

Problem difuznog gama-zračenja Mlečnog puta

Master rad



Student: Miloš Kovačević
Mentor: dr Tijana Prodanović

Univerzitet u
Novom Sadu

Prirodno-
matematički
fakultet

Departman za fiziku



Novi Sad, 2013

Problem difuznog gama-zračenja Mlečnog puta

Predgovor

Ovaj rad se nastavlja na niz radova koji se bave difuznim γ -zračenjem iz Mlečnog puta. Dr Tijana Prodanović, mentor ovog rada, je sa kolegama 2006. godine objavila rad na temu difuznog γ -zračenja. Rad se zasnivao pretežno na merenjima dva nezavisna eksperimenta, EGRET (*Energetic Gamma Ray Experiment Telescope*) i Milagro, koji su merili difuzno γ -zračenje u različitim energijskim opsezima (GeV i TeV respektivno). Na osnovu podataka se moglo zaključiti da postoji višak zračenja u odnosu na teorijske modele kako na GeV, tako i na TeV energijama^[1].

Zatim je 2010. godine Danica Drašković, s dr Tijanom Prodanović kao mentorom, odbranila diplomski rad na ovu temu. U radu su predstavljeni novi rezultati dobijeni od eksperimenta Milagro koji je u međuvremenu tehnički i analitički poboljšan. Analiza, urađena pomoću novih i preciznijih rezultata, je pokazala da i dalje postoji višak zračenja na TeV energijama^[2].

Godine 2012. sam, s dr Tijanom Prodanović kao mentorom, odbranio diplomski rad na istu temu. Ovog puta su precizniji podaci došli sa novog detektora Fermi-LAT (*Fermi Large Area Telescope*) koji je zamenio detektor EGRET u GeV opsegu. Tim koji vodi Fermi-LAT misiju je sa velikom sigurnošću objavio da ne postoji višak zračenja u GeV domenu i tu je relativno stavljena tačka na pitanje difuznog γ -zračenja za GeV domen^[3]. U diplomskom radu su Fermi-LAT podaci uzeti kao oslonac i pokušala se utvrditi konzistentnost Milagro podataka sa Fermi-LAT podacima, konkretno, da li se spektar difuznog γ -zračenja može opisati jednim spektralnim indekom kroz GeV-TeV opseg. Analiza je pokazala da može i to sa velikom sigurnošću. Međutim, urađena analiza nije bila kompletna. Podaci su se očitavali sa grafika u PDF radovima i nije se vodilo računa o doprinosu tačkastih izvora. Detaljnija i ozbiljnija analiza je ostavljena za master rad.

Detektor HAWK (*High-Altitude Water Cherenkov Observatory*) će u budućnosti zameniti Milagro detektor na TeV energijama i daće nove i preciznije rezultate. To će biti prilika za novi rad koji će biti najnoviji u nizu radova, pod mentorstvom dr Tijane Prodanović, objavljenih na temu difuznog γ -zračenja.

Novi Sad, 02.07.2013.

Miloš Kovačević

Problem difuznog gama-zračenja Mlečnog puta

Sadržaj

1.	Uvod	7
2.	Difuzno γ -zračenje.....	10
2.1	Kosmički zraci.....	10
2.2	Nastanak difuznog γ -zračenja.....	12
2.3	Spektar i intenzitet difuznog γ -zračenja	13
3.	Fermi-LAT	14
4.	IACT detektori	16
5.	Milagro	18
6.	Cilj rada	20
7.	Izbor regionala	21
8.	Fermi-LAT podaci	22
9.	Milagro podaci	28
10.	TeVCat izvori	29
11.	Difuzno gama-zračenje u GeV-TeV opsegu.....	33
12.	Rezultati	36
13.	Zaključak.....	38
	Literatura.....	39

Problem difuznog gama-zračenja Mlečnog puta

1. Uvod

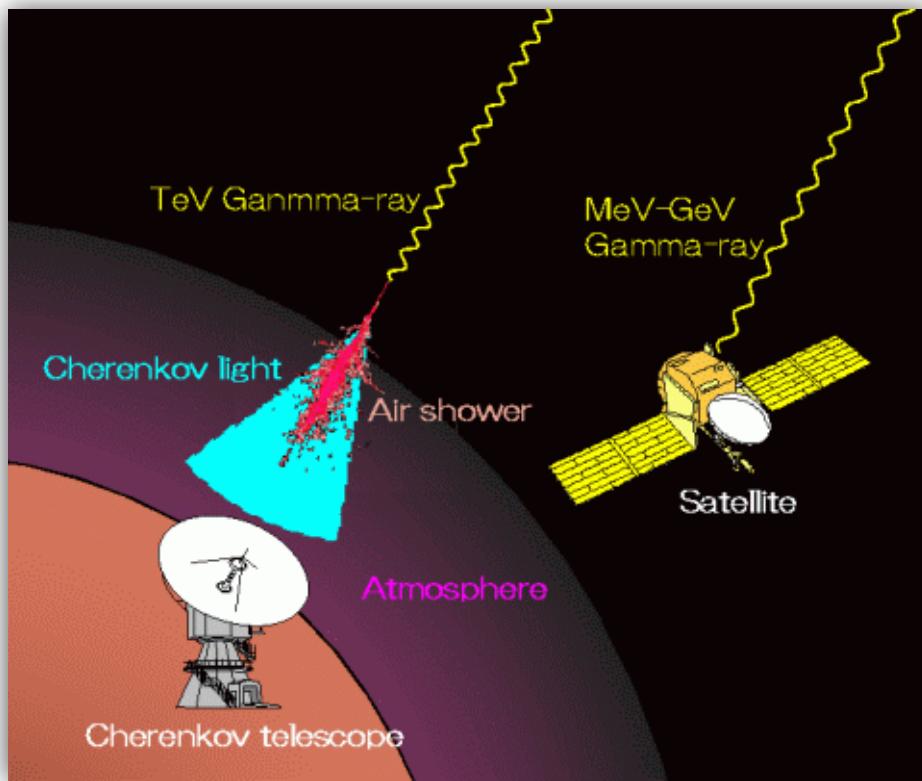
Posmatranje svemira u γ -opsegu elektromagnetskog spektra je novija astronomска disciplina. Obuhvaćen energijski opseg je veoma velik i kreće se od MeV energija pa, preko GeV i TeV, sve do PeV energija. S obzirom na velike energije γ -fotona tehnike posmatranja se dosta razlikuju od posmatračkih tehnika klasične astronomije i poseduju mnogo dodirnih tačaka sa nuklearnom fizikom. Gama-astronomija prevazilazi i nuklearnu fiziku u tom smislu što γ -zračenje u nuklearnoj fizici nema energiju veću od 10 MeV. Astronomski γ -detektori se mogu podeliti na one koji se nalaze u svemiru i one koji se nalaze na zemlji.

Svemirski γ -detektori su standardni detektori γ -zračenja koji su postavljeni na satelite u orbiti Zemlje. Njihov energijski opseg obuhvata MeV i GeV energije. Za detektovanje fotona većih energija detektori bi morali imati mnogo veću aktivnu zapreminu (zapremina u kojoj foton interaguje sa materijalom detektora) a samim tim i masu. Svaki dodatni kilogram koji satelit mora poneti predstavlja veliki problem, kako tehnički tako i finansijski.

Detektori na zemlji ne mogu meriti direktno svemirsko γ -zračenje s obzirom da γ -foton iz svemira interaguje sa atomima u atmosferi i ne dopire do površine Zemlje. Međutim, foton prilikom interakcije stvaraju kišu čestica elektrona i pozitrona (e^- i e^+). Ove čestice zatim proizvode Čerenkovljevo zračenje (Čerenkovljevo zračenje nastaje kada se nanelektrisana čestica kreće brzinom većom od brzine prostiranja elektromagnetnih talasa za određeni medijum) koje detektori na zemlji posmatraju, i na osnovu tog zračenja rekonstruišu energiju i upadni pravac γ -fotona iz svemira. Sama činjenica da e^- i e^+ proizvode Čerenkovljevo zračenje u atmosferi (indeks prelamanja je veoma blizu broja 1) govori da se kreću brzinama veoma bliskim brzini svetlosti, što dalje govori o tome koliko inicialni foton ima ogromnu energiju. Zbog toga detektori na zemlji mere u opsegu TeV i PeV (češće TeV) energija jer slabiji fotoni ne stvaraju dovoljno sekundarnih čestica za dobru statistiku (slika 4.2).

Gama-zračenje koje dolazi iz pravca ravni Mlečnog puta se sastoji iz tri komponente:

- Difuzno;
- Tačkasti izvori;
- Vangalaktičko.

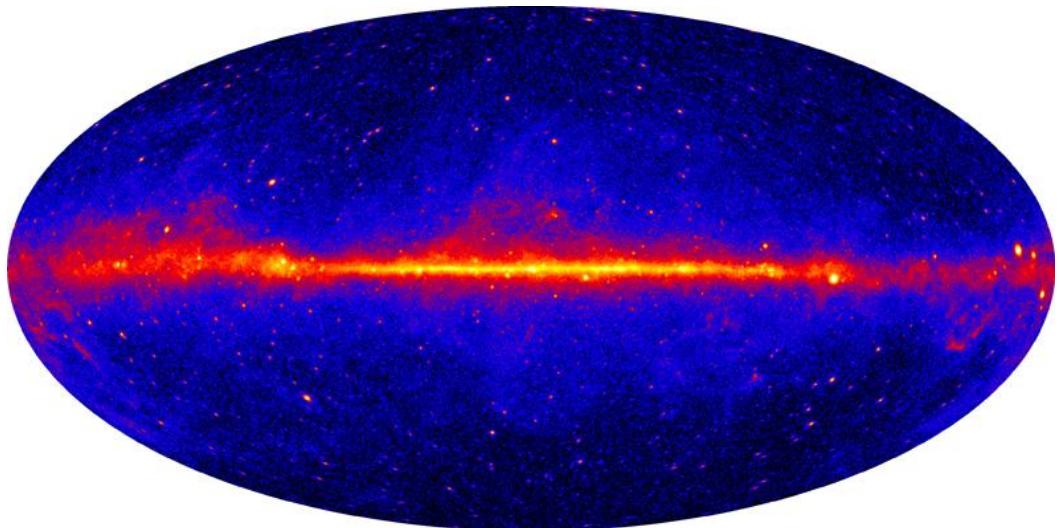


Slika 1.1 Energijski opseg merenja svemirskih detektoru i detektoru na zemlji.

Difuzno γ -zračenje nastaje u samom Mlečnom putu kao posledica interakcije kosmičkih zraka sa međuzvezdanom sredinom (ISM, *Interstellar Medium*). S obzirom da ISM-a ima najviše u galaktičkoj ravni, difuzno zračenje će tu biti izraženije. Dalje, kosmički zraci i ISM su kontinualno raspoređeni, stoga će difuzno zračenje dolaziti iz svih pravaca ravni Mlečnog puta, tj. biće difuzno. Ovo zračenje najviše doprinosi γ -zračenju iz pravca ravni Mlečnog puta.

Tačkasti izvori γ -zračenja su diskretni i, kao što ime kaže, „vide“ se kao tačke na nebu. Tačkasti izvori koji leže u pravcu ravni Mlečnog Puta se mogu nalaziti u njemu ili iza njega. Izvori unutar Mlečnog puta mogu biti: γ -pulsari, magline oko pulsara (PWN, *Pulsar Wind Nebula*), ostaci supernovih (SNR, *Supernova Remnants*), džinovski molekularni oblaci, itd. Izvori van Mlečnog puta su uglavnom aktivna galaktička jezgra (AGN, *Active Galactic Nucleus*). Tačkasti izvori zrače intenzivnije od okolnog difuznog zračenja (u suprotnom se ne bi razaznali) ali ispunjavaju mnogo manji prostorni ugao u odnosu na difuzno zračenje koje se prostire duž cele ravni Mlečnog puta, tako da difuzno zračenje ipak dominira.

Vangalaktičko zračenje je difuzno zračenje koje dolazi van Mlečnog puta. Ono se sastoji iz difuznih i tačkastih komponenata drugih galaksija i nerazlučenih AGN-ova. O njegovoj raspodeli se ne zna mnogo ali se uzima da je izotropna^[3]. To znači da će deo dolaziti i iz pravca ravni Mlečnog Puta. Ovo zračenje je mnogo slabije od prethodna dva.



