



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO-MATEMATIČKI  
FAKULTET  
DEPARTMAN ZA FIZIKU



# Difuzno galaktičko gama-zračenje na TeV energijama

- diplomski rad -

Mentor: Dr Tijana Prodanović

Kandidat: Danica Drašković

Novi Sad, 2010

Sadržaj:

1. Uvod .....	3
2. Teorija gama-zračenja .....	4
2.1. Gama-zračenje.....	4
2.2. Gama-astronomija .....	5
2.3. Veza kosmičkog i gama-zračenja .....	7
2.4. Difuzno galaktičko gama-zračenje.....	9
2.4.1. Doprinos neutralnih piona.....	11
3. Mlečni put kao izvor difuznog gama-zračenja .....	12
4. Proučavanje galaktičkih $\gamma$ -izvora Milagro instrumentom .....	14
5. Ispitivanje difuznog galaktičkog $\gamma$ -zračenja na TeV energijama.....	16
6. Zaključak .....	21
7. Literatura .....	22
Biografija.....	23
Ključna dokumentacijska informacija	

## 1. Uvod

Iako je prošlo stotinu godina od njihovog otkrića, poreklo, ubrzanje i raspodela galaktičkih kosmičkih zraka još uvek su velika nepoznanica, mada su ostaci supernovih i pulsari najverovatniji kandidati za izvore kosmičkog zračenja. Detekcija TeV  $\gamma$ -zračenja i X-zraka na lokacijama bliskim SNRs pruža nam veoma čvrst dokaz da se u njima ubrzavaju visokoenergetske čestice.

Galaktička difuzna  $\gamma$ -emisija potiče od interakcije čestica kosmičkog zračenja (hadrona i elektrona) sa materijom i radijacionim poljima u Mlečnom putu. Sudarima hadrona sa materijom nastaju neutralni pioni koji se zatim raspadaju na  $\gamma$ -zrake. Upravo zbog ovih procesa,  $\gamma$ -zračenje nam može pružiti informacije o gustini i spektru kosmičkog zračenja duž čitave Galaksije.

Gama-zraci sa energijama iznad 10 TeV mogu nam poslužiti za ispitivanje mehanizama ubrzavanja čestica u galaktičkim izvorima. Prostorna raspodela ovih TeV  $\gamma$ -zraka može se uporediti sa modelima koji predviđaju stvaranje difuznog zračenja kroz raspad neutralnih piona i kroz inverzno Komptonovo rasejanje, te se na taj način može ispitati relativan doprinos hadronskih i leptonskih procesa.

Kod difuznog  $\gamma$ -zračenja trebali bi da dominiraju hadronski mehanizmi (doprinos neutralnih piona) a difuzni spektar bi na većim energijama trebao da prati spektar kosmičkog zračenja. U dva režima, na GeV i TeV energijama, vrše se osmatranja različitim instrumentima: jedno su svemirski teleskopi tipa *EGRET* (20 MeV-30 GeV) i *Fermi* (10 keV-300 GeV), a drugo su čerenkovljevi detektori tipa *HESS* (100 GeV-100 TeV, pogodan za tačkaste izvore) i *Milagro* (TeV-režim, pogodan za difuzno  $\gamma$ -zračenje).

Suština ovog rada je da se upoređivanjem ranijih i najnovijih *Milagro* rezultata povežu merenja iz različitih energetske opsega, te da se odredi doprinos neutralnih piona izmerenom difuznom  $\gamma$ -fluksu na određenoj energiji.

Korišćeno je *Milagro* merenje fluksa difuzne  $\gamma$ -emisije iz 2008. godine[1]. Izračunat je maksimalan i realan  $\gamma$ -pionski fluks koji je zatim upoređen sa novim *Milagro*om. Nalaženjem udela  $\gamma$ -pionskog fluksa na TeV energijama otkriva se da i dalje postoji *TeV-višak*. Na kraju je ovaj udeo upoređen sa izračunatim udelom pionskog fluksa za *Milagro* merenje iz 2005. godine[4].

Posebna pažnja u radu posvećena je objašnjenju povezanosti kosmičkog i  $\gamma$ -zračenja, kao i značaju razumevanja ovih prirodnih astrofizičkih fenomena.

## 2. Teorija gama-zračenja

### 2.1. Gama-zračenje

Gama ( $\gamma$ ) zračenje predstavlja elektromagnetno zračenje visokih frekvencija i veoma kratkih talasnih dužina. Ono nastaje interakcijama subatomske čestice kao što su: anihilacija elektron-pozitron, raspad neutralnih piona, fuzija, fisija ili inverzno Komptonovo rasejanje u astrofizičkim procesima. Gama-zraci najčešće imaju frekvencije iznad  $10^{19}$  Hz, pa stoga i energije iznad 100 keV i talasne dužine kraće od 10 pm, često manje od atoma. Gama fotoni radioaktivnog raspada često imaju energije od nekoliko stotina keV, ali skoro uvek manje od 10 MeV. Pošto predstavljaju oblik jonizujućeg zračenja,  $\gamma$ -zraci mogu prouzrokovati ozbiljna oštećenja kada ih apsorbuje živo tkivo, pa su velika opasnost po zdravlje svakog živog bića na Zemlji.

Pol Vilard, francuski hemičar i fizičar, otkrio je gama zračenje 1900. godine dok je proučavao zračenje koje emituje element radijum. Alfa i beta zraci su u to vreme već bili razdvojeni i imenovani radom Ernesta Raderforda 1899. godine, koji je četiri godine kasnije dao naziv i gama-zracima. U prošlosti, razlika između X i gama-zraka zasnivala se na energiji (ili ekvivalentnoj frekvenciji ili talasnoj dužini), pa se smatralo da je  $\gamma$ -zračenje samo visokoenergetska varijanta X-zraka. Međutim, visokoenergetski X-zraci koje čovek stvara u linearnim akceleratorima, za radioterapije kod lečenja karcinoma, uglavnom imaju energije veće od  $\gamma$ -zraka nastalih radioaktivnim raspadom. Upravo zbog ovog preklapanja energetske opsega, ova dva tipa elektromagnetnog zračenja danas se najčešće definišu po svom poreklu:

- **X-zrake** emituju **elektroni**, ili u orbitalama izvan jezgra, ili prilikom ubrzavanja kada nastaje zakočno zračenje (bremštralung)
- **$\gamma$ -zrake** emituje **jezgro**, raspad drugih čestica ili anihilacioni procesi.

Ne postoji donja granica za energiju fotona stvorenih u nuklearnim reakcijama, pa su zato ultraljubičasti fotoni i fotoni još nižih energija koji su nastali ovakvim procesima, takođe definisani kao  $\gamma$ -zraci. U pojedinim oblastima nauke kao što je astronomija,  $\gamma$  i X zračenje još uvek se najčešće definišu preko energije.

## **2.2. Gama astronomija**

Mnogo pre detekcije  $\gamma$ -zraka koje emituju kosmički izvori, naučnici su smatrali da bi Svemir trebao da stvara ovakve fotone. Vredan rad i godine istraživanja dovele su do zaključka da znatan broj različitih procesa koji se odvijaju u Vasioni rezultuje  $\gamma$ -emisijom. U ove procese ubrajaju se interakcije kosmičkog zračenja<sup>1</sup> sa međuzvezdanim gasom, eksplozije supernovih i interakcije visokoenergetskih elektrona sa magnetnim poljima. Uprkos ovako burnim dešavanjima u Kosmosu, naučnici su uspeli da detektuju  $\gamma$ -zračenje tek početkom 70-ih godina prošlog veka.

Veliki deo gama-zračenja iz Svemira apsorbuje se u Zemljinoj atmosferi, pa se gama-astronomija nije ni mogla razviti pre nego je postalo moguće postaviti detektore iznad atmosfere, pomoću balona i svemirskih letelica. Prvi gama-teleskop postavljen je u Zemljinu orbitu 1961. godine na satelit *Explorer 11* a prikupio je nešto više od 100 fotona kosmičkog  $\gamma$ -zračenja. Ispostavilo se da ovi fotoni dolaze iz svih pravaca u Svemiru, što je ukazalo na postojanje neke vrste uniformne gama-pozadine, kakva bi se očekivala pri interakcijama kosmičkog zračenja sa međuzvezdanim gasom.

