



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO-MATEMATIČKI  
FAKULTET  
DEPARTMAN ZA FIZIKU



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ  
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

ПРИМЉЕНО:	15. 06. 2010.
ОРГАНИЗЈЕД:	БРОЈ
0603	3 / 709

# Doprinos normalnih galaksija v angalaktičkom gama zračenju

- diplomski rad -

Mentor:  
dr Tijana Prodanović

Kandidat:  
Zoran Praštalo

Novi Sad, 2010.

## SADRŽAJ:

Uvod .....	3
1. Kosmičko zračenje.....	5
1.1. Šta su kosmički zraci? .....	5
1.2. Sastav kosmičkog zračenja .....	7
2. Veza kosmičkog i difuznog gama zračenja .....	9
2.1. Procesi ubrzavanja i interagovanja kosmičkog zračenja .....	9
2.2. Pionsko gama zračenje .....	10
3. Difuzno gama zračenje .....	14
3.1. Galaktička difuzna emisija .....	14
3.1. „GeV višak“ .....	16
3.2. Vangalaktička difuzna pozadina .....	19
4. Podaci .....	22
5. Rezultati i diskusija .....	26
Zaključak .....	28
Literatura: .....	29



# Uvod

Gama astronomija u poslednjim decenijama doživljava veoma buran razvoj. Ako se osvrnemo malo unazad, videćemo da je naučnicima još pedesetih godina prošlog veka bilo jasno da u Univerzumu moraju postojati procesi koji za rezultat daju gama zračenje. Kako velika većina gama zračenja biva apsorbovana u Zemljinoj atmosferi, ono nije moglo biti detektovano sve do ere prvih vanatmosferskih letelica i balona. Od tada pa do danas prikupljeni su mnogobrojni podaci o gama zračenju koje nam stiže iz Kosmosa. U orbiti oko Zemlje je mnoštvo satelita sa kompletним opservatorijama i mernim stanicama, tako da je i sveukupno znanje veoma poboljšano. Ono što je danas nesumnjivo i neosporno jeste da gama zračenje dopire do nas iz svih pravaca Univerzuma.

Pojedinačni astrofizički objekti koji emituju gama zračenje su raznoliki. U njih spadaju: eksplozije supernovih (koje obogaćuju međuzvezdanu sredinu težim elementima), zatim gama bljeskovi, neutronske zvezde, pulsari, akrecioni diskovi u blizini crnih rupa, aktivne galaksije, normalne galaksije, jata galaksija, sudari velikih struktura, i na kraju, nerazlučeni objekti, koji se za sada tako klasifikuju jer postojeći instrumenti nisu dovoljno dobri da ih precizno odrede.

Takođe su od značaja i hipotetički procesi u kojima nastaje gama zračenje a za čijim se posmatračkim dokazom intenzivno traga u poslednje vreme. U njih spadaju: isparavanje primordijalnih crnih rupa, anihilacija hladne tamne materije u galaktičkim haloima, barion-antibarionska anihilacija na velikim skalama, i dr.

Pored svih pomenutih izvora, na našem nebnu veoma je uočljivo i tzv. difuzno gama zračenje, koje dolazi iz svih pravaca Galaksije, ali i izvan nje. Difuzni galaktički gama zraci nastaju u energetskim reakcijama nukleona sa gasom, preko produkcije neutralnog piona, i elektrona, preko inverznog komptonovskog rasejanja i bremštralunga (zakočnog zračenja). Pomenuti nukleoni i elektroni ulaze u sastav kosmičkog zračenja, dok gas čini međuzvezdanu materiju. Ovom, difuznom gama zračenju doprinos takođe daje i sinhrotronska emisija. Prethodno pomenuti procesi su dominantni u različitim delovima spektra. Stoga, ako je „dešifrovan“, spektar  $\gamma$ -zračenja može da obezbedi informacije o spektrima nukleonskih i leptonskih komponenti kosmičkog zračenja. Iz ovog razloga će, u prvom i drugom poglavljju rada, biti dat opis kosmičkog zračenja i njegove uzročno – posledične veze sa difuznim gama zračenjem.

U ovom radu će prvenstveno biti opisano difuzno gama zračenje energije iznad 0,1 GeV, što bi značilo da će se ispitivati procesi sa najvišim energijama u Univerzumu. Akcenat će biti stavljen na vangalaktičku komponentu difuzne emisije, čije je prisustvo posmatrački dokazano. Međutim, mora se priznati da današnja nauka još uvek nema moćan alat za njeno precizno određenje, tj. njeno izdvajanje iz ukupne difuzne emisije. Određenje vangalaktičke difuzne pozadine (EGRB – *Extragalactic Radiation Background*) se zasniva na oduzimanju galaktičkog doprinosa ukupnoj difuznoj emisiji, ali i doprinosa od diskretnih izvora. Vangalaktičkoj difuznoj pozadini doprinose raznoliki izvori, ali je dokazano da su normalne i aktivne galaksije sigurni emiteri gama zračenja. S obzirom da su normalne galaksije u gama

opsegu individualno nerazlučene<sup>1</sup>, njihovo kolektivno gama zračenje će se videti kao vangalaktička difuzna pozadina. Kako su one veoma brojne, očekuje se da će njihov doprinos vangalaktičkoj difuznoj pozadini biti većinski. Taj doprinos je ono što će se tražiti u ovom radu. Za postizanje tog cilja potrebno je iskoristiti nekoliko posmatračkih činjenica, ali i usvojiti neke razumne pretpostavke. Naime, posmatrački je dokazano da je Univerzum bogat objektima poput naše galaksije, pa ćemo pretpostaviti da sve normalne galaksije imaju slične osobine, u pogledu nastanka gama zračenja, kao naš Mlečni Put. Tu se, pre svega misli na brzinu formiranja zvezda i odnos gas-masa<sup>2</sup>, za koje pretpostavljamo da su isti za one galaksije koje se nalaze na istom crvenom pomaku.