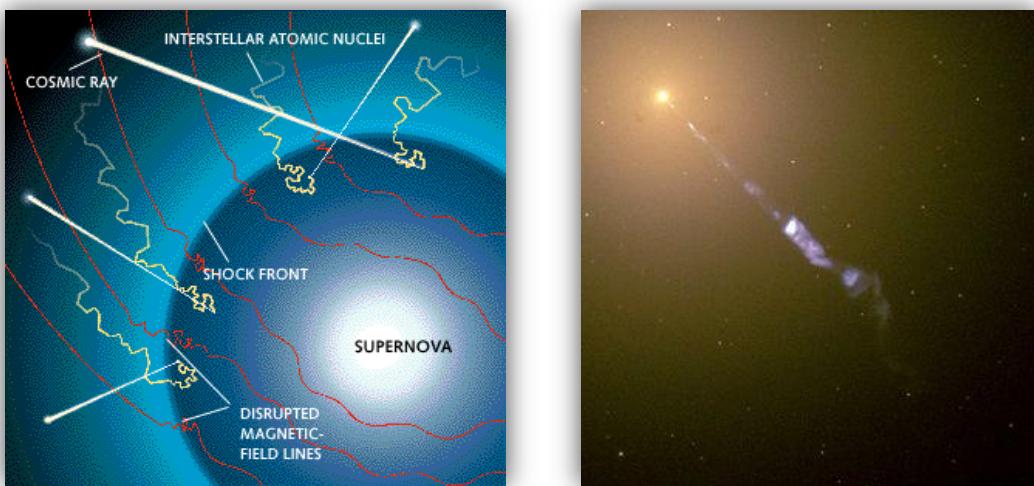
Slika 1.2 Mapa γ -zračenja celog neba na energiji oko 1 GeV. Difuzno γ -zračenje je zastupljeno duž ravni Mlečnog puta. Tačkasti izvori su prisutni u i van ravni Mlečnog Puta. Vangalaktičko zračenje je izotropno i ne izdvaja se na slici^[4].

Iako svi detektori mogu posmatrati sve tri komponente γ -zračenja, svaki detektor je osetljiviji na određenu komponentu. Najprecizniji podaci za sve tri komponente γ -zračenja u GeV opsegu dolaze od Fermi-LAT (*Fermi Large Area Telescope*) detektora koji se nalazi na satelitu lansiranom 2008. godine (još uvek je u upotrebi). Najtačniji podaci vezani za difuznu i vangalaktičku komponentu u TeV opsegu dolaze sa Milagro detektora koji je sakupljao podatke od 2000. do 2008. godine. Detektori HESS (*High Energy Stereoscopic System*), MAGIC (Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov Telescopes), VERITAS (*Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System*) i dr. daju najpreciznije podatke o tačkastim izvorima u TeV domenu. Iako su ovi detektori slični sa Milagro detektorm, u smislu da su zemljinog tipa i da posmatraju u TeV domenu, Milagro detektor je suštinski drugačiji i to mu omogućava da posmatra difuzno zračenje sa značajnom preciznošću za razliku od ostalih. O Milagro detektoru će biti više reči u nastavku teksta.

2. Difuzno γ -zračenje

2.1 Kosmički zraci

Difuzno γ -zračenje je posledica interakcije kosmičkih zraka i ISM-a. Kosmički zraci su nanelektrisane čestice veoma velikih energija. Čine ih protoni (86%), α -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 u udarnim talasima (supernova na primer). Udarni talas prolazi kroz ISM i stvara deformacije u magnetnom polju galaksije. Ove deformacije magnetnog polja utiču na nanelektrisane čestice tako što ih ubrzavaju kroz proces nazvan *diffusive shock acceleration*.



Slika 2.1 Levo: Ubrzanje čestica u supernovi. Desno: Mlaz čestica iz AGN-a M87 viđen kroz optički filter.

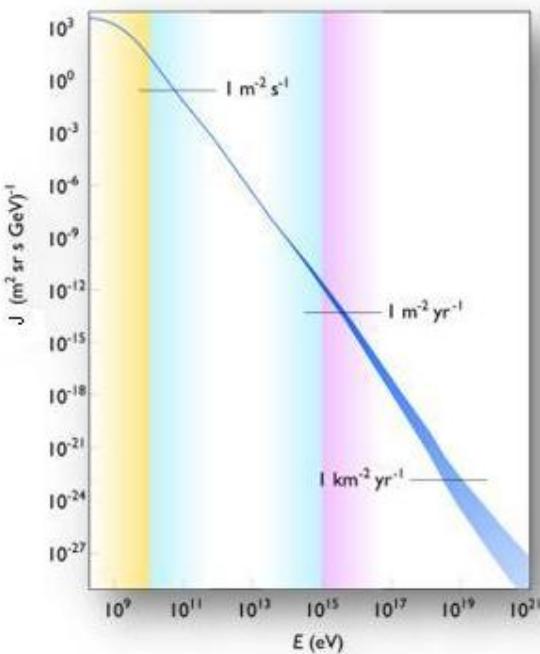
Međutim, ovim putem se čestice mogu najviše ubrzati do 10^{15} - 10^{17} eV u zavisnosti od atomskog jezgra, a kosmički zraci mogu imati energije i do 10^{21} eV. Smatra se da najenergičniji kosmički zraci nastaju u AGN-ovima. To su galaktička jezgra koja poseduju veoma masivnu crnu rupu. U nju se „sliva“ materijal galaktičkog jezgra i pri tome čestice, još uvek nepoznatim procesom, dobijaju ogromnu energiju.

Mereni spektar kosmičkog zračenja se može predstaviti stepenim zakonom:

$$F_E \equiv \frac{dF}{dE} = k \times E^{-\alpha}, \quad (1)$$

gde je diferencijalni fluks F_E , energija je E a spektralni indeks je α .

Kada se predstavi u logaritamskoj skali, zavisnost će biti skoro linearna (α je nagib krive).



Slika 2.2 Spektar kosmičkog zračenja.

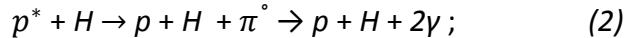
Može se primetiti da kriva dva puta menja nagib, jednom na $\sim 10^{15}$ eV i drugi put na $\sim 10^{19}$ eV. Koeficijent nagiba do 10^{15} eV iznosi $\alpha = 2,75$, zatim, od 10^{15} eV do 10^{19} eV iznosi $\alpha = -3,1$ a nakon 10^{19} eV $\alpha = (-1, -2)$. Mora se uzeti u obzir da dati indeksi važe za Sunčev sistem s obzirom da su tu izmereni. Postoji mogućnost da imaju različite vrednosti u drugim delovima galaksije.

Kosmički zraci su nanelektrisane čestice i 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 pretpostavlja da su došle iz AGN-ova zato što postoji korelacija upadnih putanja sa lokacijama poznatih AGN-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 γ -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 γ -fotona:



- Interakcija elektrona sa međvezdanim zračenjem i kosmičkim mikrotalasnim pozadinskim zračenjem. Ovim procesom elektroni predaju svoju energiju optičkim i mikrotalasnim fotonima koji onda postaju γ -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 „isijavaju“ γ -foton (bremštralung):



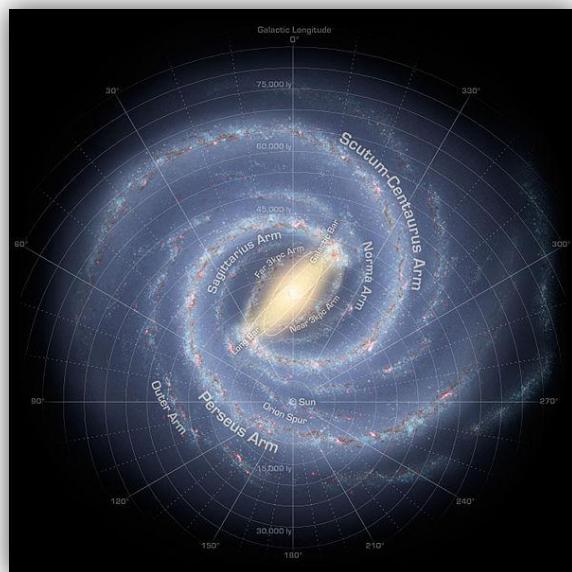
Gas je najzastupljeniji u galaktičkoj ravni, stoga će difuzno γ -zračenje najviše poticati iz ovog dela galaksije. S obzirom da su kosmički zraci i gas kontinualno rasprostranjeni, nastalo γ -zračenje će imati difuzan karakter.

Kosmički zraci odgovorni za nastanak difuznog γ -zračenja, koje se analizira u ovom radu (GeV-TeV energije), pripadaju prvom delu spektra (slika 2.2) kosmičkog zračenja čiji je spektralni indeks $\alpha = 2,75$ (Sunčev sistem).

2.3 Spektar i intenzitet difuznog γ -zračenja

Spektar zračenja nastalog raspadom piona bi trebalo da poseduje simetričan izgled na logaritamskoj skali. Vrh bi se nalazio na energiji oko $0,07 \text{ GeV}$ (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 asimptotski da teži nagibu kosmičkog zračenja α . Takođe, na višim energijama komponenta nastala usled raspada piona bi trebalo da dominira u odnosu na druge dve komponente. To znači da bi spektar difuznog γ -zračenja na većim energijama trebalo da ima konstantan nagib (na logaritamskoj skali) koji je jednak spektralnom indeksu kosmičkog zračenja (prvi spektralni indeks, slika 2.2).

Veća količina ISM-a duž nekog pravca posmatranja će dovesti do većeg intenziteta difuznog γ -zračenja duž tog pravca posmatranja. Jasno je da će zračenje biti najintenzivnije duž ravni Mlečnog Puta (galaktička latituda $b \approx 0$) ali će takođe varirati duž te ravni jer količina ISM-a varira (slika 2.3). Zračenje će biti najintenzivnije u pravcu centra Mlečnog puta (galaktička longituda $l = 0^\circ$) i opadaće, uz manje oscilacije, kako se krećemo levo ili desno od centra.



Slika 2.3 Mlečni Put viđen od "gore". Galaktička ravan odgovara galaktičkoj latitudi $b \approx 0$, dok galaktična longituda opisuje pravac posmatranja duž ravni Mlečnog puta.

3. Fermi-LAT

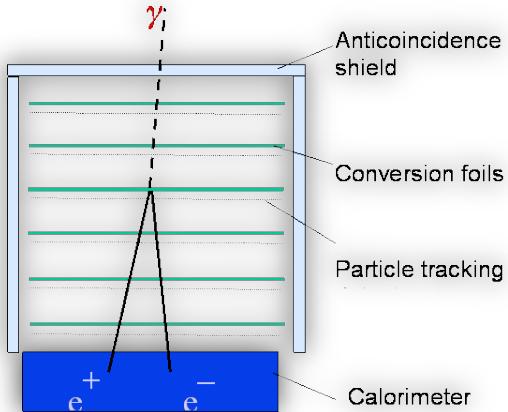
Detektor Fermi-LAT (*Fermi Large Area Telescope*), bivši naziv GLAST, (*Gamma-Ray Large Area Space Telescope*), je montiran na satelit (slika 3.1) koji je lansiran u junu 2008. godine (još uvek je u upotrebi). Njegova uloga je da meri γ -zračenje koje dolazi iz svemira. Energijski opseg mu se kreće od 20 MeV pa sve do 300 GeV. Zahvata vidno polje od 2 sr (20% celog neba) i, orbitirajući oko Zemlje i promenom pravca posmatranja, „pređe“ celokupno nebo za 3 sata. Dakle, za razliku od klasičnih teleskopa koji se upere u jedan deo neba kako bi posmatrali neki fenomen, Fermi-LAT kontinualno posmatra celo nebo i vremenom se statistika poboljšava kako se detektuje sve veći broj fotona (slika 3.3) [5].



Slika 3.1 Ilustracija satelita u orbiti.

Fermi-LAT je zapravo detektor γ -zračenja sličan onim koji se koriste u nuklearnoj fizici. Foton γ -zraka prolazi kroz tanke ploče napravljene od volframa koji interaguje sa datim fotonom (slika 3.2). 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 ionizuju atome. Prateći mesta ionizacije kroz različite slojeve, može se rekonstruisati putanja ovih čestica, a potom, i pravac upadnog fotona. Elektron i pozitron izgube najveći deo energije tek na

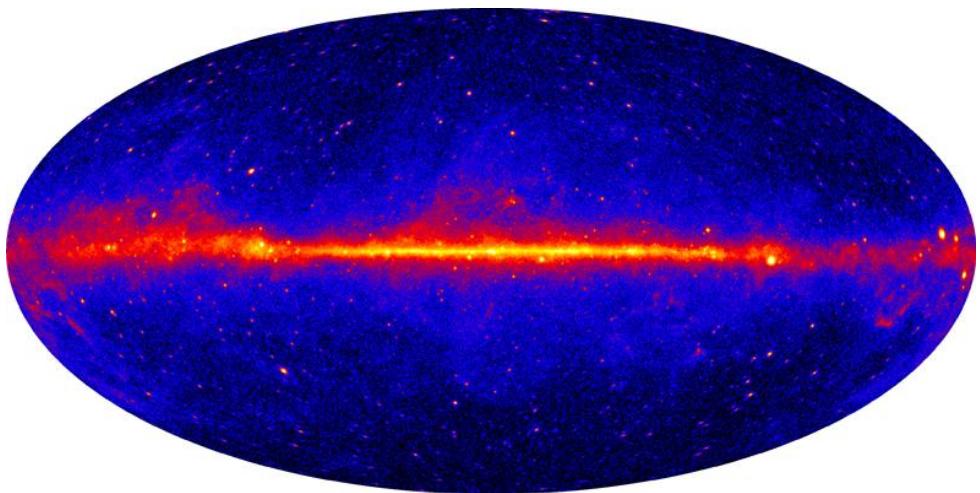
kraju kada dođu do kalorimetra gde se meri njihova energija, tj. energija fotona. Ovim postupkom se dobijaju pravac i energija upadnog fotona^[5].