Prvi istinski astrofizički  $\gamma$ -izvori bili su solarni bljeskovi, pomoću kojih je otkrivena jaka linija formiranja deuterijuma na 2,223 MeV. Značajnija gama-emisija iz naše Galaksije detektovana je 1967. pomoću instrumenta postavljenog na satelit *OSO-3*, kada je zabeležen 621 događaj koji je bio u vezi sa gama-zračenjem.

Oblast proučavanja  $\gamma$ -astronomije rođena je 1972. sa prvim statistički značajnim rezultatima dobijenim satelitima *SAS-2* i *COS-B*, koji su nam pružili uzbudljiv pogled na Svemir visokih energija, potvrdili ranija otkrića o gama-pozadini, sačinili prvu detaljnu mapu neba na gama-talasnim dužinama i detektovali mnogo tačkastih izvora. Nažalost, rezolucija instrumenata nije bila dovoljna da poveže većinu ovih izvora sa konkretnim vidljivim zvezdama ili zvezdanim sistemima.

Verovatno najspektakularnije otkriće u  $\gamma$ -astronomiji poteklo je od grupe vojnih odbrambenih satelita sredinom 70-ih godina prošlog veka. Detektori dizajnirani tako da uoče bljeskove gama-zraka pri eksplozijama nuklearnih bombi, počeli su da beleže bljeskove  $\gamma$ -zračenja iz dubokog Svemira. Kasnije je ustanovljeno da ovi gama-bljeskovi traju nekoliko delića sekunde (najviše do minuta), nastaju iznenada iz neočekivanih pravaca, i nakon snažnog bljeska koji postane dominantan na čitavom gama-nebu, na kraju polako izblede. Izvori ovih zagonetnih visokoenergetskih pojava do danas su ostali nerazrešena misterija, mada se čini da dolaze iz veoma udaljenih oblasti Vasiona i da barem neki od  $\gamma$ -bljeskova nastaju eksplozijama *hipernovih*, kada nakon eksplozije masivnih zvezda nastane crna rupa (a ne neutronska zvezda, kao u slučaju supernovih).

1977. NASA je objavila planove za izgradnju velike opservatorije za potrebe istraživanja gama-astronomije. *CGRO (Compton Gamma-Ray Observatory)* je lansirana 1991., ponevši sa sobom četiri glavna instrumenta koja su u velikoj meri poboljšala

---

<sup>1</sup> Visokoenergetske naelektrisane čestice.

rezoluciju  $\gamma$ -osmatranja. Ova opservatorija pružila nam je ogromnu količinu podataka uz čiju smo pomoć unapredili svoje razumevanje visokoenergetskih procesa u Svemiru. *CGRO* je uklonjen iz orbite posle devet godina usled kvara na jednom od žiroskopa.

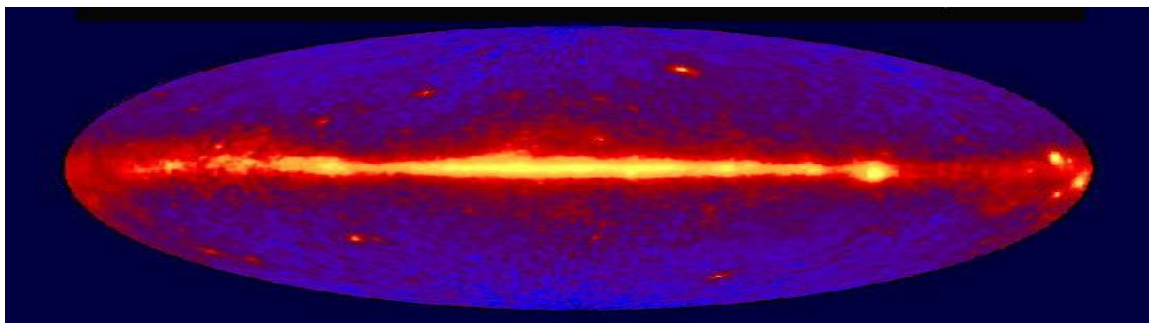
*COMPTEL* i *EGRET*, dva od četiri instrumenta *Compton Gamma-Ray* opservatorije naposljetku su nam otkrila i spektar difuzne galaktičke emisije (slika 1), mada je njena istaknutost na  $\gamma$ -nebu iznad 50 MeV bila poznata od najranijih dana  $\gamma$ -astronomije.

*BeppoSAX* je prvenstveno proučavao X-zračenje, ali je identifikacijom ne-gama parnjaka nekih  $\gamma$ -bljeskova otvorio put preciznom utvrđivanju njihovih položaja i optičkim posmatranjima njihovih bleđih ostataka u udaljenim galaksijama.

2004. godine lansiran je *NASA*-in *SWIFT* satelit sa instrumentima za posmatranje  $\gamma$ -bljeskova. Zabeležio je brojne X i optičke parnjake gama-bljeskova, što je uveliko olakšalo određivanje njihove udaljenosti, a eksperiment je kasnije praćen još detaljnijim osmatranjima u vidljivoj oblasti spektra. U ovom su periodu naučnici došli do zaključka da većina  $\gamma$ -bljeskova potiče od eksplozija masivnih zvezda (supernovih i hipernovih) u dalekim galaksijama.

Trenutno su najznačajnije svemirske  $\gamma$ -opservatorije *INTEGRAL* (*International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory*) i nekadašnji *GLAST* (*Gamma-Ray Large Area Space Telescope*) koji je preimenovan u *Fermi*. Međutim, visokoenergetski  $\gamma$ -zranci, sa energijama fotona oko 30 GeV mogu se detektovati i sa Zemaljskih opservatorija, pošto ekstremno mali fluks fotona na tim energijama zahteva efektivnu površinu detektora koja je nepraktično velika za svemirske instrumente. Na sreću, visokoenergetski fotoni stvaraju kišu sekundarnih čestica u našoj atmosferi, koja se relativno lako može posmatrati sa površine Zemlje. Najbolji rezultati u visokoj osetljivosti postižu se danas tehnikom *Imaging Atmospheric Cherenkov teleskopa*.

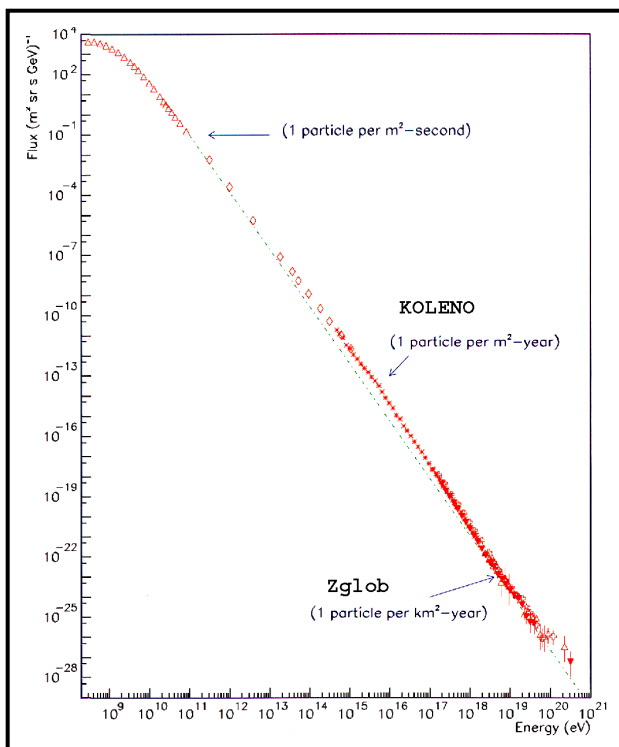
Osmatranja  $\gamma$ -astronomije još uvek su ograničena ne-gama pozadinom na nižim energijama, a na višim energijama brojem fotona koji se mogu detektovati. Evidentno je da su nam za napredak u ovoj oblasti astronomije potrebni veći detektori, kao i preciznije metode za prigušivanje pozadine.



Slika 1. Snimak čitavog neba na  $E \geq 100$  MeV, viđeno instrumentom *EGRET* sa svemirskog gama-teleskopa *CGRO*. Sjajni tačkasti izvori unutar galaktičke ravni su pulsari, dok se iznad i ispod diska najverovatnije vide blazari – aktivna galaktička jezgra sa džetom usmerenim ka Zemlji.