Difuzno gama zračenje u našoj galaksiji nastaje prevashodno u hadronskim interakcijama. Za energije iznad pomenutih 0,1 GeV, velika većina fluksa gama zračenja nastaje raspadom neutralnih piona. Stoga, ako ovaj parametar primenimo na sve normalne galaksije, čije gama zračenje daje doprinos vangalaktičkoj pozadini, možemo reći sledeće: ideo pionskog gama zračenja u ukupnoj difuznoj pozadini je isto što i ideo normalnih galaksija u ukupnoj difuznoj pozadini. Teško je reći da se može postaviti stroga jednakost između ova dva udela, ali je sigurno da pionski doprinos EGRB-u daje bar minimalan tj. „siguran“ ideo normalnih galaksija u EGRB. To je tako jer, kao prvo, zanemarujemo doprinos zračenja iz inverznog komptonovskog efekta i bremštralunga. Kao drugo, u svakoj normalnoj galaksiji pored difuznog gama zračenja postoje i diskretni izvori, koji doprinose ukupnom gama zračenju svake galaksije. Tu se misli na neutronske zvezde, pulsare, eksplozije supernovih, itd. Ovi diskretni izvori su poznati u našoj galaksiji pa se pri računanju difuzne galaktičke emisije efektivno isključuju iz doprinosa.

Takođe, kada kažemo „sve normalne galaksije“ onda se to odnosi samo na one koje realno doprinose difuznoj pozadini jer, na primer, eliptične galaksije nemaju međuzvezdani gas pa samim tim ni ne mogu značajno stvarati difuznu gama emisiju. Ta njihova osobina ih efektivno isključuje iz difuzne pozadine i kažemo da EGRB u najvećoj meri stvaraju objekti poput našeg Mlečnog Puta.

Za fluks pionskog gama zračenja u vangalaktičkoj pozadini iskoristićemo model po kome je pionski spektar dat kao kolektivno pionsko zračenje svih galaksija od crvenog pomaka  $z = 0$  do  $z = 10$ , za neku usvojenu raspodelu galaksija po pomacima. Model su razradili Prodanović & Fields 2005 [1].

Za određivanje vrednosti fluksa ukupnog vangalaktičkog gama zračenja iskoristićemo podatke koje je dao Fermi<sup>3</sup> u avgustu 2009. godine.

Deobom ova dva fluksa dobijemo ukupan doprinos normalnih galaksija vangalaktičkom gama zračenju. Krajnji rezultat ćemo uporeediti sa najnovijim preliminarnim rezultatima koje daje Fermi, ali i prodiskutovati razlike i sličnosti sa rezultatima radova koji se baziraju na podacima koje je dala prošla EGRET misija.

<sup>1</sup> Tačnije, za sada su razlučeni samo Veliki Magelanov Oblak i Mali Magelanov Oblak, a od trenutne misije se očekuje da razluči još najviše dve.

<sup>2</sup> Misli se na odnos mase gasa i ukupne mase galaksije.

<sup>3</sup> U pitanju je Fermi misija, čije će specifikacije i ciljevi biti detaljnije pomenuti tokom narednih poglavlja u radu.

# 1. Kosmičko zračenje

## 1.1. Šta su kosmički zraci?

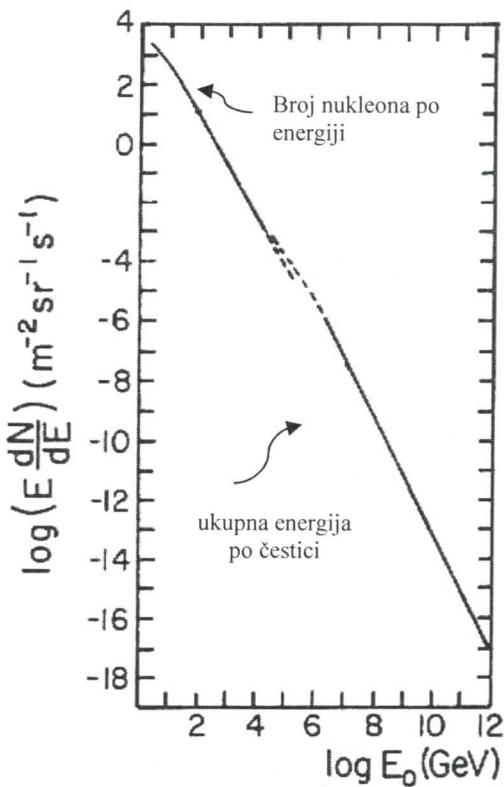
Kosmičko zračenje je sastavljeno od brzih i nanelektrisanih čestica koje ispunjavaju Galaksiju pa, između ostalog, pogadaju i Zemljinu atmosferu, sa vrednošću fluksa od oko 1000 čestica po kvadratnom metru i sekundu. To su jonizovana jezgra, tačnije oko 90% su protoni, 9% su alfa čestice, a ostatak su teži elementi i elektroni (beta minus čestice), i svi se oni razlikuju po svojim energijama, što opet govori o raznolikosti izvora kosmičkog zračenja. Najveći postotak zračenja su relativističke čestice i imaju energije koje su uporedive sa njihovim masama, ili su nešto veće od njih. Samo manji deo ima tzv. „ultra-relativističke“ energije, koje se protežu do čak  $10^{20}$  eV (oko 20 J), što je za 11 redova veličine veće od odgovarajuće energije mase mirovanja protona. Poznato je da su i dalje na snazi neka osnovna pitanja fizike kosmičkog zračenja, kao na primer: „Odakle nam dolazi ovo zračenje?“, a posebno „Kako su ove čestice ubrzane do tako visokih energija?“