Slika 3.2 Presek Fermi-LAT detektora.

Ovaj detektor poseduje sposobnost merenja diferencijalnog fluksa F_E , što znači da je u mogućnosti da meri spektar zračenja.

Fermi-LAT je do sada dao najtačnije podatke vezane za γ -zračenje iz svemira u GeV opsegu energija i prvi je svemirski detektor koji je uspeo da izmeri γ -zračenje iznad energije od 30 GeV [3].



Slika 3.3 Mapa γ -zračenja u GeV opsegu dobijena uz pomoć Fermi-LAT detektora^[4].

4. IACT detektori

Naziv stoji za *Imaging Atmospheric (or Air) Cherenkov Telescope*. Dakle, to su teleskopi koji posmatraju Čerenkovljevo zračenje nastalo u atmosferi nakon interakcije svemirskog γ -fotona sa njom (slika 4.2). Tipični predstanci ovih teleskopa su HESS, MAGIC i VERITAS (slika 4.1).

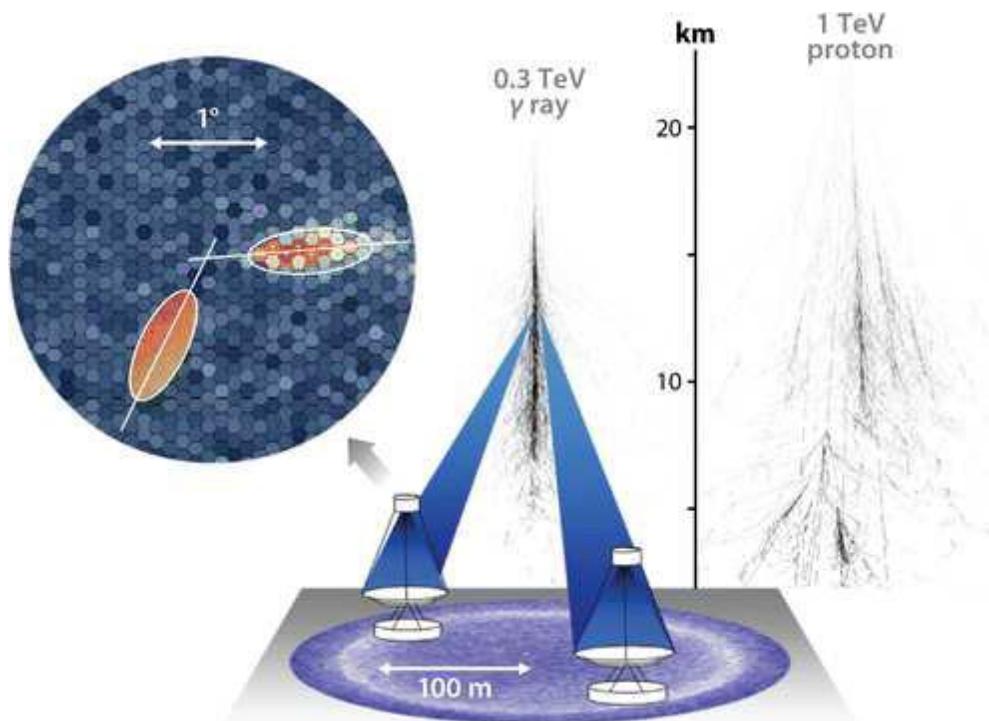


Slika 4.1 Gore: HESS. Levo: MAGIC. Desno: VERITAS.

Kao što se vidi sa slike, IACT detektori liče na klasične teleskope. Vidno polje im iznosi par stepeni i moraju biti upereni u određenu tačku na nebu kako bi posmatrali neki izvor. Spomenuto atmosfersko Čerenkovljevo zračenje je pretežno u vidljivom i UV domenu. Veoma je teško posmatrati ovo zračenje zato što je vrlo, vrlo slabo. Takođe, potrebni su idealni uslovi kako bi bilo što manje optičkih i UV fotona iz drugih izvora. Zato se ovi teleskopi postavljaju daleko od gradova (svetlosno zagađenje), na velikim nadmorskim visinama (što bliže izvoru Čerenkovljevog zračenja) i na mestima gde je vlažnost vazduha mala (vlažnost vazduha upija optičke i UV fotone).

Posmatranja se vrše samo tokom veoma vedrih noći zbog spomenutih poteškoća. Kratko vreme posmatranja smanjuje broj detektovanih fotona što povećava grešku merenja.

Iz navedenih razloga IACT detektori s velikom teškoćom detektuju γ -zračenje iz svemira i zato mogu detektovati samo tačkaste izvore dok je difuzno zračenje skoro nevidljivo za njih. Kao što je rečeno, tačkasti izvori su mnogo intenzivniji od difuznog zračenja za mali prostorni ugao (vidno polje IACT detektora). Sa druge strane, ovi detektori imaju relativno visoku rezoluciju i mogu sa velikom preciznošću locirati izvor na nebu i izdvojiti ga od okolnog difuznog zračenja. Kao što se vidi (slika 4.1), više teleskopa je povezano u jedan sistem i time se omogućuje stereo posmatranje što dodatno poboljšava rezoluciju (slika 4.2). Rezolucija teleskopa HESS, čija će se merenja najviše koristiti, iznosi oko $0,1^\circ$ [14].

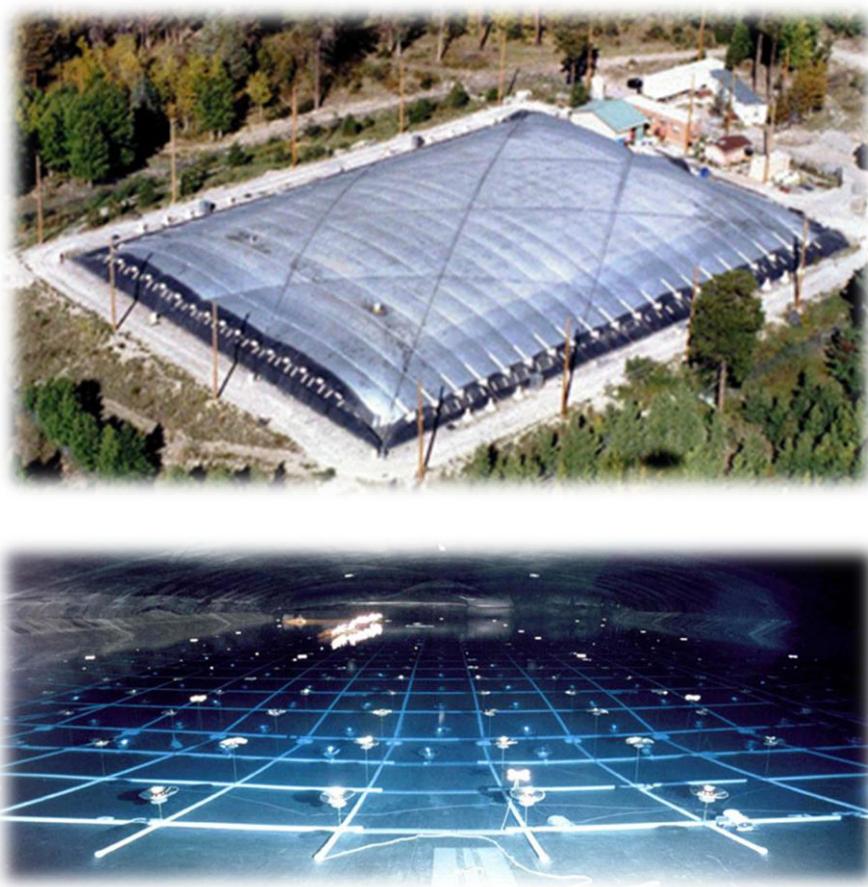


Slika 4.2 Dodatni teleskop drastično povećava preciznost. Takođe, na slici je prikazano da će foton veće energije stvoriti više sekundarnih čestica.

Kao i Fermi-LAT, ovi detektori su u mogućnosti da mere diferencijalni fluks F_E , što znači da mogu meriti spektar zračenja.

5. Milagro

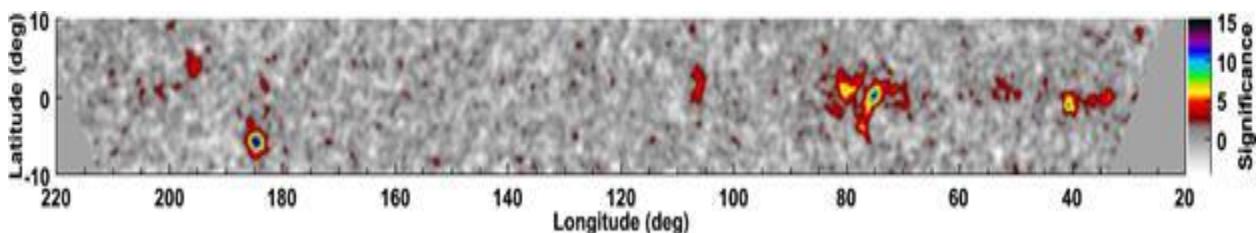
Detektor Milagro (“čudo” na španskom jeziku) se nalazi u Sjedinjenim Američkim Državama na nadmorskoj visini od oko 2500 m. On posmatra γ -zračenje na energijama reda veličine TeV. U suštini, Milagro je voden Čerenkovljev detektor sa detektorima koji se nalaze u njemu i oko njega (slika 5.1). Kada foton velike energije (reda TeV) dospe u Zemljinu atmosferu, on stvara kišu elektrona i pozitrona. Oni potom dospevaju u bazen sa vodom gde emituju Čerenkovljevo zračenje koje se registruje spomenutim detektorima (fotomultiplikatori). S obzirom da su detektori postavljeni u mrežu, mogu se rekonstruisati putanje čestica, a samim tim, i pravac iz koga je došao foton. U samom bazenu se nalaze detektori koji mere energiju čestica, tj. energiju inicijalnog fotona^[6].



Slika 5.1 Gore: Milagro spolja. Dole: Milagro unutra.

Dok IACT detektori na zemlji kao što su HESS, VERITAS i MAGIC mere Čerenkovljevo zračenje nastalo u vazduhu, Milagro meri Čerenkovljevo zračenje nastalo u bazenu sa vodom. Intenzitet ovog zračenja će zavisiti od toga koliko se indeks prelamanja sredine razlikuje od broja 1. Za vodu je indeks prelamanja oko 1,33 dok je za vazduh skoro 1. Za isti γ -foton Milagro će detektovati mnogo više Čerenkovljevog zračenja od IACT detektora. Takođe, IACT detektori zahtevaju skoro idealne vremenske uslove, tj. veoma vedre noći da bi detektovali slabo atmosfersko Čerenkovljevo zračenje, dok te pojave ne utiču na Milagro detektor koji praktično meri bez prekida. Iz navedenih razloga, Milagro detektor može meriti slabo difuzno γ -zračenje.

Po svojim karakteristikama Milagro detektor je mnogo sličniji Fermi-LAT detektoru nego IACT detektorima. Kao Fermi-LAT, ima veliko vidno polje koje "prelazi" preko neba kako se Zemlja rotira oko svoje ose (posmatra oko polovine neba za razliku od Fermi-LAT detektora koji posmatra celo nebo). Vremenom slika postaje preciznija kako se detektuje sve veći broj fotona (slika 5.2).



Slika 5.2 Gama-zračenje iz galaktičke ravni na TeV energijama^[7].

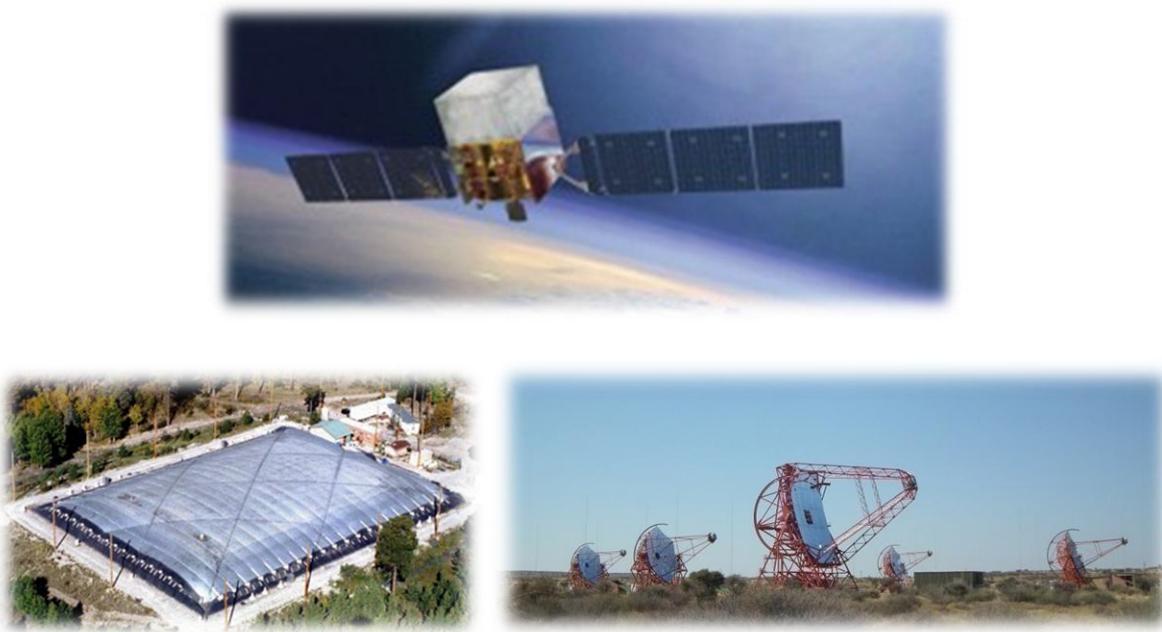
Mana Milagro detektora je loša rezolucija. To mu onemogućava da jasno razazna tačkaste izvore od difuznog zračenja. Dakle, Milagro detektor je dobar za posmatranje difuznog zračenja ali je loš za posmatranje tačkastih izvora. Rezolucija Milagro detektora iznosi oko $0,5^\circ$ ^[6] (5 puta više od HESS detektora).