### 2.3. Veza kosmičkog i $\gamma$ -zračenja

Kosmički zraci su visokoenergetske čestice koje stižu na Zemlju iz udaljenih delova Vasiona. Spektar kosmičkog zračenja približno se može opisati stepenim zakonom sa indeksom -3, od približno 10 GeV do najviših, ikada posmatranih energija od  $\sim 10^{20}$  eV. Jedina odlika ovog spektra primećena ispod  $10^{18}$  eV je mala promena u nagibu sa -2,7 na -3,1 (na energiji  $\sim 3 \times 10^{15}$  eV) poznata kao *koleno* (slika 2). Zbog ovako neodređenog spektra smatra se da nastankom i prostiranjem kosmičkih zraka upravlja isti mehanizam na većim opsezima energije; jedan isti mehanizam barem je odgovoran za izgled spektra ispod kolena ( $\sim 10^{15}$  eV), a isti ili neki drugi proces upravlja izgledom spektra u oblasti iznad kolena. U međuvremenu, poreklo kosmičkog zračenja najviših energija još uvek ostaje nerazjašnjeno.



Slika 2. Spektar kosmičkog zračenja

Galaktičko kosmičko zračenje predstavlja važan segment međuzvezdane sredine. Energetska gustina relativističkih čestica iznosi  $\sim 1$  eV cm<sup>-3</sup> i uporediva je sa energetsom gustinom međuzvezdanog radijacionog polja, magnetnog polja i turbulentnim kretanjima međuzvezdanog gasa. Ovo čini kosmičke zrake jednim od suštinskih faktora koji određuju dinamiku i procese u međuzvezdanoj sredini.

Osmatranja galaksije *Mali Magelanov oblak* pokazala su da su kosmički zraci galaktički a ne „metagalaktički“ fenomen, dok su nam osmatranja *Velikog Magelanovog oblaka* pružila dokaze da je  $\gamma$ -emisija konzistentna sa kvazistatičkom ravnotežom kosmičkih zraka i međuzvezdane sredine.

Danas se smatra da su izvori kosmičkog zračenja supernove i SNRs (*supernova remnants*), pulsari, gusti objekti u tesno-vezanim dvojnim sistemima i zvezdani vetrovi. Proučavanje X i  $\gamma$ -emisije ovih objekata otkrilo nam je prisustvo energetskih čestica i posvedočilo o efikasnim procesima ubrzavanja u njihovoj blizini.

Razumevanje uloge kosmičkog zračenja u galaktičkoj difuznoj  $\gamma$ -emisiji od suštinske je važnosti za otkrivanje spektra ostalih komponenti difuzne emisije, koje imaju veliki značaj u mnogim oblastima istraživanja  $\gamma$ -astronomije, kako Galaktičke tako i vangalaktičke.

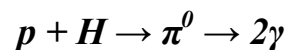


## 2.4. Difuzno galaktičko gama-zračenje

Difuzno  $\gamma$ -zračenje sastoji se od nekoliko komponenti: stvarne difuzne galaktičke emisije međuzvezdane sredine, doprinosa nerazlučenih i bledih galaktičkih tačkastih izvora i vangalaktičke pozadine. Galaktička difuzna emisija dominira nad ostalim komponentama i primećena je duž čitavog Mlečnog puta, mada daleko najviše zračenja dopire iz galaktičke ravni.

Emisioni mehanizmi visokoenergetskog  $\gamma$ -zračenja su sledeći:

- Netermalno bremštralung zračenje, koje nastaje interakcijom između elektrona kosmičkog zračenja i međuzvezdane materije.
- Inverzno Komptonovo rasejanje, koje je interakcija elektrona kosmičkog zračenja sa zvezdanim radijacionim poljem i kosmičkom mikrotalasnom pozadinom
- Raspad neutralnih piona, stvorenih hadronskim interakcijama između protona kosmičkog zračenja i međuzvezdane sredine. Pri ovom procesu, protoni se sudaraju sa jezgrima gasa međuzvezdane sredine (uglavnom vodonikom), pri čemu nastaju neutralni pioni koji se potom brzo raspadaju na dva  $\gamma$ -zraka:



Iako se protoni kreću po čitavoj Galaksiji, međuzvezdani gas je skoncentrisan u galaktičkom disku pa najviše  $\gamma$ -zračenja dolazi baš iz ravni Mlečnog puta.

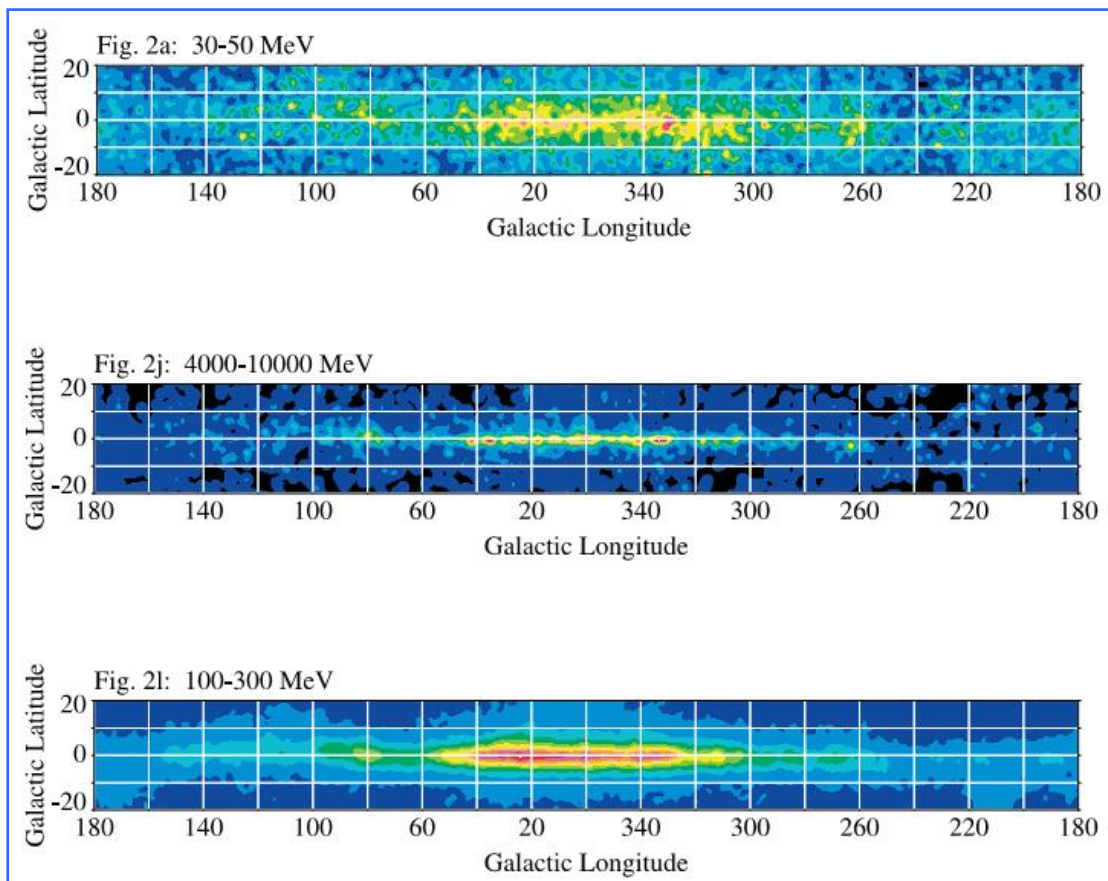
Smatra se da bi i anihilacija tamne materije, ukoliko je prisutna, u nekom malom procentu mogla da doprinese difuznom  $\gamma$ -zračenju.

Pomenuti emisioni procesi dominiraju u različitim oblastima elektromagnetnog spektra, pa nam  $\gamma$ -spektar može pružiti važne informacije o hadronskim i leptonskim komponentama kosmičkog zračenja i biti temelj za dalje istraživanje emisije vangalaktičke pozadine.