Odgovori na ova pitanja još nisu potpuni. Poreklo najvećeg dela kosmičkog zračenja, onog sa energijama od  $\sim 1$  pa do  $\sim 10^5$  GeV po nukleonu, najbolje se opisuje ubrzanjima u udarnim talasima supernovih, koji se prostiru u turbulentnim magnetnim poljima Galaksije. Jasno je da velika većina kosmičkog zračenja dolazi iz regiona van Sunčevog sistema, ali isto tako je gotovo sigurno da nam ono dolazi, u najvećoj meri, iz naše galaksije. Uočeno je da veliki deo kosmičkog zračenja nije u korelaciji sa solarnim aktivnostima a čak biva i potpuno odsutno u regionima oko Sunca (naravno i samog Sunca) za vreme najintenzivnijih solarnih vetrova tj. erupcija magnetizovane plazme. Čestice kosmičkog zračenja sa najvišim energijama imaju žiroradijuse, u tipičnim galaktičkim magnetnim poljima, koji su veći od veličine radijusa Galaksije. Stoga, one mogu biti vangalaktičkog porekla.

Kosmičko zračenje se deli na dva dela, i to na primarno kosmičko zračenje i sekundarno kosmičko zračenje. Kosmičko zračenje koje nastaje ubrzavanjem u magnetnim poljima supernova remnanata (SNR) je primarno; ovi primarni kosmički zraci interaguju sa međuzvezdanom materijom i kao produkti tih reakcija javlja se sekundarno kosmičko zračenje.

Veličine koje su ključne za razumevanje porekla kosmičkog zračenja su relativna zastupljenost različitih jezgara (sastav) i raspodela čestica po energiji (spektar). Ove dve veličine nam mogu reći sve o mehanizmu njegovog ubrzavanja i o njegovim interakcijama od izvora do nas.

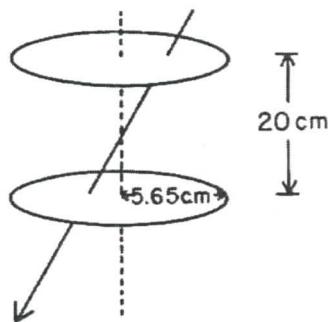
Slika 1.1 daje uopšteni pregled kompletног spektra kosmičkog zračenja. Zbog veoma velikog opsega energija i flukseva, pogodno je koristiti logaritamsku skalu,  $EdN / dE = dN / d \ln E$ . Na taj način se može prikazati veoma veliki opseg na vertikalnoj osi.



Slika 1.1: Spektar kosmičkog zračenja. U visokoenergetskom delu spektra kriva predstavlja broj čestica sa datom ukupnom energijom po nukleonu, po jedinici površine i vremena, i prostornom uglu. Niskoenergetski deo spektra prikazuje broj nukleona kao funkciju energije po nukleonu. (Izvor: [2]).

Prikazani spektar se približno fituje stepenim zakonom  $dN / dE \propto E^{-\alpha}$ , gde je  $\alpha \approx 2,75$  i naziva se spektralni indeks kosmičkog zračenja. Iz spektra se jasno vidi da sa povećanjem energije fluks naglo opada. Jedina upadljiva pojava u ovom spektru je takozvano „koleno“, koje se nalazi na  $\sim 3 \times 10^{15}$  eV i na tom mestu se menja nagib tj. vrednost spektralnog indeksa sa  $\alpha = 2,7$  na  $\alpha = 3,1$ .

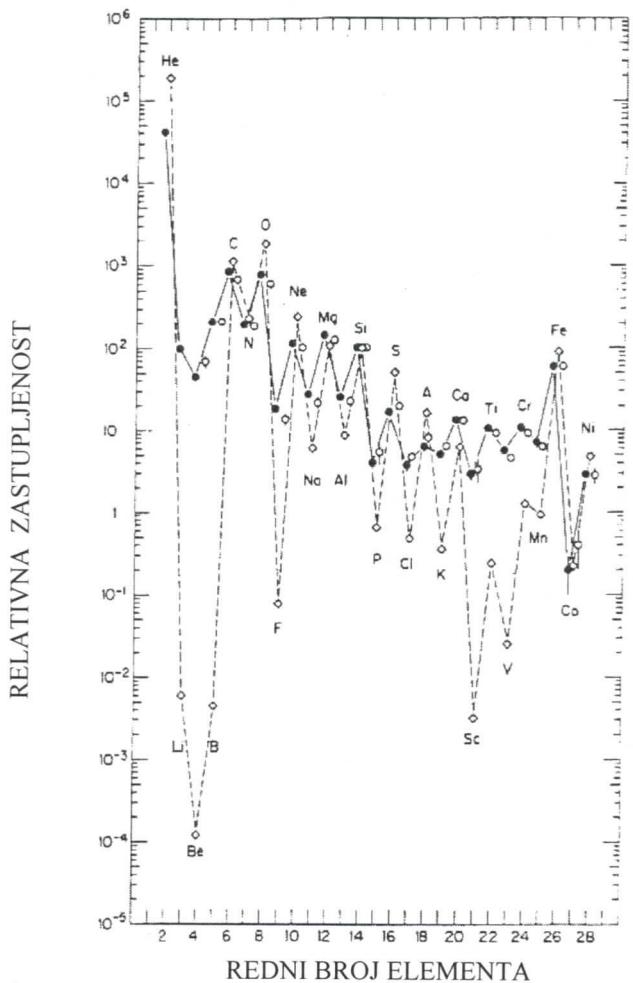
Na energiji od oko 1 GeV, približno 10 čestica u sekundi prođe kroz detektor kosmičkog zračenja koji se sastoji od dve ravni, površine  $100 \text{ cm}^2$ , međusobno odvojenih za 20 cm (slika 1.2.). Stoga je samo mali detektor, koji kruži vrhom atmosfere u balonu ili satelitu, dovoljan za proučavanje sastava kosmičkog zračenja u GeV energetskom opsegu.