Za razliku od Fermi-LAT i IACT detektora, Milagro nema mogućnost merenja energijskog spektra zato što mu je energijska rezolucija veoma loša. Da bi dobili diferencijalni fluks F_E na nekoj energiji, mora se unapred pretpostaviti spektar zračenja. Zatim se na osnovu te pretpostavke i izmerenog integralnog fluksa dobija diferencijalni fluks. Srednja energija detektovanih fotona se kreće oko 15 TeV^[6].

6. Cilj rada

Dva tipa detektora su merila (Fermi-LAT još uvek meri) difuzno γ -zračenje iz Mlečnog puta na različitim energijama. Ideja je da se te dve slike objedine i uporede sa teorijskim predviđanjima.

Energijski opseg Fermi-LAT detektora pokriva interval od 50 MeV do 300 GeV. Model difuznog zračenja je prilagođavan podacima od 63 MeV do 40 GeV, a nadalje je ekstrapoliran do 600 GeV i do 50 MeV sa druge strane [11]. U radu će se odvojeno analizirati podaci koji obuhvataju ova dva intervala i uporediti. Milagro detektor daje vrednost za jednu energiju oko 10-20 TeV (uz prethodnu pretpostavku spektra difuznog zračenja). IACT detektori, kao i Milagro, mere u TeV domenu. Oni bolje detektuju tačkaste izvore i mogu pomoći da se difuzni fluks, dobijen uz pomoć Milagro detektora, koriguje.



Slika 6.1 Fermi-LAT (gore) meri difuzno zračenje u GeV opsegu. Milagro (levo) meri difuzno zračenje u TeV opsegu. IACT detektor (desno) meri TeV tačkaste izvore.

7. Izbor regiona

Da bi se difuzno zračenje moglo porebiti za različite energije, moraju se analizirati isti delovi neba. U suprotnom razlike u intenziitetu zračenja bi postojale i zbog različite količine ISM-a duž različitih pravaca posmatranja (glava 2.3). S obzirom da je Fermi-LAT posmatrao celo nebo a Milagro deo neba, u biranju dela neba tj. regiona, poći će se prvo od Milagro podataka (tabela 7.1).

Tabela 7.1. Srednje difuzno γ -zračenje iz galaktičke ravni ($|b| < 2^\circ$) za različite intervale galaktičkih longituda l (na 12 TeV uz pretpostavku spektra kao: stepeni zakon sa stepenom -2,62). Greška u tabeli je statistička. Sistematska greška je 30%. Značaj u σ jedinicama predstavlja odnos difuznog zračenja (signala) prema vangalaktičkom pozadinskom zračenju (šum). Poslednje dve vrednosti se navode sa sigurnošću od 95%^[6, 7].

<i>Galaktička longituda</i> $ b < 2^\circ$	<i>Značaj</i> σ	<i>Diferencijalni fluks</i> ($\times 10^{-18}$) $\text{MeV}^{-1} \text{s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$
$30^\circ < l < 65^\circ$	5.6	4.1 ± 0.6
$65^\circ < l < 85^\circ$	10.5	3.8 ± 0.3
$85^\circ < l < 110^\circ$	0.4	< 1.3 (95% CL)
$136^\circ < l < 216^\circ$	0.9	< 1.4 (95% CL)

Milagro tim je podelio galaktičku ravan u 4 regiona a diferencijalni fluks je zapravo srednja vrednost za određeni region. Poslednja dva regiona su daleko od galaktičkog centra i zato im je intenzitet zračenja mali (glava 2.3) i ne odstupa mnogo od pozadinskog zračenja. Drugi region je komplikovan. U njemu se nalazi mnogo potencijalnih tačkastih i rasprostranjenih izvora TeV zračenja i, s obzirom na relativno lošu rezoluciju Milagro detektora, teško je odrediti čisto difuznu komponentu^[6]. Prvi region je pogodniji od drugog iz navedenih razloga i poseduje relativno dobar odnos difuznog zračenja naspram pozadinskog.

Dakle, izabrani deo neba će imati galaktičke koordinate $l = [30^\circ, 65^\circ]$, $b = [-2^\circ, 2^\circ]$. U daljem delu teksta reč region će se odnositi na region sa spomenutim koordinatama.

8. Fermi-LAT podaci

Gama-zračenje iz galaktičke ravni se sastoji od difuzne, tačkaste i vangalaktičke komponente (glava 1). Vangalaktička komponenta se može relativno lako odrediti posmatranjem zračenja daleko od galaktičke ravni. Uz pretpostavku da je ova komponenta izotropna, može se lako oduzeti od zračenja koje dolazi iz pravca Mlečnog puta^[3].

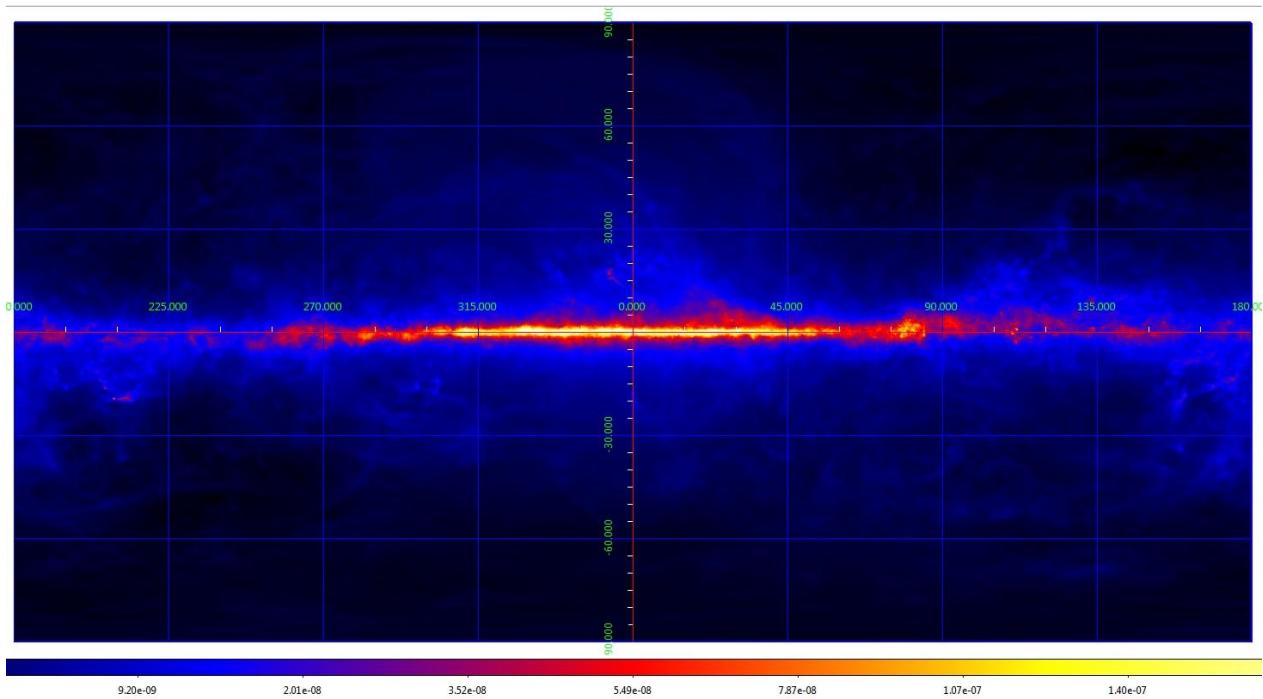
Prepoznavanje tačkastih izvora naspram difuzne komponente zahteva dobru rezoluciju detektora koju Fermi-LAT poseduje. Međutim, iz samog merenja se ne može tačno odrediti koliko zračenja pripada tačkastom izvoru a koliko difuznoj komponenti na koju izvor „naleže“. Problem je utoliko veći ukoliko tačkasti izvor nije potpuno „tačkast“ već zauzima mali ali konačan prostorni ugao. Da bi se što bolje razdvojile komponente, Fermi-LAT tim je proizveo model difuznog γ -zračenja. Na osnovu poznatih interakcija, i, raspodele ISM-a i kosmičkog zračenja duž ravni Mlečnog puta (dobijene iz drugih posmatranja), i uz pomoć kompjuterskog programa, napravljen je model. Detalji modela su kasnije prilagođavani kako bi što bolje odgovarali merenjima Fermi-LAT detektora^[3]. Dakle, Fermi-LAT model se može smatrati najtačnijom prepostavkom difuznog γ -zračenja iz Mlečnog puta (u GeV opsegu).

Model je dat u obliku FITS (*Flexible Image Transport System*) fajla i može se preuzeti sa internet stranice^[8] u okviru internet portala *Fermi Science Support Center*. Najnovija verzija modela podrazumeva najnoviju krivu osetljivosti instrumenta i fitovanje prema Fermi-LAT podacima koji su dobijeni nakon dve godine posmatranja^[9].

Ovaj model je učitan u programski jezik IDL (*Interactive Data Language*). Model je predstavljen kao 3D matrica dimenzija $2880 \times 1441 \times 30$. Prve dve dimenzije predstavljaju mapu neba (galaktička longituda l i galaktička latituda b respektivno) a treća predstavlja energiju. Tačna veza između elemenata matrice i fizičkih elemenata je data ispod:

- 1-2880 element $\leftrightarrow l = [-180^\circ, 180^\circ]$;
- 1-1441 element $\leftrightarrow b = [-90^\circ, 90^\circ]$;
- 1-30 element $\leftrightarrow E = [50 \text{ MeV}, 600 \text{ GeV}]$ (na logaritamski jednakim razmacima)^[9].

Vrednost elementa je data kao intenzitet γ -zračenja u jedinicama $\frac{\text{broj fotona}}{\text{MeV cm}^2 \text{ s sr}}$ ^[10]. Dakle, matrica se može zamisliti kao 30 mapa neba γ -zračenja na različitim energijama. Kao primer data je mapa blizu energije 1 GeV (slika 8.1).



Slika8.1. Mapa broj 10 viđena uz pomoć programa *ds9*. Galaktička longituda se proteže s leva na desno $l = [-180^\circ, 180^\circ]$, a galaktička latituda $b = [-90^\circ, 90^\circ]$ od dole ka gore. Intenzitet zračenja je prikazan u logaritamskoj skali.

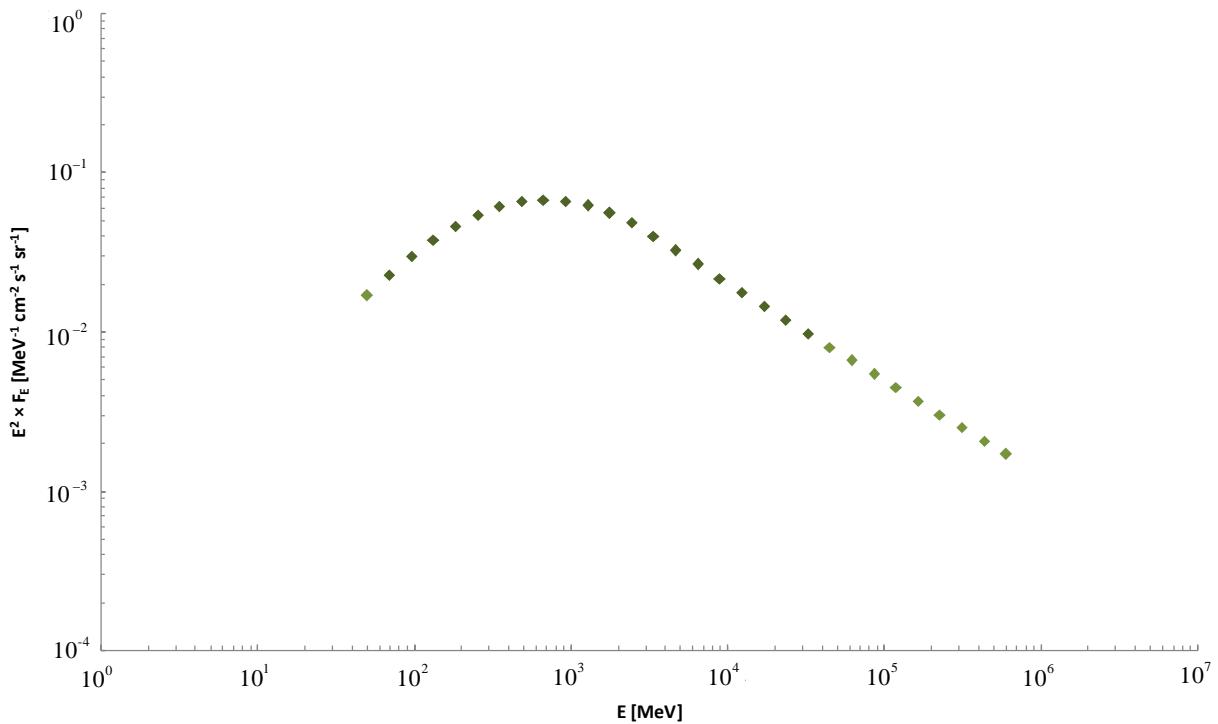
Dalje, izdvojili su se oni elementi koji pripadaju regionu $l = [30^\circ, 65^\circ]$, $b = [-2^\circ, 2^\circ]$ (za sve energije). Da bi se dobio srednji intenzitet zračenja, sabrane su sve vrednosti elemenata u regionu a zatim je zbir podeljen sa brojem elemenata u regionu (za svih 30 energija). Ovim postupkom se dobio spektar difuznog γ -zračenja za region u intervalu energija $E = [50 \text{ MeV}, 600 \text{ GeV}]$. U tabeli (tabela 8.1) su prikazane vrednosti energije i diferencijalnog fluksa dobijene na osnovu modela.