Dosadašnjim istraživanjima difuzne emisije mapiran je čitav Mlečni put na širokom opsegu energija (slika 3). Potvrđeno je da se modeli zasnovani na lokalno-izmerenom elektronskom i nukleonskom spektru podudaraju sa  $\gamma$ -merenjima u opsegu od 30-500 MeV, ali se van ove oblasti uočavaju znatni „viškovi“ (*eng. excesses*). Ovo razmimoilaženje između zabeleženih flukseva i teorijskih proračuna nazvano je *GeV-anomalija*. Bilo je pokušaja da se ona objasni strmijim (*eng. harder*) nukleonskim spektrom u udaljenim oblastima Galaksije, ali se on u suštini ne poklapa sa drugim merenjima kosmičkog zračenja. *GeV-anomalija* se uočava na svim galaktičkim latitudama i longitudama, što ukazuje da GeV-viškak nije odlika ograničena na oblast galaktičkog diska ili na gasno-zavisnu emisiju, mada je najuočljiviji u velikom halou oko središta Mlečnog puta. Jedno od trenutno ponuđenih rešenja (pored loše kalibracije *EGRET* instrumenta kojim je prvi put ustanovljena *GeV-anomalija*) predstavlja nerazlučeni izvori.

Raspodela tačkastih izvora na nebu (detektovanih *EGRET-om*) sugerirše da ih se velika većina nalazi u našoj Galaksiji. Tipična luminoznost izvora na niskim latitudama iznosi  $\sim(1-15)\times 10^{35}$  erg s<sup>-1</sup>, sa karakterističnim udaljenostima od 1 do 6 kpc. Gama-luminoznost pulsara *Vele* i *Geminge*, dva najsajjnija tačkasta izvora iz *3EG* kataloga, su svega  $10^{34}$  i  $10^{33}$  erg s<sup>-1</sup>. Stoga je jedna od glavnih poteškoća u proučavanju difuzne emisije razdvojiti *stvarnu* difuznu emisiju od one koja potiče od nerazlučenih izvora.

Opšte je prihvaćeno da je *GeV-anomalija* uniformna pojava (duž svih galaktičkih latituda) što navodi na zaključak da problem potiče od samog detektora usled sistematske greške u kalibraciji *EGRET* instrumenta[13]. Ovaj se negativni efekat još više pojačava na većim energijama, pa se javlja i TeV-višak[11], mada su za njega najverovatnije odgovorni nerazlučeni izvori, kao i nedovoljna osetljivost  $\gamma$ -detektora kojima su do sada vršena ispitivanja.



Slika 3. Mape difuzne galaktičke gama-emisije po longitudi i latitudi, za različite opsege energija, od 30 MeV do 10 GeV (10000 MeV).

### 2.4.1. Doprinos neutralnih piona

U fizici, *pion*<sup>2</sup> je naziv za svaku od tri subatomske čestice:  $\pi^0$ ,  $\pi^+$  i  $\pi^-$ . Do nastanka piona dolazi prilikom sudara protona sa međuzvezdanom materijom. Pioni spadaju u najlakše *mezone*<sup>3</sup> i igraju značajnu ulogu u objašnjavanju osobina jake nuklearne sile. Kako se smatra da se hadroni sastoje od kvarkova (za razliku od fotona i leptona), tako se pioni sastoje od dva kvarka, tačnije kvarka i antikvarka.

Pozitivni i negativni pioni imaju masu od  $139,6 \text{ MeV}/c^2$ , srednje vreme života od  $2,6 \times 10^{-8}$  sekundi a raspadaju se pri procesima slabe interakcije. Primarni raspad ovih čestica je čisto leptonski, kada od piona nastaje mion i njegov neutrino:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_{\mu}^+$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_{\mu}^-$$

Neutralni pioni imaju nešto manju masu od  $\pi^{\pm}$ . Ona iznosi  $134,9766(6) \text{ MeV}/c^2$ , dok im je srednje vreme života  $8,4 \times 10^{-17}$  sekundi. Ove se čestice raspadaju pri elektromagnetnim procesima, najčešće na dva fotona:

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$$

Prilikom drugog pionskog raspada (koji se, međutim, dešava sa mnogo manjom verovatnoćom) može doći do stvaranja para elektron-pozitron i jednog fotona:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + e^- + e^+$$

U suštini, ove čestice možemo smatrati posrednicima u privlačnoj interakciji između dva nukleona. Energetski spektar pionskog zračenja ima karakterističan oblik, koji sledi iz kinematike raspada neutralnih piona i konvolucije sa hadronskim spektrom kosmičkog zračenja. Izgled mu je simetričan (kada se predstavi kao  $\log dN/dE$  naspram  $\log E$ ) oko maksimuma na  $m_{\pi}/2 \approx 0,07 \text{ GeV}$ , sa dugim krilima ka višim i nižim energijama. U hadronskoj komponenti  $\gamma$ -zračenja dominira emisija neutralnih piona. Maksimalni pionski doprinos vangalaktičkom difuznom spektru zavisi od energije i opsega crvenog pomaka po kom su izvori raspodeljeni: on iznosi  $\sim 20\%$  za pione nastale u skorije vreme i  $\sim 90\%$  ako su nastali oko  $z = 10$ . Što se tiče galaktičke difuzne emisije, na energijama iznad  $100 \text{ MeV}$ , gama-zračenje raspada  $\pi^0$  može da čini samo oko  $50\%$  ukupnog galaktičkog  $\gamma$ -fluksa u odnosu na *EGRET* merenja[10], pod pretpostavkom da nastaje od kosmičkog zračenja sa spektrom  $\alpha = 2,75^4$ . Ostatak gama-zračenja verovatno se može pripisati bremštralungu i inverznom Komptonovom rasejanju.

<sup>2</sup> Skraćeno od pi mezon, u oznaci  $\pi$

<sup>3</sup> Spadaju u hadrone, čestice koje učestvuju u jakoj interakciji

<sup>4</sup> Spektralni indeks hadronske komponente kosmičkog zračenja

### 3. Mlečni put kao izvor difuznog gama-zračenja

Naša Galaksija predstavlja veliku prečkastu spiralu (tip SBbc) radijusa približno 30 kpc, koja sadrži oko 400 milijardi zvezda. Spiralni talasi gustine indukuju stvaranje svih zvezda u međuzvezdanom prostoru, pa i onih masivnih koje su ultimativno uzete za izvore kosmičkog zračenja (eksplozije supernovih). Iako je u zvezdama skoncentrisana većina barionske mase Galaksije, one nemaju nikakvog uticaja na difuznu  $\gamma$ -emisiju jer skoro uopšte ne zrače u  $\gamma$ -domenu. Najznačajnije doprinose galaktičkom difuznom zračenju daju međuzvezdani gas, međuzvezdano radijaciono polje i kosmički zraci.

Najveći deo međuzvezdanog gasa Mlečnog puta nalazi se u obliku atomskog (HI) i molekularnog ( $H_2$ ) vodonika.  $H_2$  je raspoređen po Galaksiji unutar radijusa oko 10 kpc, sa pikom na  $\sim 5$  kpc, uglavnom koncentrisan u gustim oblacima sa  $10^4$  atoma/cm<sup>3</sup> i masama od  $10^4$ - $10^6$  masa Sunca ( $M_s$ )<sup>5</sup>. Molekularni vodonik se ne može direktno detektovati na velikim skalama, pa se u tu svrhu kao dobar indikator koristi <sup>12</sup>CO, koji se gusto formira u blizini  $H_2$ .

Atomski gas se prostire do  $\sim 30$  kpc, sa površinskom gustinom koja raste sa udaljenošću od galaktičkog centra od  $1,9 M_s/pc^2$  za radijus  $R=6$  kpc do  $4 M_s/pc^2$  za  $R=7$ - $12$  kpc, a zatim opada do  $\sim 1 M_s/pc^2$  na  $R=17$  kpc [8]. Atomski vodonik se direktno mapira putem svoje 21cm linije, koja nam u isto vreme pruža informaciju i o udaljenosti i o gustini gasa.

Ispitivanje spektra međuzvezdanog gasa ima veliki značaj za određivanje strukture Mlečnog puta, određivanja udaljenosti u Galaksiji, utvrđivanje osobina lokalnih međuzvezdanih oblaka i tamnog gasa, kao i za procenu metaličnosti.