Slika 1.2: Shematski prikaz malog detektora koji propušta kosmičko zračenje. (Izvor: [2]).

## 1.2. Sastav kosmičkog zračenja

Relativne zastupljenosti elemenata kosmičkog zračenja se mogu uporediti sa zastupljenjušću elemenata u Sunčevom sistemu (slika 1.3).



Slika 1.3: Zastupljenosti elemenata u kosmičkom zračenju (He-Ni) merenih na Zemlji u poređenju sa zastupljenostima elemenata u Sunčevom sistemu, sve u odnosu na silicijum. Simboli imaju sledeće značenje: puni kružnici predstavljaju nisko-energetske podatke,  $70 - 280 \text{ MeV}/A$ ; prazni kružnici predstavljaju visoko-energetske podatke,  $1000 - 2000 \text{ MeV}/A$ . Zastupljenosti elemenata u Sunčevom sistemu su prikazane romboidima. (Izvor: [2]).

Postoje dve ključne razlike između ova dva sastava:

Prvo, jezgra sa  $Z > 1$  su mnogo zastupljenija u kosmičkom zračenju nego u Sunčevom sistemu. Ova činjenica još nije dobro shvaćena ali može imati veze sa tim da je vodonik relativno teško ionizovati da bi stupio u proces ubrzanja, ili može da oslikava originalnu razliku u sastavu na samom izvoru.

Druga razlika je dobro shvaćena i veoma je značajan činilac za razumevanje prostiranja i zadržavanja kosmičkog zračenja u Galaksiji. Dve grupe elemenata Li, Be, B i Sc, Ti, V, Cr, Mn su za mnogo redova veličine zastupljenije u kosmičkom zračenju nego u

materijalu Sunčevog sistema. Ovi elementi se ne mogu naći kao krajnji produkti stelarne nukleosinteze. Oni su, međutim, prisutni u kosmičkom zračenju kao produkti spalacije jezgara ugljenika i kiseonika (Li, Be, B) i gvožđa (Sc, Ti, V, Cr, Mn). Oni nastaju u sudejima kosmičkih zraka sa međuzvezdanom materijom (ISM – *Interstellar Matter*). Poznavajući preseke spalacionih reakcija i merenjem zastupljenosti ovih elemenata (npr. Be), može se izvući podatak o količini materije kroz koju prođe kosmičko zračenje, između mesta njegovog nastanka i posmatranja. Za veliku većinu kosmičkog zračenja, prosečna količina materije kroz koju ono prođe je  $X = 5$  do  $10 \text{ g/cm}^2$  [2]. Gustina u disku Galaksije,  $\rho_N$ , je reda veličine jedan proton po kubnom centimetru, pa ova debljina materijala galaktičkog diska odgovara sledećem rastojanju:

$$l = X / (m_p \rho_N) = 3 \times 10^{24} \text{ cm} \approx 1000 \text{ kpc}.$$

S obzirom da kosmičko zračenje „potroši“ izvesno vreme u mnogo prozračnijem galaktičkom halou, ovo je donja granica za rastojanje koje pređe kosmičko zračenje. U svakom slučaju važi da je  $l \gg d \approx 0,1 \text{ kpc}$ , za koje se zna da predstavlja poludebljinu galaktičkog diska. Ovo ukazuje na to da je prostiranje kosmičkih zraka difuzan proces u kojem čestice dugo vremena potroše krećući se kroz Galaksiju, pre nego što je napuste.