Problem difuznog gama-zračenja Mlečnog puta

Tabela 8.1. Srednje difuzno γ -zračenje iz regiona u intervalu energija $E = [50 \text{ MeV}, 600 \text{ GeV}]$. Diferencijalni fluks zračenja je F_E , a energija je E . Tamnjom bojom su označene vrednosti koje pripadaju intervalu energije $E = [63 \text{ MeV}, 40 \text{ GeV}]$ (interval u kom je model prilagođavan merenjima). Greške nisu bile dostupne. U svakom slučaju preciznost Fermi-LAT detektora je mnogo veća od Milagro detektora tako da se Fermi-LAT greške mogu zanemariti.

E [MeV]	F_E [MeV $^{-1}$ s $^{-1}$ cm $^{-2}$ sr $^{-1}$]	E [MeV]	F_E [MeV $^{-1}$ s $^{-1}$ cm $^{-2}$ sr $^{-1}$]
$5,00 \times 10^1$	$6,78 \times 10^{-6}$	6.44×10^3	6.39×10^{-10}
$6,91 \times 10^1$	$4,77 \times 10^{-6}$	8.90×10^3	2.73×10^{-10}
$9,56 \times 10^1$	$3,27 \times 10^{-6}$	1.23×10^4	1.17×10^{-10}
1.32×10^2	2.17×10^{-6}	1.70×10^4	5.02×10^{-11}
1.83×10^2	1.39×10^{-6}	2.35×10^4	2.15×10^{-11}
2.53×10^2	8.53×10^{-7}	3.25×10^4	8.53×10^{-12}
3.49×10^2	5.02×10^{-7}	4.50×10^4	5.02×10^{-12}
4.83×10^2	2.82×10^{-7}	6.22×10^4	2.82×10^{-12}
6.67×10^2	1.52×10^{-7}	8.59×10^4	1.52×10^{-13}
9.22×10^2	7.79×10^{-8}	1.19×10^5	7.79×10^{-13}
1.28×10^3	3.82×10^{-8}	1.64×10^5	3.82×10^{-13}
1.76×10^3	1.79×10^{-8}	2.27×10^5	1.79×10^{-14}
2.44×10^3	8.22×10^{-9}	3.14×10^5	8.22×10^{-14}
3.37×10^3	3.50×10^{-9}	4.34×10^5	3.50×10^{-14}
4.66×10^3	1.49×10^{-9}	6.00×10^5	1.49×10^{-15}

Tabelarne vrednosti (tabela 8.1) su prikazane grafički (slika 8.2).



Slika 8.2 Difuzno γ -zračenje iz regiona u opsegu energija $E = [50 \text{ MeV}, 600 \text{ GeV}]$. Tamnije tačke odgovaraju intervalu energije $E = [63 \text{ MeV}, 40 \text{ GeV}]$. Praksa da se diferencijalni fluks množi sa kvadratom energije je česta u astrofizici visokih energija. Naime, većina spektara visokoenergetskih nebeskih objekata je opisana stepenim zakonom sa stepenom koji varira oko broja 2. Ako postoji prelom u spektru, tj. ako se menja vrednost stepena, to se mnogo lakše uoči ako se diferencijalni fluks pomnoži s kvadratom energije. Pri tome se očuvava činjenica da stepeni zakon izgleda linearno na log-skali, samo se nagib menja.

Kao što je rečeno (glava 2.3), spektar difuznog γ -zračenja bi trebalo sve više i više da liči na spektar kosmičkog zračenja koji je linearan na log-skali (log-linearan). Može se primetiti da ovaj efekat postaje potpuno dominatan nakon $E \approx 5 \text{ GeV}$, a s obzirom da je sve jači s porastom energije, nema razloga da se spektar na većim energijama ne dobije ekstrapolacijom log-linearnega dela. Log-linearni deo je običan stepeni zakon:

$$F_E = N \times E^{-\alpha}. \quad (5)$$

Diferencijalni fluks zračenja je F_E , N je konstanta normiranja, E je energija, a α je spektralni indeks. Spektar difuznog γ -zračenja, dobijen iz Fermi-LAT modela, daje F_E u funkciji od E . S obzirom da se zna kako bi trebalo da izgleda spektar u teoriji (jednačina 5), urađen je fit za običan stepeni zakon (*Allometric 1*, tj. $y = ax^b$) u analitičkom programu *Origin*. Fitovi su rađeni za različiti broj tačaka u dve odvojene serije. Prva serija fitova podrazumeva raspon energije koji ide do 600 GeV (tabela 8.2), a druga serija fitova raspon energije koji ide do 40 GeV (tabela 8.3).

Problem difuznog gama-zračenja Mlečnog puta

Tabela 8.2 Rezultati fita za različit broj tačaka (do 600 GeV). U prvoj koloni se nalaze tačke uzete u obzir za fit, a u drugoj koloni su njihovi odgovarajući energijski intervali. Prvi fit (poslednji red) je rađen za 6 tačaka na najvišim energijama, a nadalje su se tačke na nižim energijama ubacivale jedna po jedna. Stalo se kod sedme tačke zato što se rezultat za spektralni indeks spušta ispod 2 što je suviše mala vrednost.

Tačke	E [GeV]	N	α	R ²
7-30	0.3 - 600	0.032 ± 0.004	1.89 ± 0.02	0.99932
8-30	0.5 - 600	0.073 ± 0.009	2.02 ± 0.02	0.99949
9-30	0.7 - 600	0.18 ± 0.02	2.15 ± 0.02	0.99964
10-30	0.9 - 600	0.43 ± 0.05	2.27 ± 0.02	0.99977
11-30	1.3 - 600	1.0 ± 0.1	2.39 ± 0.01	0.99985
12-30	1.8 - 600	2.0 ± 0.3	2.48 ± 0.02	0.99978
13-30	2.4 - 600	6.72 ± 0.02	2.6315 ± 0.0004	1.00000
14-30	3.4 - 600	6.57 ± 0.04	2.6288 ± 0.0007	1.00000
15-30	4.7 - 600	6.24 ± 0.02	2.6227 ± 0.0003	1.00000
16-30	6.4 - 600	6.12 ± 0.02	2.6206 ± 0.0005	1.00000
17-30	8.9 - 600	6.00 ± 0.05	2.6185 ± 0.0009	1.00000
18-30	12 - 600	5.640 ± 0.007	2.6119 ± 0.0001	1.00000
19-30	17 - 600	5.61 ± 0.01	2.6113 ± 0.0002	1.00000
20-30	24 - 600	5.59 ± 0.03	2.6111 ± 0.0005	1.00000
21-30	33 - 600	5.43 ± 0.03	2.6082 ± 0.0006	1.00000
22-30	45 - 600	5.23 ± 0.02	2.6049 ± 0.0004	1.00000
23-30	62 - 600	5.10 ± 0.02	2.6026 ± 0.0004	1.00000
24-30	86 - 600	5.00 ± 0.04	2.6009 ± 0.0006	1.00000
25-30	120 - 600	4.84 ± 0.04	2.5982 ± 0.0006	1.00000

Tabela 8.3 Rezultati fita za različit broj tačaka (do 40 GeV). U prvoj koloni se nalaze tačke uzete u obzir za fit, a u drugoj koloni su njihovi odgovarajući energijski intervali. Prvi fit (poslednji red) je rađen za 6 tačaka na najvišim energijama, a nadalje su se tačke na nižim energijama ubacivale jedna po jedna. Stalo se kod sedme tačke zato što se rezultat za spektralni indeks spušta ispod 2 što je suviše mala vrednost.

Tačke	E [GeV]	N	α	R ²
7-21	0.4 - 33	0.032 ± 0.005	1.89 ± 0.03	0.99922
8-21	0.5 - 33	0.07 ± 0.01	2.02 ± 0.03	0.99942
9-21	0.7 - 33	0.18 ± 0.03	2.15 ± 0.02	0.99959
10-21	0.9 - 33	0.43 ± 0.06	2.27 ± 0.02	0.99973
11-21	1.3 - 33	1.0 ± 0.1	2.39 ± 0.02	0.99982
12-21	1.8 - 33	2.0 ± 0.4	2.48 ± 0.03	0.99973
13-21	2.4 - 33	6.72 ± 0.04	2.6315 ± 0.0007	1.00000
14-21	3.4 - 33	6.57 ± 0.06	2.629 ± 0.001	1.00000
15-21	4.7 - 33	6.24 ± 0.03	2.6227 ± 0.0005	1.00000
16-21	6.4 - 33	6.12 ± 0.04	2.6206 ± 0.0008	1.00000

Poredeći dve tabele može se primetiti da su rezultati fita identični (do na grešku) za istu tačku na najnižoj energiji. To ide u prilog činjenici da su tačke od 40 GeV do 600 GeV dobijene ekstrapolacijom podataka od 63 MeV do 40 GeV na osnovu teorije difuznog zračenja. Jedino je greška za fitove do 600 GeV manja zato što je korišćeno više tačaka u fitu. Dakle, svejedno je koja će se tabela koristiti.

Radi bolje statistike treba uzeti što više tačaka, ali treba voditi računa da se ne "zađe" u log-nelinearan deo na nižim energijama. Prateći spektralni indeks α i konstantu normiranja N , od najnižeg reda naviše, može se primetiti da se spomenuti parametri glatko menjaju dok korelacioni faktor ima vrednost $R^2 = 1,00000$. Na 12. tački (12-21) ovaj trend se prekida. Naime, spomenuti parametri naglo menjaju vrednost i korelacioni faktor ima vrednost $R^2 = 0.99973$, što, iako je veoma blizu broja 1, ipak značajno odstupa od broja 1 u poređenju sa prethodnom vrednošću. I na grafiku (slika 8.2) se može odokativno primetiti da 12. tačka odstupa od log-linearnog trenda na višim energijama. Dakle, da bi se uzeo što više tačaka a da se ne zađe u log-nelinearan deo, izabraće se fit sa 13. tačkom kao najnižom. Spektralni indeks za ovaj fit iznosi $\alpha = 2.63$, a konstanta normiranja $N = 6,72$.

Dakle, posle energije $E \approx 3$ GeV spektar difuznog γ -zračenja postaje log-linearan sa spektralnim indeksom 2,63. S obzirom da bi spektralni indeks difuznog γ -zračenja i kosmičkog zračenja trebalo da bude isti u log-linearnom delu spektra difuznog zračenja, može se zaključiti da je spektralni indeks kosmičkog zračenja takođe $\alpha = 2,63$. Izmereni spektralni indeks kosmičkog zračenja iznosi $\alpha = 2,75$ (glava 2.2). Međutim, to merenje je vršeno u okolini Zemlje i nije se moglo sa sigurnošću tvrditi da važi za ceo Mlečni put. Na osnovu merenja Fermi-LAT detektora vidi se da zaista ne važi. Na osnovu prethodne analize može se reći da srednji spektralni indeks kosmičkog zračenja (prvi deo spektra kosmičkih zraka (slika 2.2) i (glava 2.2)), za deo galaksije koji se nalazi u regionu $l = [30^\circ, 65^\circ]$, $b = [-2^\circ, 2^\circ]$, iznosi $\alpha = 2,63$.

9. Milagro podaci

Kao što je rečeno u prethodnom poglavlju, spektar difuznog γ -zračenja iznad $E \approx 3$ GeV se može opisati stepenim zakonom sa indeksom 2,63. Spektar na višim energijama se može dobiti ekstrapolacijom. Milagro detektor je merio difuzno zračenje na energijama reda TeV i cilj je da se uporedi njegovo merenje sa ekstrapoliranim vrednostima Fermi-LAT detektora.

