Sad, Serbia

HD

Note:

N

Abstract:

AB

Description of cosmic rays and diffuse gamma rays. Description of *Fermi-LAT* telescope and *Milagro* detector. Description of available data from these two instruments. Description of data transformation due to scaling of galactic coordinates. Description of comparing two measurements with computer model.

Accepted by Scientific Board on: 2012.

ASB

Defended: 25. 09. 2012.

DE

Thesis defend board:

DB

President: Dr. Agneš Kapor, Full Professor, Faculty of Sciences, University of Novi Sad

Supervisor: Dr. Tijana Prodanović, Assistant Professor, Faculty of Sciences, Univ. of N.S.

Member: Dr. Dušan Mrđa, Assistant Professor, Faculty of Sciences, University of Novi Sad