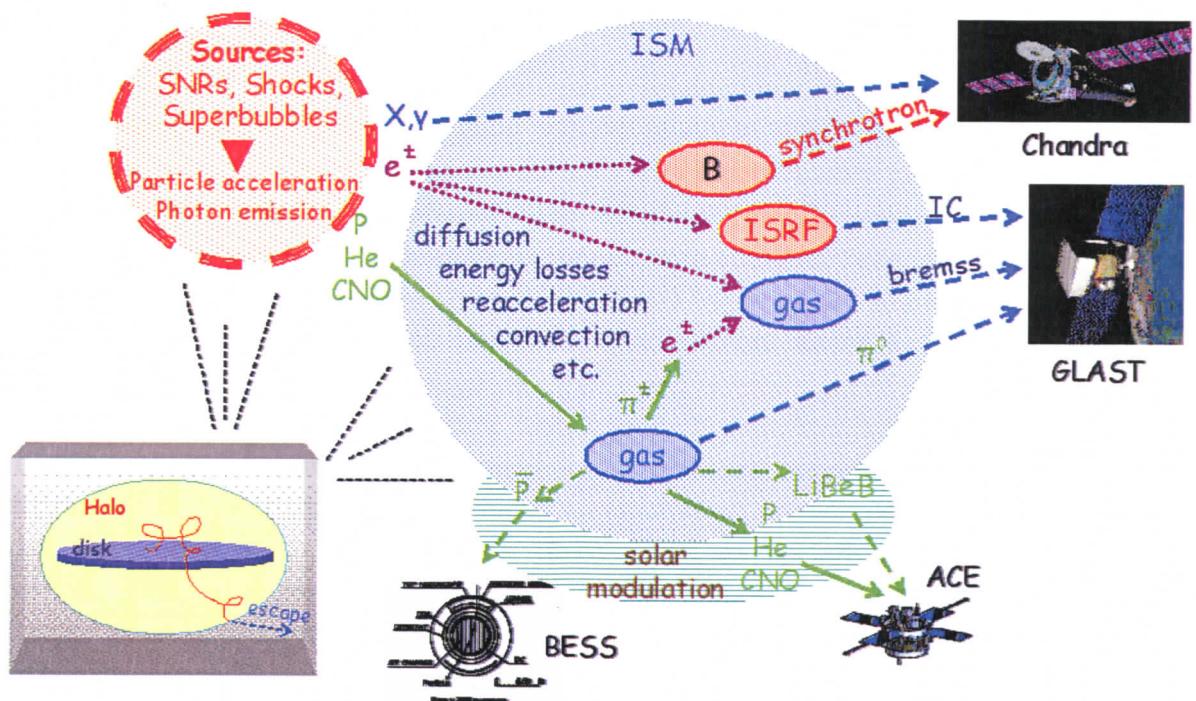
## 2. Veza kosmičkog i difuznog gama zračenja

### 2.1. Procesi ubrzavanja i interagovanja kosmičkog zračenja

Merenja odnosa primarnih i sekundarnih jezgara vode do sledećih zaključaka:

- (1) U proseku, kosmički zraci u GeV opsegu pređu preko  $5 - 10 \text{ g/cm}^2$  ekvivalenta vodonika između nastanka i posmatranja.
- (2) Ova količina materije opada kako energija raste.

Kako je količina materije duž linije posmatranja („gramaža“) kroz disk Galaksije oko  $10^{-3} \text{ g/cm}^2$ , stavka (1) implicira da kosmički zraci u toku svog života prelaze distance i do hiljadu puta veće od debljine diska Galaksije. Ovo, pak, nalaže difuziju unutar zapremine u kojoj se zadržava kosmičko zračenje, bilo da je u pitanju jedan deo ili ceo disk Galaksije. Činjenica da količina pređene materije opada sa povećanjem energije ukazuje na to da kosmički zraci sa višim energijama potroše manje vremena krećući se kroz Galaksiju, pre nego što je napuste. To takođe ukazuje i na to da veliki deo kosmičkog zračenja stupa u procese akceleracije pre nego što započnu njegove interakcije u ISM. Ako se, sa druge strane, procesi ubrzavanja i reakcija sa česticama dešavaju istovremeno, može se očekivati konstantan odnos sekundarnih i primarnih jezgara kosmičkog zračenja (ili čak opadajući odnos za neke stohastičke mehanizme u kojima je potrebno više vremena za ubrzavanje čestica do visokih energija).



Slika 2.1. Shematski prikaz interagovanja kosmičkog zračenja u Galaksiji tj. procesa koji daju sekundarna jezgra, elementarne čestice i gama zračenje. (Izvor: [3]).

Ubrzavanje i interagovanje kosmičkog zračenja su, međutim, veoma blisko povezani procesi. U teoriji po kojoj se čestice ubrzavaju u udarnim talasima supernovih naročito značajnu ulogu za ubrzanje, ali i za stupanje u reakcije, ima difuzno rasejanje čestica usled poremećaja u magnetnom polju. Povrh toga, s obzirom da se ubrzanje odvija kako se supernova remnanti šire interstelarnim medijumom (slika 2.1.), nema oštре granice između ubrzavanja čestica kosmičkog zračenja i njihovog stupanja u reakcije.

## 2.2. Pionsko gama zračenje

Ključ za razumevanje prostiranja i reaktivnosti kosmičkog zračenja je u nastanku sekundarnih čestica tj. sudarima primarnih kosmičkih zraka sa gasom koji čini međvezdanu materiju. Gama zraci i antiprotoni predstavljaju sigurne pratioce primarnih protona, koji su dominantna komponenta. Pomenuti gama zraci su, u velikoj većini slučajeva, produkti reakcije protona kosmičkog zračenja sa protonom iz gasa međvezdane materije, gde nastaje neutralan pion koji se potom raspada na dva  $\gamma$ -zraka:



Druga važna karakteristika je da gama zraci, s obzirom da su elektroneutralni, prate prave linije, za razliku od nanelektrisanih čestica koje se kreću duž komplikovanih trajektorija usled kompleksnog interstelarnog magnetnog polja. Stoga se gore pomenuta reakcija i fotoni koji u njoj nastaju mogu iskoristiti za direktno mapiranje regiona u kojima kosmičko zračenje interaguje sa materijom.

Antiprotoni, kao i protoni, difunduju u galaktičkom magnetnom polju i stoga ne mapiraju svoje poreklo. Međutim, zbog njihove relativno velike mase, prag za produkciju antiprotona je visok (kinetička energija od 5,6 GeV) a verovatnoća produkcije strog zavisi od energije. Kao rezultat, antiprotoni neke određene energije mogu da nastanu samo u interakcijama primarnih čestica koje imaju mnogo veću energiju. Sekundarna jezgra, sa druge strane, imaju suštinski istu energiju po nukleonu kao i odgovarajuća roditeljska jegra.