Milagro je merio zračenje integralno (glava 5). Da bi se dobio diferencijalni fluks, mora se pretpostaviti spektar zračenja. Da bi se Milagro podaci poredili sa ekstrapoliranim Fermi-LAT vrednostima, treba im dodeliti spektar koji je dobijen na osnovu Fermi-LAT podataka, a to je stepeni zakoni sa indeksom 2,63. Na svu sreću, stepeni zakon sa indeksom 2,62 (Variranjem spektralnog indeksa od 2.4 do 2.9, razlika u dobijenim diferencijalnim fluksevima je manja od 18%^[6]. To znači da je razlika između diferencijalnih flukseva za indekse 2.62 i 2.63 zanemarljiva.) se često uzima kao standardni spektar u visokoenergetskoj astrofizici, i Milagro tim je objavio diferencijalne flukse difuznog zračenja uz pretpostavku datog spektra (tabela 7.1). Radi preglednosti tabela je data i u ovom poglavlju (tabela 9.1).

Tabela 9.1 Srednje difuzno γ -zračenje iz galaktičke ravni ($|b| < 2^\circ$) za različite intervale galaktičkih longituda l (na 12 TeV uz pretpostavku spektra kao: stepeni zakon sa stepenom 2,62). Greška u tabeli je statistička. Sistematska greška je oko 30%. Značaj u σ jedinicama predstavlja odnos difuznog zračenja (signal) prema vangalaktičkom pozadinskom zračenju (šum). Poslednje dve vrednosti se navode sa sigurnošću od 95%^[7].

Galaktička longitude $ b < 2^\circ$	Značaj σ	Diferencijalni fluks ($\times 10^{-18}$) $\text{MeV}^{-1} \text{s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$
$30^\circ < l < 65^\circ$	5.6	4.1 ± 0.6
$65^\circ < l < 85^\circ$	10.5	3.8 ± 0.3
$85^\circ < l < 110^\circ$	0.4	< 1.3 (95% CL)
$136^\circ < l < 216^\circ$	0.9	< 1.4 (95% CL)

Dakle, srednji diferencijalni fluks difuznog γ -zračenja u regionu na 12 TeV je:

$$F_E(12 \text{ TeV}, \alpha = 2,62) = 4,1 \pm 1,4 \times 10^{-18} \text{ MeV}^{-1} \text{s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1}.$$

Ukupna greška je dobijena kvadraturnim sabiranjem statističke i sistematske greške.

Vangalaktičko zračenje je dobijeno posmatranjem neba na 5° od galaktičke ravni i 2° od tačkastih izvora. Pronađena su 4 tačkasta izvora od kojih se jedan nalazi u regionu. Obe komponente su oduzete kako bi se dobilo čisto difuzno zračenje. Greške procenjivanja i oduzimanja ovih komponenti ulaze u spomenutih 30% sistematske greške^[6].

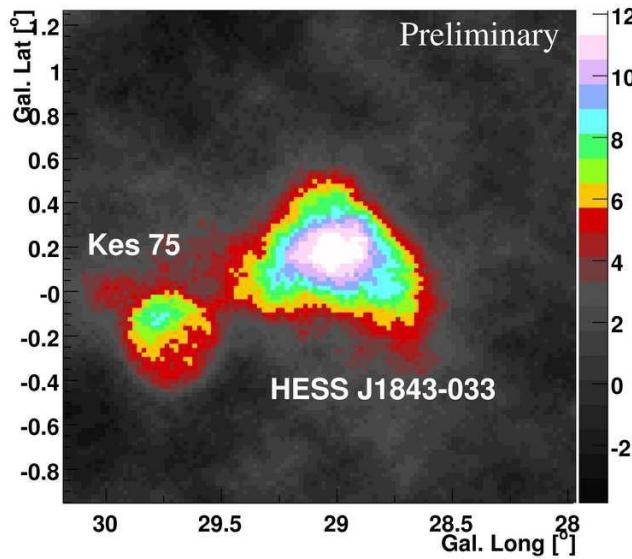
10. TeVCat izvori

Milagro je našao jedan tačkasti izvor u regionu i oduzeo ga, zajedno sa vangalaktičkim zračenjem, kako bi dobio čisto difuzno zračenje^[6].

Postavlja se pitanje da li ima tačkastih izvora u regionu koje Milagro nije mogao da uoči zbog svoje loše rezolucije (glava 5). Odgovor se može potražiti u merenjima IACT detektora (glava 4) koji imaju bolju rezoluciju od Milagra, i samim tim, mogu da uoče izvore koje Milagro ne može.

Grupa naučnika je stvorila katalog, nazvan *TeVCat*, koji sadrži tačkaste TeV izvore dobijene na osnovu merenja svih IACT i Milagro detektora. Dati katalog je dostupan na internetu i znatno olakšava posao zato što se svi TeV izvori nalaze na jednom mestu^[13].

Posmatrajući galaktičke koordinate izvora, utvrđeno je da postoji 10 izvora, uključujući i 1 Milagro izvor, unutar regiona i 4 izvora na 5 stepeni od regiona^[13]. Poslednja 4 izvora su analizirana za slučaj da se nalaze blizu regiona, da su veoma prostrani, i da time jednim delom „prodiru“ u region. Takođe, Milagro detektor, zbog svoje rezolucije od 0.5° , može „razmazati“ tačkasti izvor, i ako se taj izvor nalazi na manje od 0.5° od regiona (slika 10.1), deo njegovog zračenja će „ući“ u region.



Slika 10.1 Na slici se vide dva TeV izvora **Kes 75** i **HESS J1843-033** viđena uz pomoć IACT detektora HESS^[15].

Problem difuznog gama-zračenja Mlečnog puta

Centar izvora *Kes 75* se nalazi na manje od 0.5° od galaktičke latitude $l = 30^\circ$ (početak regionala) [15]. Ostala tri izvora se nalaze dovoljno daleko od regionala [13].

Dakle, postoji 10 izvora u regionalu od kojih je jedan Milagro izvor i već je oduzet, i jedan izvor blizu regionala. To ukupno daje 10 izvora za razmatranje. Spektar svakog izvora je opisan stepenim zakonom [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23].

$$F_E = N \times E^{-\Gamma}. \quad (6)$$

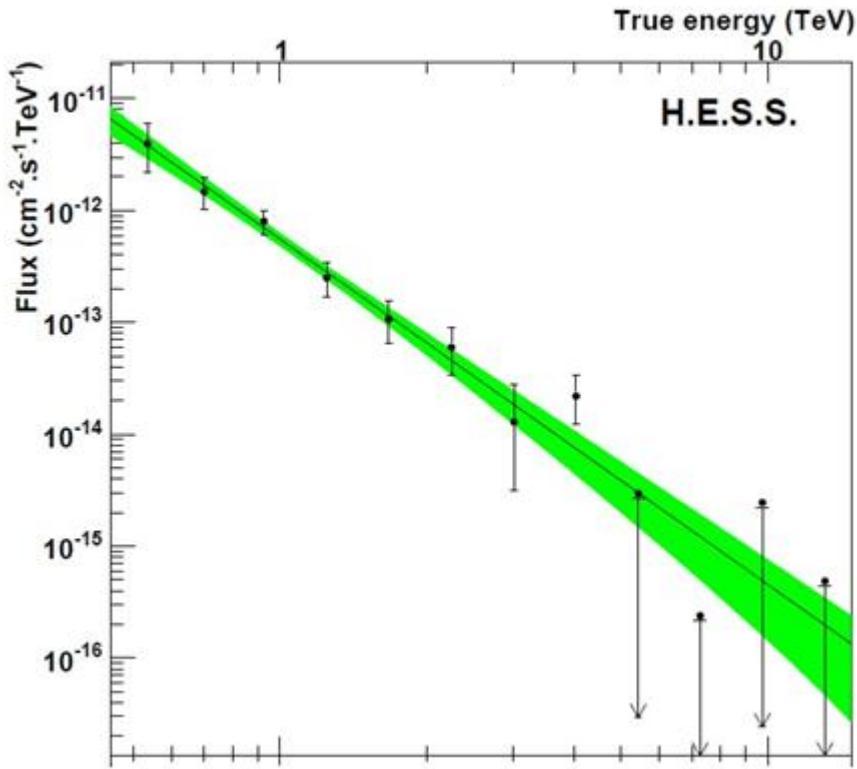
Diferencijalni fluks zračenja je F_E , N je konstanta normiranja, E je energija, a Γ je spektralni indeks. Na osnovu konstante normiranja N i spektralnog indeksa Γ , može se izračunati diferencijalni fluks na 12 TeV (tabela 10.1). Energijski opsezi merenja IACT detektoru obuhvataju 12 TeV [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23]. U suprotnom bi se postavilo pitanje da li se spektar zračenja menja na 12 TeV, a onda bi se dovelo u pitanje validnost računanja fluksa na 12 TeV uz pomoć parametara dobijenih iz drugog energijskog opsega.

Tabela 10.1 Nebeska tela često sadrže u nazivu 4 cifre koje predstavljaju broj časova i minuta koordinate rektascenzije. Te cifre su date u prvoj koloni. U drugoj i trećoj koloni se nalazi konstanta normiranja i spektralni indeks respektivno. Prva greška je statistička a druga je sistematska. Ako nije data sistematska greška u radu, uglavnom se uzima 20% za konstantu normiranja a 0.2 za spektralni indeks [18]. U četvrtoj koloni se nalazi izračunat diferencijalni fluks na 12 TeV. U petoj koloni je taj isti fluks "razređen" po prostornom ugлу regionala (detaljnije objašnjenje u nastavku teksta). Greške su određene tako što su prvo statistička i sistematska greška za svaki parametar (N i Γ) sabrane u kvadraturi, zatim je izračunata greška fluksa kao doprinos grešaka dva parametra u složenoj funkciji (više u nastavku teksta). U petoj koloni na kraju se nalazi ukupan fluks TeVCat izvora. Greške su sabrane u kvadraturi. U poslednjem redu su, radi doslednosti, dati podaci za Milagro izvor viđeni uz pomoć IACT detektora HESS. Milagro izvor je jači od svih ostalih izvora. Zato ga je Milagro, pored loše rezolucije, mogao detektovati.

Rektascenzijska oznaka u imenu	N $(\times 10^{-12})$	Γ	F_E tačkasto (12 TeV) [MeV $^{-1}$ s $^{-1}$ cm $^{-2}$]	F_E (12 TeV) [MeV $^{-1}$ s $^{-1}$ cm $^{-2}$ sr $^{-1}$]
1846 (Kes 75) [16]	0.6	2.26	2.18×10^{-21}	5×10^{-20}
1848 [17]	$3.7 \pm 0.4 \pm 0.7$	$2.8 \pm 0.2 \pm 0.2$	$3.5 \pm 2.9 \times 10^{-21}$	$8.3 \pm 7.0 \times 10^{-20}$
1849 [25, 26]	0.5	2.27	1.67×10^{-21}	3.9×10^{-20}
1857 [18]	$6.1 \pm 0.7 \pm 1.2$	$2.39 \pm 0.08 \pm 0.2$	$1.3 \pm 0.9 \times 10^{-20}$	$3.8 \pm 2.1 \times 10^{-19}$
1858 [18]	$0.6 \pm 0.1 \pm 0.1$	$2.17 \pm 0.12 \pm 0.2$	$2.7 \pm 1.5 \times 10^{-21}$	$6.4 \pm 3.6 \times 10^{-20}$
1911 (W49B) [19]	$0.23 \pm 0.04 \pm 0.06$	$3.1 \pm 0.3 \pm 0.2$	$1.0 \pm 1.2 \times 10^{-22}$	$2.4 \pm 2.8 \times 10^{-21}$
1912 [20]	$3.5 \pm 0.6 \pm 1.0$	$2.7 \pm 0.2 \pm 0.3$	$4.3 \pm 4.4 \times 10^{-21}$	$1.0 \pm 1.0 \times 10^{-19}$
1922 (W51) [21]	$1.0 \pm 0.1 \pm 0.1$	$2.6 \pm 0.1 \pm 0.2$	$1.6 \pm 1.0 \times 10^{-21}$	$3.7 \pm 2.3 \times 10^{-20}$
1930 (G54.1) [22]	$0.8 \pm 0.1 \pm 0.1$	$2.4 \pm 0.2 \pm 0.3$	$2.0 \pm 1.8 \times 10^{-21}$	$4.6 \pm 4.4 \times 10^{-20}$
1943 [23]	$0.6 \pm 0.1 \pm 0.1$	$3.1 \pm 0.3 \pm 0.2$	$2.5 \pm 2.9 \times 10^{-22}$	$5.9 \pm 6.8 \times 10^{-21}$
				$\Sigma = 7.5 \pm 2.6 \times 10^{-19}$
1908 (Milagro) [24]	4.14×10^{-12}	2.10	2.2×10^{-20}	5.3×10^{-19}

S obzirom da su u pitanju tačkasti, a ne difuzni izvori, izračunat diferencijalni fluks će imati jedinice $\text{MeV}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$. Da bi se fluksevi mogli oduzeti od difuznog zračenja, moraju se “razrediti” po prostornom uglu koji zauzima region. Region ima koordinate $l = [30^\circ, 65^\circ]$, $b = [-2^\circ, 2^\circ]$. Prostorni ugao se dobija integraljenjem po datim koordinatama i iznosi 0.043 sr, i, fluksevi u četvrtoj koloni se dele sa ovom vrednošću kako bi se dobili “razmazani” fluksevi u petoj koloni (tabela 10.1).