Međuzvezdano radijaciono polje (*eng. ISRF-interstellar radiation field*) od suštinske je važnosti za propagaciju elektrona (gubitke energije) i stvaranje  $\gamma$ -zračenja putem inverzne Komptonove emisije. Galaktičko radijaciono polje sastoji se od doprinosa zvezda, prašine i kosmičke mikrotalasne pozadine, što ga čini veoma kompleksnim fenomenom za istraživanje. Energetska gustina *ISRF* je funkcija galaktocentričkog radijusa. Stelarna emisija dominira na 0,1-10  $\mu m$ , emisija sa veoma sitnih čestica prašine daje svoj doprinos na 10-30  $\mu m$ , dok emisija sa prašine na  $T \sim 20K$  dominira na talasnim dužinama 20-300  $\mu m$ . Njegov spektar varira duž Mlečnog puta i sem *CMB*<sup>6</sup> ne može se direktno meriti.

Fluks kosmičkog zračenja može se direktno meriti samo u Sunčevom sistemu, a na nižim energijama čak i ova merenja podležu velikim korekcijama. Proračuni fluksa difuzne  $\gamma$ -emisije moraju se oslanjati na metode za definisanje gustine kosmičkog zračenja duž naše Galaksije.

---

<sup>5</sup> Masa Sunca iznosi  $1.9891 \times 10^{30}$  kg

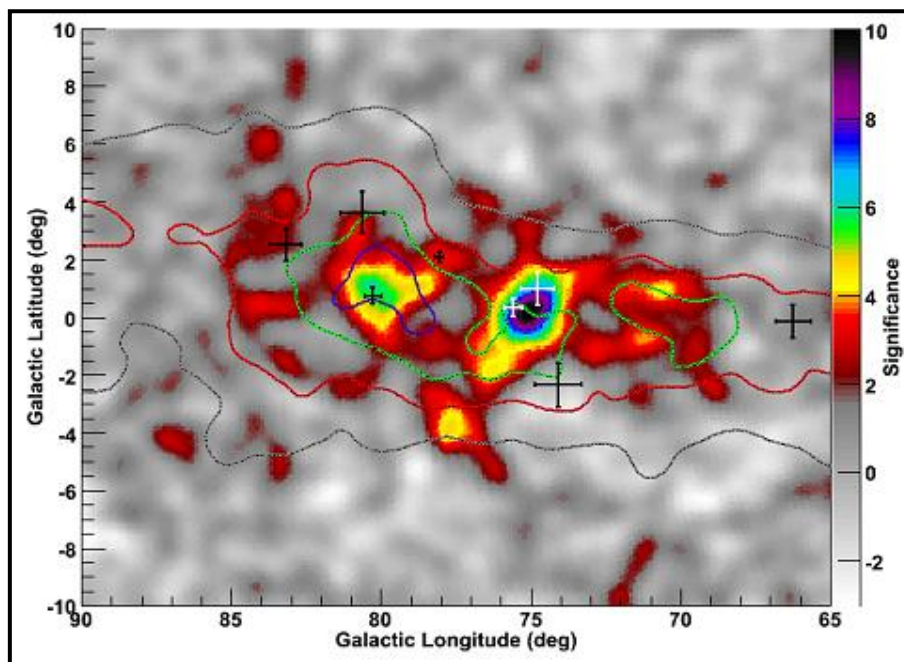
<sup>6</sup> Kosmička mikrotalasna pozadina – *eng. cosmic microwave background*

Jedan od najznačajnijih i najistaknutijih izvora  $\gamma$ -zračenja na čitavom severnom nebu svakako je oblast *Labuda* (slika 4) koja se prostire na  $l \in [65^\circ, 85^\circ]$  i  $b \in [-3^\circ, 3^\circ]$ . Zbog svog astrofizički komplikovanog okruženja i bogatstva različitih izvora zračenja, ovaj deo Galaksije predstavlja prirodnu laboratoriju za izučavanje difuzne  $\gamma$ -emisije.

Već je dugo vremena poznato da se u *Labudu* nalazi veliki broj molekularnih oblaka i gustog međuzvezdanog gasa koji uzrokuje jaku emisiju difuznog  $\gamma$ -zračenja, te da je ova oblast bila jedno od najproduktivnijih zvezdanih porodilišta u Mlečnom putu. Osmatranja koja su godinama vršena na svim talasnim dužinama otkrila su nam veliki broj interesantnih izvora, od kojih neki zrače i u TeV domenu [2], što ukazuje na postojanje akceleratora visokoenergetskih čestica kosmičkog zračenja, kao što su:

- Wolf-Rayet zvezde
- OB asocijacije
- Ostaci supernovih (SNRs)

Ispostavilo se da je TeV  $\gamma$ -fluks difuzne emisije iz oblasti Labuda za faktor  $\sim 5$  veći od predviđanja standardnog GALPROP modela [7]. Neka od mogućih objašnjenja za ovaj TeV-višak su da je lokalni fluks kosmičkog zračenja neobično nizak, da je lokalni spektralni indeks veći u odnosu na ostatak Galaksije ili da postoje neidentifikovani tačkasti izvori.



Slika 4. Oblast Labuda viđena u TeV domenu. Na sliku su superimponirane konture koje prikazuju gustinu materije u ovom delu Galaksije. Krstići pokazuju položaje EGRET izvora sa odgovarajućim greškama lokacije.

#### 4. Proučavanje galaktičkih $\gamma$ -izvora Milagro instrumentom

*Milagro*<sup>7</sup> (slika 5) je jedan od predstavnika savremenog tipa astronomskih instrumenata postavljenih na površini Zemlje, na planini u Novom Meksiku. Poput konvencionalnih teleskopa osetljiv je na svetlost, ali za razliku od „normalnih“ teleskopa on vidi Svemir na veoma visokim energijama. *Milagro* je prvi veliki vodeni Čerenkov detektor koji se, neprekidno radeći, koristi u gama-astronomiji. Sastoji se od vodenog basena zapremine 24 miliona litara, opremljenog sa 723 fotomultiplikatorske cevi (PMTs) koje su okružene sa 175 dodatnih vodenih rezervoara.



Slika 5. Milagro gama-detektor, Novi Meksiko

Gornji sloj od 450 fotomultiplikatora postavljen je na dubini od 1,3 metra i koristi se za okidanje detektora i rekonstrukciju smera primarnog kosmičkog ili  $\gamma$ -zraka. Donji sloj od 273 PMTs nalazi se na dubini od 6 metara i služi za merenje prodiruće komponente kiše čestica indukovane hadronskim kosmičkim zračenjem. Udaljenost između susednih fotomultiplikatora iznosi 2,7 m, pa oni obuhvataju ukupnu površinu od 4800m<sup>2</sup>. Cilindrični vodeni rezervoari raspoređeni su po oblasti od 34000m<sup>2</sup>, svaki prečnika 1,6m i dubine 1m. Svaki rezervoar je opremljen jednim fotomultiplikatorom, postavljenim na vrhu cilindra i usmerenim na dole, ka vodi.

*Milagro* je počeo sa radom 2000. godine prikupljajući podatke samo primarnim centralnim basenom. Nakon instalacije sekundarnih okidača (cilindričnih rezervoara) osetljivost mu je značajno poboljšana, približno za faktor 2, što je uticalo da se naše viđenje Kosmosa na visokim energijama dramatično promeni.