Fotoni, neutrini, elektroni, pozitroni i antinukleoni kosmičkog zračenja nastaju u reakcijama u ISM. Oni takođe mogu nastajati i u diskretnim izvorima (npr. u pomenutim supernova remnantima), a nanelektrisane čestice mogu biti direktno ubrzane, ali ti slučajevi će u ovom radu biti pomenuti samo ilustrativno jer je akcenat na difuznim procesima. Spektri sekundarnih čestica imaju neke zajedničke karakteristike, premda postoje specifične razlike usled različitih masa i lanaca raspada. Tako, izrazi za spekture sekundarnih elektrona i pozitrona slični su antiprotonskim spektrima, ali sa bitnom razlikom u značaju energetskih gubitaka usled sinhrotronskog zračenja u galaktičkom magnetnom polju pa oni moraju da se uvrste u proračune. Stoga oni postaju malo komplikovaniji.

Funkcija izvora kosmičkog zračenja je broj sekundarnih čestica koje nastaju po kubnom centimetru, po sekundu, i po jediničnom intervalu energije na položaju  $\vec{r}$ . Kada je u pitanju fluks primarnog kosmičkog zračenja,  $\phi(E_i) = dN_i / dE_i$ , funkcija izvora se može izraziti kao [2]:

$$q_k(E_k, \vec{r}) = \int \frac{d\sigma_{i \rightarrow k}(E_k, E_i)}{dE_k} \left( \frac{c\rho(\vec{r})}{m} \right) \left( \frac{4\pi}{c} \phi(E_i) \right) dE_i \quad (2)$$

To je opšti izraz funkcije izvora za sve sekundarne čestice, označene indeksom  $k$  (primarne su označene indeksom  $i$ ). Ako je sekundarna čestica nastala kao krajnji produkt raspadnog lanca (npr.  $\pi^0 \rightarrow \gamma$  ili  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow \nu_e$ ), tada je diferencijalni efikasni presek, koji figuriše u gornjem izrazu, odgovarajuća konvolucija proizvoda efikasnog preseka i raspodele raspada. U jednačini (2) figuriše i član  $\rho(\vec{r})$  koji predstavlja gustinu gasa međuzvezdane materije, na datom položaju.

Fluks koji se meri na Zemlji različito se računa u zavisnosti da li je sekundarna čestica neutralna ili nanelektrisana. U slučaju fotona, koji su elektroneutralni, opšti izraz za spektar intenziteta  $\gamma$ -zračenja, na energiji  $E_\gamma$ , u nekom smeru, dat je integralom po liniji posmatranja [4]:

$$I(E_\gamma) = \frac{1}{4\pi} \int_{\text{os}} q(E_\gamma, r) ds = \frac{1}{4\pi} \int_{\text{os}} \Gamma(E_\gamma) n_H(\vec{r}) ds \quad (3)$$

Izražava se u jedinicama  $\text{GeV}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ . U produženoj jednakosti jednačine (3) figuriše emisivnost  $\gamma$ -zračenja (brzina produkcije po jediničnoj zapremini), i to kao proizvod lokalne gustine vodonika  $n_H$  i brzine stvaranja  $\gamma$ -zračenja po H atomu (funkcija izvora za gama zrake,  $\Gamma$ ).

Jednačina (3) daje spektar  $\gamma$ -zračenja Galaksije. Za vangalaktički slučaj ona se malo komplikuje, jer  $\gamma$ -zraci mogu da dolaze sa različitih crvenih pomaka. Tako, ako je u pitanju vangalaktičko poreklo, jednačina (3) postaje [4]:

$$I(E_\gamma) = \frac{1}{H_0} \int dz \frac{n_{H,\text{com}}(z) \Gamma((1+z)E_\gamma, z)}{(1+z)\mathcal{H}(z)} \quad (4)$$

gde je  $\mathcal{H}(z) = H(z)/H_0$  - bezdimenzionala brzina širenja univerzuma.

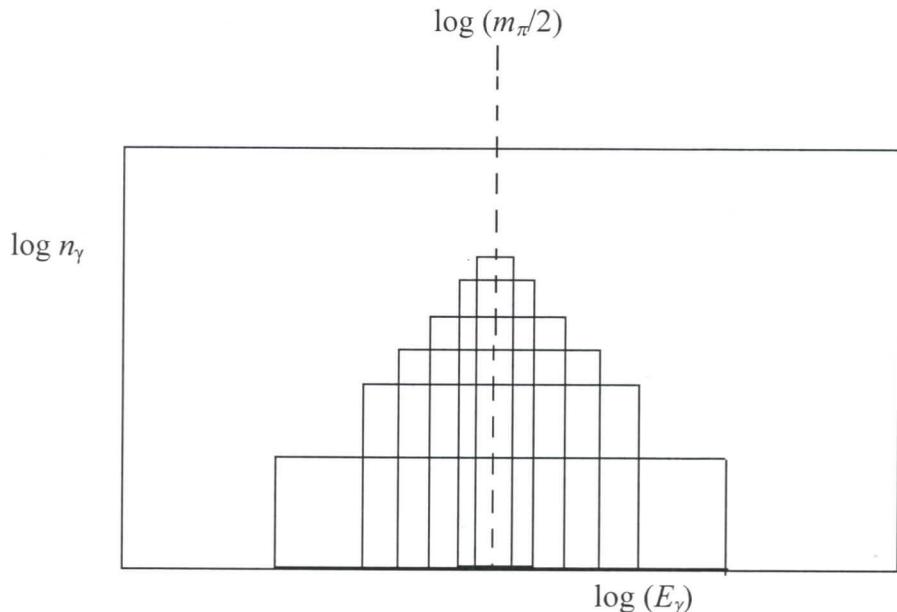
Kada je u pitanju pionsko  $\gamma$ -zračenje, tada je [4]:

$$\Gamma(E_\gamma) = \int_{E_\gamma + m_\pi^2/4E_\gamma}^{\infty} \frac{dE_\pi}{\sqrt{E_\pi^2 - m_\pi^2}} \int dE_p \phi(E_p) \frac{d\sigma(E_p, E_\pi)}{dE_\pi} \quad (5)$$