Parametri N i Γ su dobijeni na osnovu fita nekoliko tačaka. To znači da postoji korelacija (zavisnost) među njima. Potrebno je uzeti ovu korelaciju u obzir kako bi se pravilno odredio koridor greške (slika 10.2), i samim tim, greška za fluks na 12 TeV. Međutim, ovaj faktor nije dat u radovima, tako da su greške za fluks računate bez njega, tj. kao da su N i Γ nezavisni parametri. Greške dobijene na ovaj način nisu prave vrednosti za $\sigma(F)$ već će služiti kao procene.



Slika 10.2 Spektar TeV izvora HESS J1943+213 viđen uz pomoć HESS detektora. Zelena površina predstavlja koridor greške za dati fit, tj. predstavlja grešku u iznosu od 1σ [23].

Izvor Kes 75 ima sličnu vrednost fluksa kao i ostali izvori u regionu. S obzirom na rezoluciju Milagro detektora od 0.5° , deo ovog izvora će „ući“ u region (slika 10.1). Međutim, samo mali deo izvora će doprineti zračenju u regionu, a s obzirom da izvor nije jak u odnosu na druge, taj doprinos će se zanemariti (zato nisu računate greške).

Za izvor 1849 nisu dostupni parametri N i Γ , morali su se proceniti. Dostupan je bio samo integralni fluks od 0.35 TeV do 10 TeV^[25]:

$$F(0.35 - 10 \text{ TeV}) = 2.2 \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}.$$

Ovo nije dovoljno da se odrede oba parametra, dovoljno je samo da se odredi veza između njih. Dakle, jedan parametar se mora pretpostaviti. Dati TeV izvor je ostatak supernove koga napaja pulsar (PWN). U naučnom radu^[26] su proučavane karakteristike mnogih PWN i za svaki je dat spektralni indeks u TeV domenu. Nađena je aritmetička sredina za datih 24 PWN izvora i ona iznosi $\Gamma = 2.27$. Na osnovu spektralnog indeksa i integralnog fluksa, izračunata je konstanta normiranja $N = 0.5 \times 10^{-12}$. Zatim je izračunat fluks na 12 TeV. Greške prirodno izostaju jer je sam postupak dosta nesiguran. Doprinos datog izvora ukupnom TeVCat fluksu je oko 5%. Variranjem spektralnog indeksa od 2 do 2.7 (minimalne i maksimalne vrednosti za PWN^[26]), doprinos fluksa se kreće od 8% do 2% ukupnog fluksa. Dakle, dati izvor se može zanemariti, ali, ipak je ostavljen jer je veća greška skroz ga izbaciti nego proceniti fluks datom metodom. Greške za dati izvor će ipak biti izostavljene.

Dakle, ukupan doprinos TeV izvora u regionu, koje Milagro nije uzeo u obzir, na 12 TeV iznosi:

$$F_E(12 \text{ TeV}) = 7.5 \pm 2.6 \times 10^{-19} \text{ MeV}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}.$$

Greška je, kao što je rečeno, procenjena i ne predstavlja vrednost od 1σ . Dati fluks čini 18% difuznog fluksa koga je izmerio Milagro (glava 9).

11. Difuzno gama-zračenje u GeV-TeV opsegu

Na osnovu Fermi-LAT podataka je dobijen spektralni indeks $\alpha = 2.63$ (i konstanta normiranja $N = 6.72$) difuznog zračenja za GeV domen (glava 8). Ekstrapolacijom do TeV energija, konkretno do 12 TeV, dobija se za diferencijalni fluks:

$$F_E(\text{Fermi-LAT}, 12 \text{ TeV}) = 6,72 \times (12 \times 10^6)^{-2,63} = 1.58 \times 10^{-18} \text{ MeV}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}.$$

Greška je zanemarljiva u odnosu na grešku Milagro fluksa tako da nije uzeta u obzir.

Iznos Milagro fluksa je:

$$F_E(\text{Milagro}, 12 \text{ TeV}, \alpha = 2,62) = 4,1 \pm 1,4 \times 10^{-18} \text{ MeV}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}.$$

Greška sadrži statističku i sistematsku grešku i predstavlja 1σ fluksa.

Iznos fluksa TeVCat izvora je:

$$F_E(\text{TeVCat}, 12 \text{ TeV}) = 7.5 \pm 2.6 \times 10^{-19} \text{ MeV}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}.$$

Greška je procenjena i ne predstavlja vrednost 1σ .

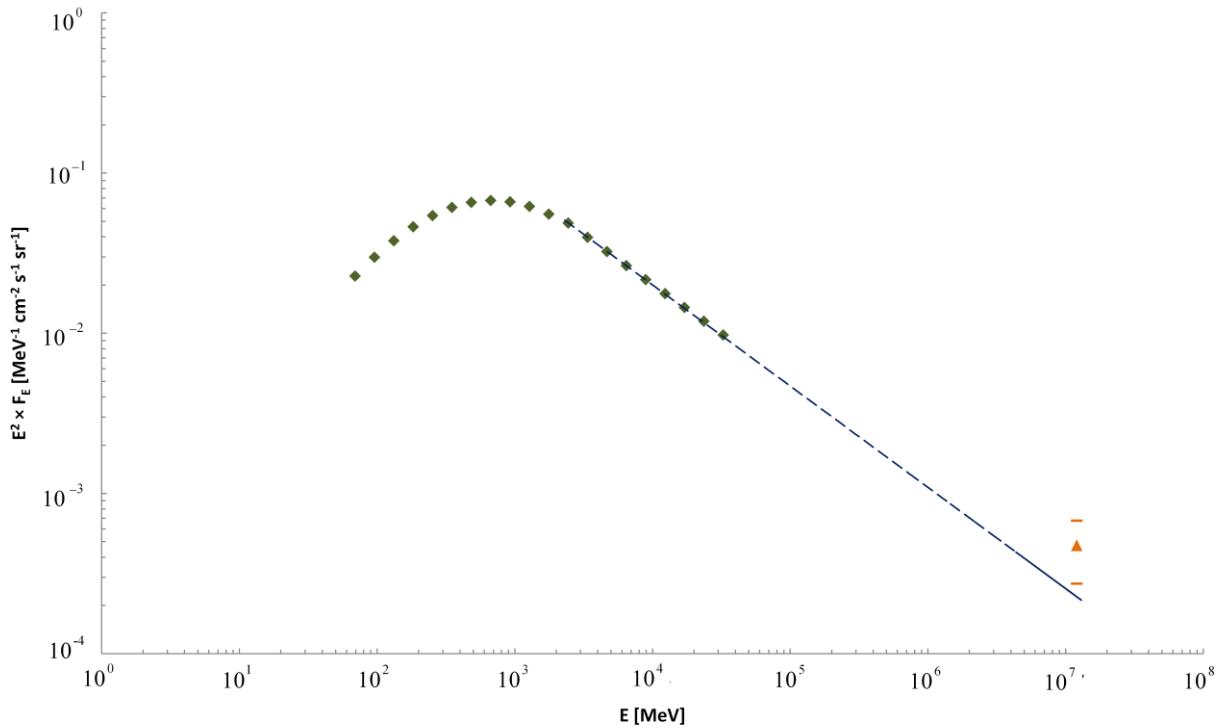
Vrednost čisto difuznog fluksa dobijenog merenjima TeV detektora se dobija tako što se od Milagro fluksa oduzme fluks TeVCat izvora:

$$F_E(\text{Milagro \& TeVCat}, 12 \text{ TeV}) = 3,3 \pm 1,4 \times 10^{-18} \text{ MeV}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}.$$

Greška je dobijena sabiranjem u kvadraturi greške Milagro detektora i greške TeVCat izvora. Iako je greška TeVCat izvora samo procenjena, ona je mnogo manja od greške Milagro detektora, još više kada se kvadrira. Može se prepostaviti da ukupna greška ne odstupa mnogo od prave 1σ greške koja bi se dobila ako bi se znala 1σ greška TeVCat izvora.

Deljenjem vrednosti čisto difuznog fluksa dobijenog merenjima TeV detektora sa čisto difuznim fluksom ekstrapoliranim na osnovu Fermi-LAT podataka dobija se:

$$\frac{F_E(\text{Milagro \& TeVCat}, 12 \text{ TeV}) = 3,3 \times 10^{-18}}{F_E(\text{Fermi-LAT}, 12 \text{ TeV}) = 1.58 \times 10^{-18}} = 2,1.$$

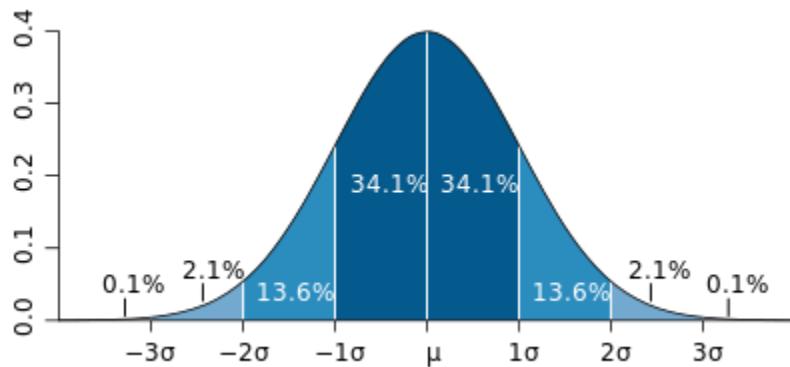


Slika 11.1 Zeleni kvadratići predstavljaju Fermi-LAT tačke od $E = [63 \text{ MeV}, 40 \text{ GeV}]$. Trougao predstavlja Milagro tačku sa oduzetim TeVCat izvorima. Dve crte, ispod i iznad, predstavljaju grešku od 1σ . Ekstrapolirane Fermi-LAT vrednosti su prikazane plavom isprekidanom linijom.

Spomenute dve vrednosti bi trebalo da su jednake, tj. da se njihovim deljenjem dobije broj 1. Gde se nalazi greška? Kao što je rečeno, Fermi-LAT je daleko precizniji detektor od Milagro i IACT detektora. To se može primetiti u greškama za parametre α i N tokom fitovanja (tabela 8.3). Takođe, na GeV energijama Fermi-LAT podaci se skoro savršeno podudaraju sa teorijskom previđanjima za spektar difuznog zračenja ^[3]. Spektar difuznog zračenja ka višim energijama postaje sve više jednoznačan, u smislu da se može opisati jednostavnim stepenim zakonom. Na osnovu svega toga ekstrapolirane Fermi-LAT vrednosti se mogu uzeti kao tačne, a u odnosu na njih gledati koliko odstupaju merenja TeV detektora.

Dakle, može se reći da TeV detektori mere duplo više zračenja nego što bi trebalo. Ovaj višak zračenja se ne može objasniti nepreciznošću TeV detektora zato što greška od 1σ ne dopire do Fermi-LAT fluksa (donja granica fluksa TeV detektora je veća za 20% od Fermi-LAT fluksa). Čak i da dopire, to bi značilo da se merenja podudaraju sa verovatnoćom od $1/6$. Naime, verovatnoća da se pravi rezultat nalazi u intervalu greške $\pm\sigma$ je $2/3$, a izvan intervala $1/3$. Od te $1/3$ pola ($1/6$) se odnosi na veću, a pola ($1/6$) na manju vrednost (slika 11.2).

Sve u svemu, može se sa velikom sigurnošću zaključiti da postoji višak zračenja u TeV domenu u odnosu na teorijska predviđanja koja je Fermi-LAT potvrdio u GeV domenu.



Slika 11.2 Gausova distribucija verovatnoće. Fluks TeV detektoru bi odgovarao vrednosti u sredini. Vrednost ekstrapoliranog fluksa Fermi-LAT detektoru bi se nalazila levo od -1σ .