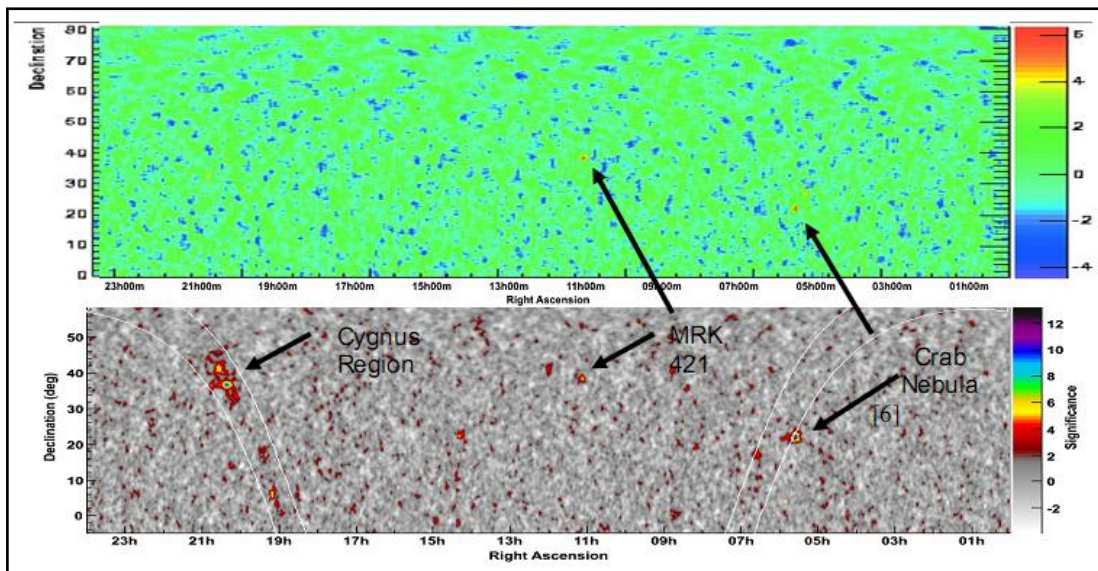
---

<sup>7</sup> Španska reč za čudo.

Najvažnija astronomska otkrića do kojih smo došli uz pomoć *Milagro*  $\gamma$ -teleskopa su sledeća [7]:

- Prva detekcija difuznog TeV  $\gamma$ -zračenja iz galaktičke ravni
- Mapiranje difuzne galaktičke  $\gamma$ -emisije na TeV energijama, uključujući detekciju oblasti Labuda sa velikom značajnošću (preko  $10\sigma$ )
- Otkriće novog, delimično rasprostrtog izvora TeV  $\gamma$ -zračenja u oblasti Labuda
- Moguća detekcija  $\gamma$ -bljeska sa prototip instrumentom „*Milagritom*“
- Detekcija TeV  $\gamma$ -zračenja iz aktivne galaksije *Mrk 501*
- Detekcija TeV  $\gamma$ -zračenja iz aktivne galaksije *Mrk 421*
- Detekcija TeV  $\gamma$ -zračenja iz magline Rak
- Utvrđivanje stroge gornje granice TeV emisije nekoliko  $\gamma$ -bljeskova
- Najosetljivija pretraga severnog neba na TeV energijama.
- Prva detekcija difuzne  $\gamma$ -emisije iz unutrašnjeg dela Galaksije

Osetljivost *Milagro* instrumenta dramatično je poboljšana dodavanjem spoljašnjih detektora, što se vidi na slici 6, gde su upoređeni raniji i sadašnji snimak iste oblasti neba.



Slika 6. Severno nebo viđeno u TeV gama-oblasti pomoću Milagra. Gornji snimak prikazuje nebo pre dodavanja dodatnih rezervoara, dok je donji snimak načinjen nakon njihove instalacije, gde su izvori Cygnus oblast, Mrk 421 i Maglina Rak mnogo vidljiviji nego ranije.

## 5. Ispitivanje difuznog galaktičkog $\gamma$ -zračenja na TeV energijama

Sa svojim širokim vidnim poljem i dugim vremenom osmatranja, *Milagro* opservatorija predstavlja idealan instrument za snimanje velikih regiona Severnog neba i detekciju difuzne emisije na veoma visokim energijama. U jednom od poslednjih izveštaja o prostornoj raspodeli difuzne emisije iz galaktičke ravni, *Milagro* kolaboracija je odredila fluks difuzne  $\gamma$ -emisije na srednjoj energiji od 15 TeV [1]. Merenja su izvršena za galaktičke longitude između  $30^\circ$  i  $110^\circ$ , zatim za longitude između  $136^\circ$  i  $216^\circ$ , a za latitute između  $-10^\circ$  i  $10^\circ$ . Podaci, prikupljeni u periodu između jula 2000. i novembra 2007.godine, analizirani su metodom koju je predstavio A.A. Abdo sa saradnicima [2]. U proračun su bili uključeni samo događaji sa deklinacijama između  $-7^\circ$  i  $81^\circ$ , dok u pomenutu analizu nije uračunata galaktička oblast na longitudama između  $111^\circ$  i  $135^\circ$ . Izmerene vrednosti *Milagro* flukseva prikazane su u Tabeli 1[1], zajedno sa statističkim značajem ( $\sigma$ ) i predviđanjima optimizovanog i standardnog GALPROP modela. Usvojena je konvencionalna vrednost za spektralni indeks hadronskog kosmičkog zračenja  $\alpha = 2.75$ .

Tabela 1. Gama-emisija iz galaktičke ravni na energiji  $\sim 15$  TeV.

Oblast za $ b  < 2^\circ$  ( $l, ^\circ$ )	Statistički značaj ( $\sigma$ )	Difuzni fluks ( $\times 10^{-13}$ TeV $^{-1}$ cm $^{-2}$ s $^{-1}$ sr $^{-1}$ )		
		Milagro*	GALPROP model	
			optimizovan	standardni
<b><math>30 &lt; l &lt; 65</math></b>	<b>5.1</b>	<b><math>23.1 \pm 4.5</math></b>	<b>20.0</b>	<b>4.9</b>
<b><math>65 &lt; l &lt; 85</math></b>	<b>8.6</b>	<b><math>21.8 \pm 2.5</math></b>	<b>10.2</b>	<b>2.7</b>
<b><math>85 &lt; l &lt; 110</math></b>	<b>1.3</b>	<b><math>&lt; 7.1</math></b>	<b>5.8</b>	<b>1.3</b>
<b><math>136 &lt; l &lt; 216</math></b>	<b>0.8</b>	<b><math>&lt; 5.7</math></b>	<b>3.1</b>	<b>0.9</b>

\*Greška predstavlja statističku nesigurnost

U ovom radu su korišćene samo prve dve vrednosti za  $l \in [30^\circ, 65^\circ]$  i  $l \in [65^\circ, 85^\circ]$ , kako bi se mogle uporediti sa ranijim osmatranjima na energiji od 3,5 TeV [4] izmerenim u oblasti od  $40^\circ$  do  $100^\circ$  galaktičke longitude. Srednja vrednost *Milagro* fluksa na 15 TeV dobijena je nalaženjem aritmetičke sredine, što sa sobom nosi određenu grešku, kao i razlika u oblastima posmatranja na različitim energijama.



Za određivanje spektra pionskog  $\gamma$ -zračenja korišćen je fit Pfrommer & Enßlin[9], po kom je:

$$F_{\pi^0} = N \left[ \left( \frac{2E}{m_{\pi^0} c^2} \right)^\delta + \left( \frac{2E}{m_{\pi^0} c^2} \right)^{-\delta} \right]^{-\frac{\alpha}{\delta}}$$

i gde se indeks  $\delta$  dobija kao  $\delta = 0,14 \cdot \alpha^{-1,6} + 0,44$ .

Ovaj fit je maksimalizovan kako ne bi premašio EGRET merenja, na osnovu čega je određen pionski  $\gamma$ -fluks ( $F_{\pi^0}$ ) na energiji od 15 TeV. Nakon ovoga, dobijeni pionski fluks upoređen je sa *Milagro* rezultatom ( $F_{Mn}$ ) iz 2008[1]. Ista procedura ponovljena je za energiju od 3,5 TeV, a rezultat je upoređen sa *Milagro* merenjem ( $F_M$ ) iz 2005[4].

**Analiza:** Prvo je određena srednja vrednost novog *Milagro* fluksa prema podacima iz Tabele 1, sa aproksimacijom da je dobijeni fluks reprezentativan za oblast  $l \in [40^\circ, 100^\circ]$ , kako bi se mogao uporediti sa EGRET podacima i starim *Milagro* rezultatima.

$$F_{Mn1} = 23,1 \times 10^{-13} \text{ TeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

$$F_{Mn2} = 21,8 \times 10^{-13} \text{ TeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

odakle je dobijeno:

$$F_{Mn}(15 \text{ TeV}) = \frac{F_{Mn1} + F_{Mn2}}{2} = 2,245 \times 10^{-12} \text{ TeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}.$$

Iz ovog poznatog fluksa određena je konstanta normalizacije ( $A$ ), uz pretpostavku spektra sa indeksom  $\alpha = 2,75$  koji tvrdi *Milagro* tim. Takođe pretpostavljamo da je TeV  $\gamma$ -fluks oblika:

$$F = A \cdot E^{-2,75}$$

pošto bi trebalo da prati spektar kosmičkog zračenja.