Zapazimo da, ako je oblik spektra kosmičkog zračenja  $\phi(E)$  isti duž cele linije posmatranja, onda je  $I(E_\gamma) = \Gamma(E_\gamma) N_H$ , gde je  $N_H$  gustina stuba vodonika, a samim tim je i oblik posmatranog spektra  $\gamma$ -zračenja  $I(E_\gamma)$  isti kao onaj koji pripada izvoru  $\Gamma(E_\gamma)$ . Ovo je slučaj koji nam je važan za dalju analizu.

Brzina stvaranja  $\Gamma$  oslikava, u stvari, produkciju i raspad neutralnih piona (sa efikasnim presekom  $\sigma$ ) usled fluksa kosmičkog zračenja,  $\phi$ . Oblik  $\Gamma(E_\gamma)$  ima svojstva koja oslikavaju simetriju nastanka fotona u raspodu piona tj. izotropnu prirodu te emisije.

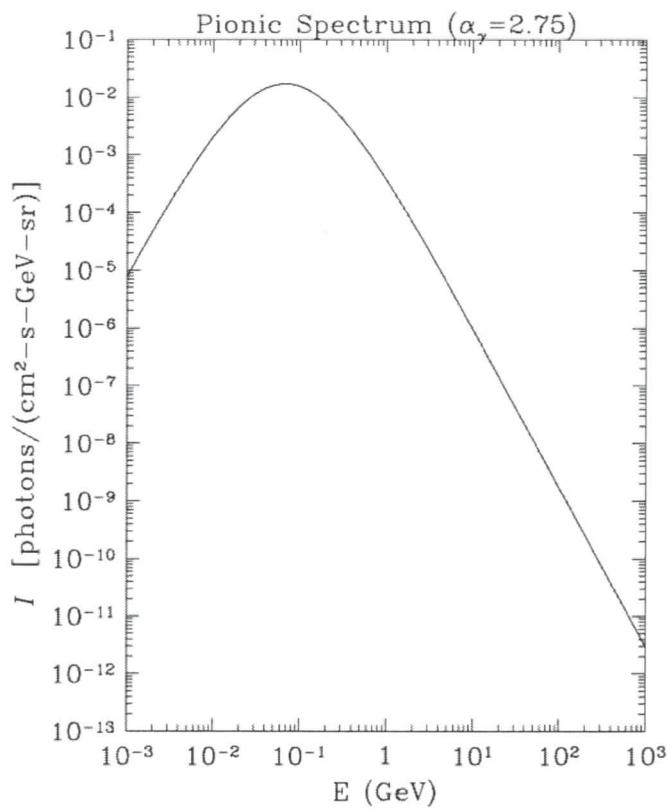
Geometrijska srednja energija fotona iz raspada neutralnih piona u letu je  $m_\pi / 2 = 69$  MeV, nezavisno od energije roditeljskog piona. Stoga je raspodela fotona iz raspada neke proizvoljne raspodele roditeljskih piona simetrična oko maksimuma 69 MeV, ako se prikaže grafički, u funkciji  $\ln(E_\gamma)$ . Naime, ova raspodela se sastoji od otežane sume pravougaonika, kao što je ilustrovano slikom 2.2.



Slika 2.2.: Shematska konstrukcija fotonskog spektra, nastalog raspadom neutralnih piona. (Reprodukovanu na osnovu: [2]).

Foton sa energijom manjom od  $m_\pi / 2$  mora biti produkt koji se kreće unazad kada dođe do raspada roditeljskog piona. Interakcije protona na određenim energijama će dati simetričnu raspodelu fotona, što oslikava oblik spektra neutralnih piona iz nukleonskih reakcija te energije. Otežana suma ovih raspodela u stvari daje raspodelu fotona iz spektra nukleona, a rezultat je opet simetričan na logaritamskoj skali.

Slika 2.3. prikazuje kontinualnu formu prethodnog prikaza. Na slici je veoma uočljiv pomenuti pionski maksimum na  $E_\gamma = m_\pi / 2 = 69$  MeV kao i naznaka o spektralnom indeksu gama zračenja, koji je isti kao i kod kosmičkog zračenja.



Slika 2.3. Pionski spektar sa maksimumom na 69 MeV. (Izvor: [16])