12. Rezultati

Sa sigurnošću se može reći da postoji višak difuznog zračenja na TeV energijama. Postoji nekoliko mogućih objašnjenja:

- Postoji mogućnost da Milagro detektor ima sistematsku grešku koja nije uzeta u obzir. Ova ideja potiče od slučaja Fermijevog prethodnika EGRET-a. EGRET je zabeležio višak difuznog zračenja u GeV domenu i naučnici su nudili razna objašnjenja kako bi objasnili tu pojavu. Tek kada je Fermi-LAT počeo sa merenjem difuznog zračenja, koje se nalazilo u okvirima teorije, primetilo se da je EGRET imao veliku sistematsku grešku usled koje je izmerio višak zračenja. Milagro detektor, koji je završio sa radom 2008. godine, će biti zamenjen u bliskoj budućnosti sa novim detektorm HAWK (*High-Altitude Water Cherenkov Gamma-Ray Observatory*) (slika 12.1). Ovaj detektor radi na istom principu kao Milagro ali je značajno precizniji. Sa sigurnošću će pružiti odgovor da li zaista postoji TeV višak ili je problem bio u Milagro detektoru;
- Nerazlučeni TeV tačkasti izvori mogu doprineti difuznom zračenju. Međutim, postavlja se pitanje koliko neotkriveni izvori mogu doprineti difuznom fluksu. Može se videti (tabela 10.1) da jedan izvor čini oko 50% ukupnog fluksa TeVCat izvora. Najslabiji izvori doprinose manje od 1% ukupnom TeVCat fluksu. Neotkriveni izvori ne bi trebalo da imaju fluks značajno veći od najslabijih TeVCat izvora jer bi u suprotnom bili otkriveni. Dakle, broj nerazlučenih TeV tačkastih izvora bi morao biti veoma velik kako bi objasnio višak TeV zračenja. IACT detektori, koji mere TeV tačkaste izvore, postaju sve bolji i bolji i sve više tačkastih TeV izvora će biti otkriveno, a postojeći izvori će biti preciznije izmereni;
- Teorija tvrdi da je pionski ideo opisan stepenim zakonom i da dominira u odnosu na druge dve komponente u difuznom zračenju na visokim energijama (glava 2.3). Prvi deo prepostavke sigurno važi, to pokazuju Fermi-LAT merenja. Međutim, drugi deo ne mora važiti. Moguće je da na energijama većim od opsega merenja Fermi-LAT detektora leptonski ideo počinje da jača u odnosu na pionski. Ovo bi se moglo proveriti merenjem spektra difuznog zračenja na TeV energijama, ali nažalost, Milagro, jedini detektor koji može meriti TeV difuzno zračenje, nema tu mogućnost jer meri integralno. Postoji kompjuterski model GALPROP koji predviđa leptonski ideo unutar difuznog zračenja u zavisnosti od ulaznih parametara (raspodela ISM-a, model ubrzanja čestica u supernovama, raspodela supernovih, itd). Da bi se dobio jači leptonski ideo na višim energijama a manji na nižim, ulazni parametri se moraju pomeriti do krajnijih granica dobro utvrđenih vrednosti. To znači da je objašnjenje sa većim leptonskim udelom malo verovatno;

- Egzotično objašnjenje TeV viška je to da se čestice tamne materije anihiliraju i pri tome proizvode γ -zračenje;
- Na kraju, moguće je da više ili sva objašnjenja u određenom udelu daju odgovor na problem viška zračenja u TeV domenu.



Slika 12.1 Konstrukcija HAWK detektora. Slika potiče iz aprila 2013. Detektor se nalazi na padini vulkana *Sierra Negra* (Crna planina) na visini od 4500 m u Meksiku.

13. Zaključak

Detektor Fermi-LAT je merio difuzno γ -zračenje na GeV energijama i sa velikom sigurnošću je potvrdio da se merenja nalaze u okvirima teorije. Milagro je merio difuzno γ -zračenje u TeV domenu. IACT detektori su merili zračenje tačkastih izvora u TeV domenu. Analizirano je zračenje koje dolazi iz dela galaksije koji se nalazi unutar koordinata $l = [30^\circ, 65^\circ]$, $b = [-2^\circ, 2^\circ]$.

Fermi-LAT podaci se nalaze u okvirima teorije i pokazuju da je spektralni indeks difuznog γ -zračenja, samim tim i kosmičkog zračenja, 2.63. U okolini Zemlje je izmeren spektralni indeks kosmičkog zračenja od 2.75. Dakle, spektar kosmičkog zračenja varira u Mlečnom putu. Fermi-LAT podaci se mogu ekstrapolirati do TeV energija i uporediti sa merenjima TeV detektora.

Milagro je detektovao samo jedan tačkasti izvor u regionu, dok su IACT detektori registrovali još 9. Od Milagro fluksa difuznog zračenja su oduzeti tačkasti izvori koje Milagro nije detektovao, i samim tim, uključio ih je u svoj fluks za difuzno zračenje. Posle oduzimanja ostaje čisto difuzno zračenje. Kada se uporedi sa ekstrapoliranim Fermi-LAT vrednostima, dobija se dvostruko veća vrednost. Može se smatrati da su ekstrapolirane Fermi-LAT vrednosti mnogo tačnije nego vrednosti TeV detektora što znači da postoji višak difuznog zračenja na TeV energijama. Dati višak se može objasniti na nekoliko načina:

- Moguće je da Milagro detektor poseduje nepredviđenu sistematsku grešku;
- Nedetektovani tačkasti TeV izvori mogu doprineti difuznom fluksu;
- Leptonski ideo na višim energijama možda raste;
- Anihalacije čestica tamne materije.

Moguće je da svi faktori delom učestvuju u porastu difuznog TeV zračenja.

Astrofizika visokih energija je veoma aktuelna i mnogo se ulaže u nju. Detektori γ -zračenja se konstantno unapređuju. Za aktuelni problem TeV viška će najviše pomoći detektor HAWK, Milagrov naslednik, koji će posmatrati difuzno γ -zračenje sa većom preciznošću. Takođe, IACT detektori se unapređuju i čeka se na nova otkrića slabijih tačkastih TeV izvora i preciznije određen spektar već otkrivenih. Za sada pitanje TeV viška ostaje otvoreno.

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 27 (2007) 10–20;
- [2] Danica Drašković; *Difuzno galaktičko gama-zračenje na TeV energijama*; Diplomski rad, Prirodno-matematički fakultet u Novom Sadu, 2010;
- [3] M. Ackermann i dr.; *Fermi-LAT Observations of the Diffuse γ -ray Emission: Implications for Cosmic Rays and the Interstellar Medium*; arXiv:1202.4039v2 [astro-ph.HE] 21 Feb 2012;
- [4] <http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/>;
- [5] M. Ackermann i dr.; *The Fermi Large Area Telescope On Orbit: Event Classification, Instrument Response Functions, and Calibration*; arXiv:1206.1896v2 [astro-ph.IM] 24 Aug 2012;
- [6] A. A. Abdo i dr.; *A MEASUREMENT OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF DIFFUSE TeV GAMMA-RAY EMISSION FROM THE GALACTIC PLANE WITH MILAGRO*; The Astrophysical Journal, 688:1078-1083, 2008 December 1;
- [7] <http://umdgbrb.umd.edu/cosmic/results.html>;
- [8] <http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/BackgroundModels.html>;
- [9] http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/Model_details/Pass7_galactic.html;
- [10] http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/ring_for_FSSC_final4.pdf;
- [11] P. L. Nolan i dr.; *FERMI LARGE AREA TELESCOPE SECOND SOURCE CATALOG*; The Astrophysical Journal Supplement Series, 199:31 (46pp), 2012 April;
- [12] http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/documentation/Cicerone/Cicerone_Data_Exploration/Data_preparation.html;
- [13] <http://tevcat.uchicago.edu/>;
- [14] F. Aharonian i dr.; *The H.E.S.S. survey of the Inner Galaxy in very-high-energy gamma-rays*; arXiv:astro-ph/0510397v1 13 Oct 2005;
- [15] S. Hoppe; *The H.E.S.S. survey of the inner Galactic plane*; arXiv:0710.3528v1 [astro-ph] 18 Oct 2007;
- [16] Rogelio Caballero i dr.; *New Companions for the lonely Crab? VHE emission from young pulsar wind nebulae revealed by H.E.S.S.*; 30TH INTERNATIONAL COSMIC RAY CONFERENCE, Vol. 2 (OG part 1), pages 823–826;

- [17] Ryan Carlos Goncalves Chaves; *The extended H.E.S.S. Galactic Plane Survey: Discovering and identifying new sources of VHE γ -rays*; Dissertation, Ruperto-Carola University of Heidelberg, Germany;
- [18] F. Aharonian i dr.; *HESS VHE Gamma-Ray Sources Without Identified Counterparts*; Astronomy & Astrophysics manuscript no. 8516, February 2, 2008;
- [19] Francois Brun i dr.; *Discovery of VHE γ -ray emission from the W49 region with H.E.S.S.*; 25th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics December 6-10, 2010 Heidelberg, Germany;
- [20] F. Aharonian i dr.; *Discovery of very-high-energy γ -ray emission from the vicinity of PSR J1913+1011 with H.E.S.S.*; Astronomy & Astrophysics manuscript no. 8715, February 27, 2013;
- [21] J. Aleksic i dr.; *Morphological and spectral properties of the W51 region measured with the MAGIC telescopes*; Astronomy & Astrophysics manuscript no. MAGIC-W51, February 14, 2012;
- [22] V. A. Acciari i dr.; *DISCOVERY OF VHE -RAY EMISSION FROM THE SNR G54.1+0.3*; arXiv:1005.0032v4 [astro-ph.HE] 6 Jul 2010;
- [23] A. Abramowski i dr.; *HESS J1943+213: a candidate extreme BL Lacertae object*; Astronomy & Astrophysics manuscript no. aa16545, March 4, 2011;
- [24] F. Aharonian i dr.; *Detection of Very High Energy radiation from HESS J1908+063 confirms the Milagro unidentified source MGRO J1908+06*; Astronomy & Astrophysics manuscript no. 1357, April 22, 2009;
- [25] E. V. Gotthelf i dr.; *DISCOVERY OF AN ENERGETIC 38.5 ms PULSAR POWERING THE GAMMA-RAY SOURCE IGR J18490–0000/HESS J1849–000*; arXiv:1012.2121v2 [astro-ph.HE] 10 Feb 2011;
- [26] O. Kargaltsev, G. G. Pavlov; *Pulsar-wind nebulae in X-rays and TeV γ -rays*; arXiv:1002.0885v2 [astro-ph.HE] 9 Apr 2010.

Biografija



Miloš Kovačević Tadić 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.

Problem difuznog gama-zračenja Mlečnog puta

**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 (master) rad
VR

Autor: Miloš Kovačević
AU

Mentor: Vanredni profesor dr Tijana Prodanović
MN

Naslov rada: Problem difuznog gama-zračenja Mlečnog puta
NR

Jezik (i pismo) publikacije: Srpski (latinica)
JP

Jezik izvoda: Srpski/Engleski
JI

Zemlja publikovanja: Srbija
ZP

Uže geografsko područje: Republika Vojvodina
UGP

Godina: 2013.
GD

Izdavač: Autorski reprint
IZ

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

Fizički opis rada: Poglavlja (13), strana (42), tabela (6), slika (20), lit. navoda (26)
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: Iskorišćeni su podaci sa Fermi-LAT, Milagro i IACT detektora kako bi se analiziralo difuzno γ -zračenje iz Mlečnog puta. Potvrđeno je da postoji višak zračenja na TeV energijama u odnosu na teorijski model. Takođe, utvrđeno je da spektralni indeks kosmičkog zračenja varira u Mlečnom putu.

IZ

Datum prihvatanja teme od strane NN veća: 07.06.2013.
DP

Datum odbrane: 02. 07. 2013.
DO

Članovi komisije:
KO

Predsednik: dr Dušan Mrđa, vanr. prof. PMF
Mentor: dr Tijana Prodanović, vanr. prof. PMF
Član: dr Agneš Kapor, red. prof. PMF

**UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCES
KEY WORDS DOCUMENTATION**

Accessio number:

ANO

Identification number:

INO

Document type: Monograph type

DT

Type of record: Printed text

TR

Contents code: Master Thesis

CC

Author: Milos Kovacevic

AU

Mentor: Associate Professor Dr. Tijana Prodanovic

MN

Title: The Problem of Diffuse Gamma-emission from the Milky Way

TL

Language of text: Serbian

LT

Language of abstrakt: Serbian/English

LA

Country of publication: Serbia

CP

Locality of publication: Republic of Vojvodina

LP

Publication year: 2013.

PY

Publisher: Author's reprint

PU

Publ. Place: Novi Sad, Department of Physics, PMF, Trg Dositeja Obradovica 4
PP

Physical description: Chapters (13), Pages (42), Tables (6), Figures (20), References (26)
PD

Scientific field: Physics
SF

Scientific discipline: Astrophysics
SD

Key words: Diffuse Gamma-radiation, Milky Way, Fermi-LAT, Milagro
KW

Universal decimal classification:
UDC

Holding data: Library, Department of Physics, PMF, Novi Sad
HD

Note:
N

Abstract: Data from Fermi-LAT, Milagro and IACT were used in the analysis of the diffuse γ -ray emission from the Milky way. The existence of TeV excess was confirmed from the data with respect to the theoretical model. It was also determined that the spectral index of the cosmic rays varies through the Milky Way.

AB

Accepted by Scientific Board on: 7 June 2013
ASB

Defended: 2 July 2013
DE

Thesis defend board:
DB

President: Dr. Dusan Mrdja, Assoc. Prof. PMF
Supervisor: Dr. Tijana Prodanovic, Assoc. Prof. PMF
Member: Dr. Agnes Kapor, Prof. PMF

ZAPISNIK

Sa javne odbrane završnog (master) rada kandidata Miloša Kovačevića studenta Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu, Departmana za fiziku

Završni (master) rad pod naslovom:

Problem difuznog gama-zračenja iz Mlečnog puta

je ocenjen ocenom(.....)

Održana rada je ocenjena ocenom(.....)

Konačna ocena(.....)

Novi Sad,

Datum:

Članovi komisije:

1. _____

dr Dušan Mrđa, vanredni profesor, PMF

2. _____

dr Tijana Prodanović, vanredna profesorica, PMF

3. _____

dr Agneš Kapor, redovna profesorica, PMF