Odavde sledi da je:

$$A = \frac{F}{E^{-2,75}} = 3,81 \cdot 10^{-9}$$

Zatim je jednostavnom ekstrapolacijom na 3,5 TeV dobijena vrednost *Milagro* fluksa na ovoj energiji, kako bi se mogla uporediti sa merenjem iz 2005[4]:

$$F_{Ms}(3,5 \text{ TeV}) = A \cdot E^{-2,75} = 3,81 \cdot 10^{-9} \cdot (3,5 \text{ TeV})^{-2,75}$$

$$F_{Ms}(3,5 \text{ TeV}) = 1,228 \cdot 10^{-10} \text{ TeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

Dalje je sa maksimiziranog modela (grafik1)[11] očitana vrednost pionskog fluksa na energiji od 1 TeV, odakle je izračunata konstanta normalizacije ( $N$ ):

$$F_{\pi_{max}^0} \cdot E^2 = 1,777 \cdot 10^{-7} GeV cm^{-2} s^{-1} sr^{-1}$$

$$F_{\pi_{max}^0} = \frac{1,777 \cdot 10^{-7} GeV cm^{-2} s^{-1} sr^{-1}}{(10^3 GeV)^2} = 1,777 \cdot 10^{-13} GeV^{-1} cm^{-2} s^{-1} sr^{-1}$$

$$\text{Kako je sada: } N = \frac{F_{\pi_{max}^0}}{\left[ \left( \frac{2E}{m_{\pi^0} c^2} \right)^\delta + \left( \frac{2E}{m_{\pi^0} c^2} \right)^{-\delta} \right]^{\frac{\alpha}{\delta}}}$$

$$N = \frac{1,777 \cdot 10^{-13} GeV^{-1} cm^{-2} s^{-1} sr^{-1}}{\left[ \left( \frac{2 \cdot 10^3 GeV}{0,134976 \frac{GeV}{c^2} c^2} \right)^{0,4677} + \left( \frac{2 \cdot 10^3 GeV}{0,134976 \frac{GeV}{c^2} c^2} \right)^{-0,4677} \right]^{\frac{2,75}{0,4677}}} = 0,05243$$

Sada, kada smo dobili da konstanta normalizacije iznosi  $N = 0,05243$  možemo izračunati maksimalni pionski fluks na energijama od 3,5 TeV i 15 TeV. Odavde sledi da je:

$$F_{\pi^0}(3,5 TeV) = 0,05243 \cdot \left[ \left( \frac{7000 GeV}{0,134976 \frac{GeV}{c^2} c^2} \right)^{0,4677} + \left( \frac{7000 GeV}{0,134976 \frac{GeV}{c^2} c^2} \right)^{-0,4677} \right]^{-5,8798}$$

$$F_{\pi^0}(3,5 TeV) = 5,672 \cdot 10^{-12} TeV^{-1} cm^{-2} s^{-1} sr^{-1}$$

Istim postupkom dobijamo vrednost pionskog fluksa na 15 TeV koji iznosi:

$$F_{\pi^0}(15 TeV) = 0,05243 \cdot \left[ \left( \frac{30000 GeV}{0,134976 \frac{GeV}{c^2} c^2} \right)^{0,4677} + \left( \frac{30000 GeV}{0,134976 \frac{GeV}{c^2} c^2} \right)^{-0,4677} \right]^{-5,8798}$$

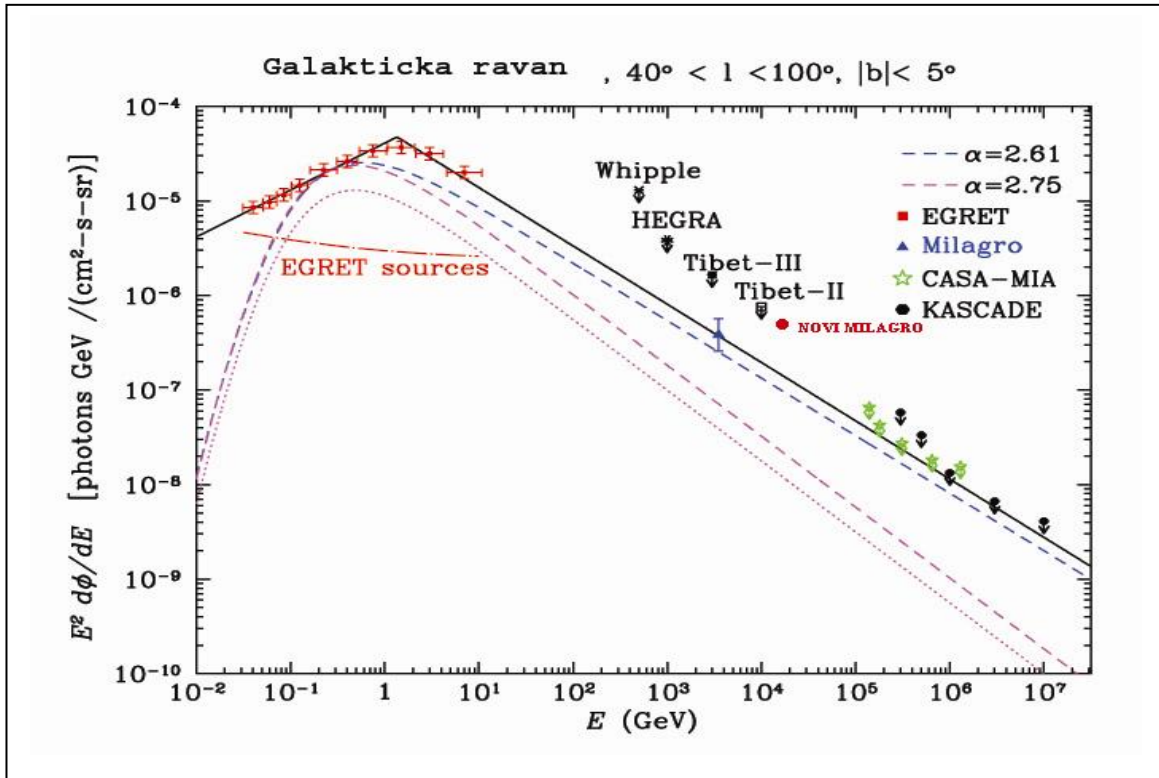
$$F_{\pi^0}(15 \text{ TeV}) = 1,037 \cdot 10^{-13} \text{TeV}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$$

Kako sada imamo sve neophodne vrednosti za upoređivanje, na kraju konačno dobijamo da udeo pionskog  $\gamma$ -fluksa ( $F_{\pi^0}$ ) u izmerenom difuznom *Milagro* fluxu ( $F_{Mn}, F_{Ms}$ ) iznosi  $\sim 4\%$ :

$$\frac{F_{\pi^0}(15 \text{ TeV})}{F_{Mn}(15 \text{ TeV})} = \frac{1,037 \cdot 10^{-13} \text{TeV}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}}{2,245 \cdot 10^{-12} \text{TeV}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}} = 0,046191$$

$$\frac{F_{\pi^0}(3,5 \text{ TeV})}{F_{Ms}(3,5 \text{ TeV})} = \frac{5,672 \cdot 10^{-12} \text{TeV}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}}{1,228 \cdot 10^{-10} \text{TeV}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}} = 0,046189$$

Srednja vrednost novog *Milagro* fluxa obeležena je na Grafiku 1 crvenom tačkom, kako bi bila uočljiva spram ostalih unetih flukseva.



Grafik 1. Difuzni  $\gamma$ -spektar galaktičke ravni u GeV-TeV-PeV režimu, u oblasti vidljivoj Milagru.

Na Grafiku 1 vidimo da su EGRET tačke i stari *Milagro* signal na 3,5 TeV empirijski dobro fitovani spektralnim indeksom  $\alpha = 2,61$  (puna linija). Maksimizovani pionski spektar označen je isprekidanim linijama; pionska emisija sa usvojenim spektralnim indeksom  $\alpha = 2,61$  (plava isprekidana linija) prilazi veoma blizu starog *Milagro* rezultata; sa druge strane, maksimalan pionski signal generisan kosmičkim zračenjem sa lokalno merenim  $\alpha = 2,75$  spektrom (ružičasta isprekidana linija) pada daleko od starog rezultata, ostavljajući *TeV-višak*. Tačkasta linija predstavlja normalizovani pionski spektar na energiji od 1 GeV. Na grafiku su prikazane i gornje granice za flukseve dobijene eksperimentima Whipple, HEGRA, Tibet II i III, CASA-MIA i KASCADE.

Na kraju, upoređeni su rezultati *Milagro* merenja ( $F_M$ ) iz 2005[4] sa fluksom dobijenim ekstrapolacijom novog merenja na energiju od 3,5 TeV ( $F_{Ms}$ ). Kako je po [4] integralni *Milagro* fluks  $\Phi_M(3,5 \text{ TeV}) = 6,4 \times 10^{-11} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ , prostim integraljenjem se dobija da je:

$$\Phi_M = k \int_{3,5}^{\infty} E^{-2,61} dE = k \frac{E^{-1,61}}{1,61} = k \cdot 0,0826$$

$$k = \frac{\Phi_M}{0,0826} = 7,744 \cdot 10^{-10}$$

Odavde dalje sledi da je:

$$F_M(3,5 \text{ TeV}) = k \cdot E^{-2,61} = 7,744 \cdot 10^{-10} \cdot (3,5)^{-2,61}$$

$$F_M(3,5 \text{ TeV}) = 2,927 \cdot 10^{-11} \text{ TeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

Naposletku dobijamo da je:

$$\frac{F_M}{F_{Ms}}(3,5 \text{ TeV}) = \frac{2,927 \cdot 10^{-11} \text{ TeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}}{1,228 \cdot 10^{-10} \text{ TeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}} = 0,2383.$$

## 5. Zaključak

Rezultati predstavljeni u ovom radu daju nam uvid u sledeće:

Ako bi se *Milagro* rezultat iz 2005[4] ekstrapolirao na energiju od 15 TeV bio bi niži od novog merenja, što nam govori da i na energijama iznad 3,5 TeV naizgled postoji *TeV-višak*, u poređenju sa predviđanjima modela.

Ranije je procenjeno [10] da maksimalni pionski  $\gamma$ -fluks iznosi  $\sim 50\%$  od *Milagro* merenja, a sada je dobijeno da on iznosi  $\sim 4\%$ .

Kako je *Milagro* difuzni fluks izračunat pod pretpostavkom hadronskog spektra sa indeksom  $\alpha = 2,75$  (koji je odabran da bi se poklopio sa spektrom kosmičkog zračenja na odgovarajućoj energiji), verovatno je da bi na visokim energijama spektar kosmičkog zračenja trebao biti plići (spektralni indeks  $< 2,75$ ).

Višak difuznog  $\gamma$ -fluksa može se objasniti na nekoliko načina:

1. U analizu je uračunata oblast Labuda  $l \in [65^\circ, 85^\circ]$  koja je sama po sebi jak izvor difuzne emisije i sveže ubrzanog kosmičkog zračenja, čiji je spektar sa indeksom  $\approx -2$ , te bi dao više  $\gamma$ -piona.
2. Kod *Milagro* osmatranja iz 2005[4] i 2008[1] postoji nepoklapanje u oblastima nad kojima je meren difuzni fluks.

Eksperimenti poput *GLAST-a*, sa svojom poboljšanom osetljivošću i razdvojnomoći u odnosu na *EGRET*, moći će da razdvoje stvarnu difuznu  $\gamma$ -emisiju od komponente potencijalno nerazlučenih izvora, te da ispituju prostornu raspodelu difuzne emisije na visokim energijama. Iz njihovih preliminarnih rezultata[17] već se vidi da će *GeV-višak* nestati, pa će verovatno nestati i *TeV-višak*, pošto je u ovom radu tražen maksimalni pionski  $\gamma$ -doprinos u odnosu na *EGRET* merenja.

Ovde predstavljeni rezultati i rezultati ranijih *Milagro* osmatranja pružaju nam nove dokaze o postojanju akceleratora kosmičkih zraka u oblasti Labuda[1], dajući prednost mehanizmima stvaranja hadrona.

Eksperimenti poput *HAWC*-detektora biće u stanju da neprekidno osmatraju velike oblasti neba, posebno galaktičku ravan, na  $\gamma$ -energijama do 100 TeV, sa osetljivošću 10 do 15 puta većom od *Milagra*.

Usavršavanje instrumenata  $\gamma$ -astronomije takođe bi postavilo striktnija ograničenja modelima poput *GALPROP-a*.

## 6. Literatura

- [1] A. A. Abdo et al.: A measurement of the spatial distribution of diffuse TeV gamma ray emission from the Galactic plane with Milagro, *Astrophysical Journal* 688 (2008) 1078-1083
- [2] A. A. Abdo et al.: Discovery of TeV gamma-ray emission from the Cygnus region of the Galaxy, *Astrophysical Journal Letters* 658 (2007) L33-L36
- [3] A. A. Abdo et al.: TeV gamma-ray sources from a survey of the Galactic plane with Milagro, *Astrophysical Journal Letters* 664 (2007) L91-L94
- [4] R. Atkins et al.: Evidence for TeV gamma-ray emission from a region of the Galactic plane, *Physical Review Letters* 95 (2005) 251103
- [5] X. J. Bi et al.: The diffuse GeV-TeV  $\gamma$ -ray emission of the Cygnus region, *Astrophysical Journal* 695 (2009) 883
- [6] S. Casanova and B. L. Dingus: Constraints on the TeV source population and its contribution to the Galactic diffuse TeV emission, *Astroparticle Physics* 29 (2008) 63-69
- [7] J. A. Goodman (Milagro Collaboration): Study of Galactic gamma ray sources with Milagro, *Journal of Physics: Conference series* 60 (2007) 123-126
- [8] I. V. Moskalenko, A. W. Strong, O. Reimer: Diffuse gamma rays: Galactic and Extragalactic diffuse emission, in a book "Cosmic Gamma-Ray Sources," eds. K.S. Cheng & G.E. Romero (Dordrecht: Kluwer), Astrophysics and Space Science Library v.304, Chapter 12, pp.279-310 (2004)
- [9] C. Pfromer and T. A. Ensslin: Constraining the population of cosmic ray protons in Cooling Flow clusters with  $\gamma$ -ray and radio observations: Are radio mini-halos of hadronic origin?, *Astronomy & Astrophysics* 426 (2004) 777-777
- [10] T. Prodanović and B. D. Fields: The pionic contribution to diffuse  $\gamma$ -rays: Upper limits, *Astroparticle Physics* 21 (2004) 627-635
- [11] T. Prodanović, B. D. Fields and J. F. Beacom: Diffuse gamma rays from the Galactic plane: probing the „GeV excess“ and identifying the „TeV excess“, *Astroparticle Physics* 27 (2007) 10-20
- [12] Dr Tijana Prodanović: Spektroskopija vasiona, skripta (2007)
- [13] F. W. Stecker et al.: The likely cause of the EGRET GeV anomaly and its implications, *Astroparticle Physics* 29 (2008) 25-29
- [14] A. W. Strong et al.: Diffuse Galactic continuum gamma rays: A model compatible with EGRET data and cosmic-ray measurements, *The Astrophysical Journal* 613 (2004) 962-976
- [15] Dr Miodrag Krmar: Nuklearna fizika, neautorizovana skripta (2006)
- [16] Dr Ištvan Vince: Obrada astronomskih osmatranja – skripta (2005)
- [17] A. A. Abdo et al.: Fermi Large Area Telescope Measurements of the Diffuse Gamma-Ray Emission at Intermediate Galactic Latitudes, *Physical Review Letters* 103 (2009) 251101.

## ***Biografija***



*Danica Drašković (rođ. Vukelić) rođena je 22.08.1974. godine u Novom Sadu. 1993. godine završila je gimnaziju "Svetozar Marković" u Novom Sadu – pedagoški smer.*

*2004. godine upisala je Prirodno-matematički fakultet na departmanu za fiziku, smer astronomija (sa astrofizikom).*