### **3. Difuzno gama zračenje**

#### **3.1. Galaktička difuzna emisija**

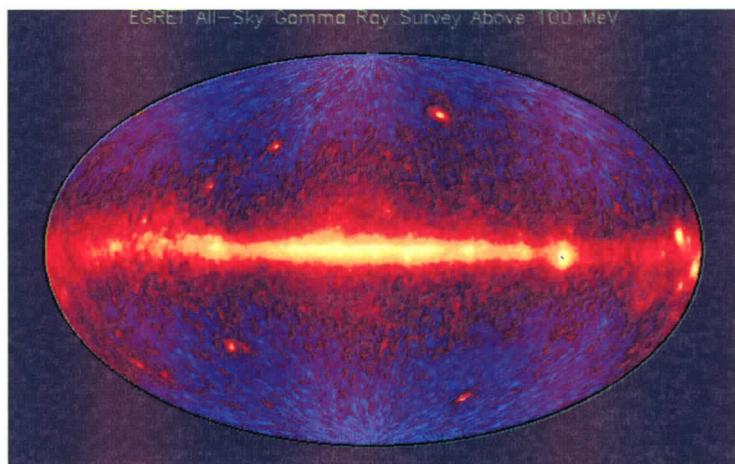
Difuzno gama zračenje sastoји се од неколико компоненти: праве difuzne emisije из меđuzvezdane средине, затим, vangalaktičke pozadine, чије poreklo још није добро utvrđено, и на крају, od doprinosa emisije nerazlučenih i tamnih galaktičkih izvora. Jedan прилаз у појашњавању ових компоненти јесте прoučавање difuzне emisije из меđuzvezdane средине, која је испunjена interakcijama visoko-energetskih čestica са меđuzvezdanim gasom и radijacionim poljima. Zbog svog porekla, таква emisija је у могућности да нам открије mnogo o izvorima и простiranju kosmičких зрака, и то је он то је представљено у прва два поглавља. Vangalaktička pozadina, ако је pouzdano одређена, може се upotrebiti за kosmološka испитивања. Proučавање добијеног prosečног spektra tamnih galaktičких извора bi nam opet moglo dati trag о каквим se objektima radi.

Difuzna emisija  $\gamma$ -zračenja se, dakle, састоји од неколико компоненти али, међу njima, galaktička difuzna emisija из меđuzvezdane средине има dominantnu ulogu и широку raspodelу и чија већина долazi из галактичке ravni tj. diska Галаксије. Ово nije iznenađujuće s obzirom na razliku u koncentracijama materije u disku i halou Галаксије.

Difuzna emisija се kontinualno izučава у протеких неколико decenija. Trenutно нам паžnju највише привлачи Fermi Gamma-ray Space Telescope (чији је првобитни назив bio Gamma-ray Large Area Space Telescope, или GLAST) и то је сателит-опсерваторија која обавља детекцију искључиво  $\gamma$ -зрачења, а кружи око Земље у ниској orbiti (550 km). Главни инструмент на овом сателиту је Large Area Telescope (LAT) и он обавља snimanja и анализира феномене као што су активна галактичка jezgra, pulsari, difuzna emisija, itd. On детектује фотоне са енергијом од око 30 MeV до 300 GeV, и обухвата око 20 % неба. Други уредај је Gamma-ray Burst Monitor (GBM) и детектује гама bljeskove у енергетском опсегу 150 keV – 30 MeV, и то по целом видljivom делу неба (који nije zaklonjen Zemljom).

Oвом мисијом су већ постигнути неки значајни резултати а неки тек чекају своје тумачење. Veruje se sa ће ова petogodišnja misija (2008-2013, planirano) dati veoma вредне податке и rastumačiti mnoge nedoumice које se javljaju u, до сада, детектованим spektrima.

Pre ове мисије, у периоду од 1991. до 2000. године, aktuelna je била мисија коју је обављала CGR Opservatorija (Compton Gamma Ray Observatory) и која нам је дала mnoštvo значајних података о гама зрачењу. То је била друга NASA-ina „Velika Opservatorija“, а која је дошла nakon мисије Habla. Njeni уредаји, BATSE, OSSE, COMPTEL и EGRET систематично су beležили податке о гама зрачењу у опсезима од 50 keV до 50 GeV. Visoka osetljivost, као и prostorna i energetska rezolucija EGRET инструмента, omogućili су детаљну просторну i спектралну analizu difuzне emisije (slika 3.1.)



Slika 3.1. EGRET mapa celokupnog vidljivog neba kao kontinuum emisije  $\gamma$ -zračenja za energije iznad 100 MeV. (Izvor: [17]).

Na slici je uočljivo da u celokupnom difuznom  $\gamma$ -zračenju dominiraju emisije iz galaktičke ravni, ali, prisustvo emisija čak i sa galaktičkih polova ukazuje da je značajno prisutna i vangalaktička komponenta.

Fluks difuznog  $\gamma$ -zračenja u Galaksiji prvenstveno zavisi od količine projektila (fluks kosmičkog zračenja) i količine meta (gas + radijaciono polje), i to je ono što je eksplisitno potkrepljeno jednačinom (3).

Kako je već pomenuto da se kosmičko zračenje ubrzava u supernova remnantima, koji su krajnja faza evolucije masivne, kratkoživeće zvezde, to bi značilo da fluks kosmičkog zračenja treba da zavisi od brzine formiranja (masivnih) zvezda (SFR – *Star Forming Rate*) u Galaksiji. Za druge normalne galaksije, sličnih osobina kao Mlečni Put, Fermi je već potvrdio ovo očekivanje.

Gas se prvenstveno sastoji od oblaka vodonika, koji se javlja u tri forme, i to: H<sub>2</sub> - molekularni, HI - atomski i HII – jonizovani. Raspodela vodonika (H<sub>2</sub>, HI, HII) se izvodi iz radio merenja i prepostavljene galaktičke rotacione krive, gde se raspodela molekularnog vodonika izvodi indirektno iz CO radio emisije i prepostavke da je faktor konverzije H<sub>2</sub>/CO isti za celu Galaksiju i iznosi 1:10000. Galaktičko radijaciono polje se sastoji od doprinosa zvezda, prašine i kosmičke mikrotalasne pozadine na 2,725 K (CMB). Njegov spektar varira širom Galaksije i (za razliku od CMB) ne može se direktno meriti.

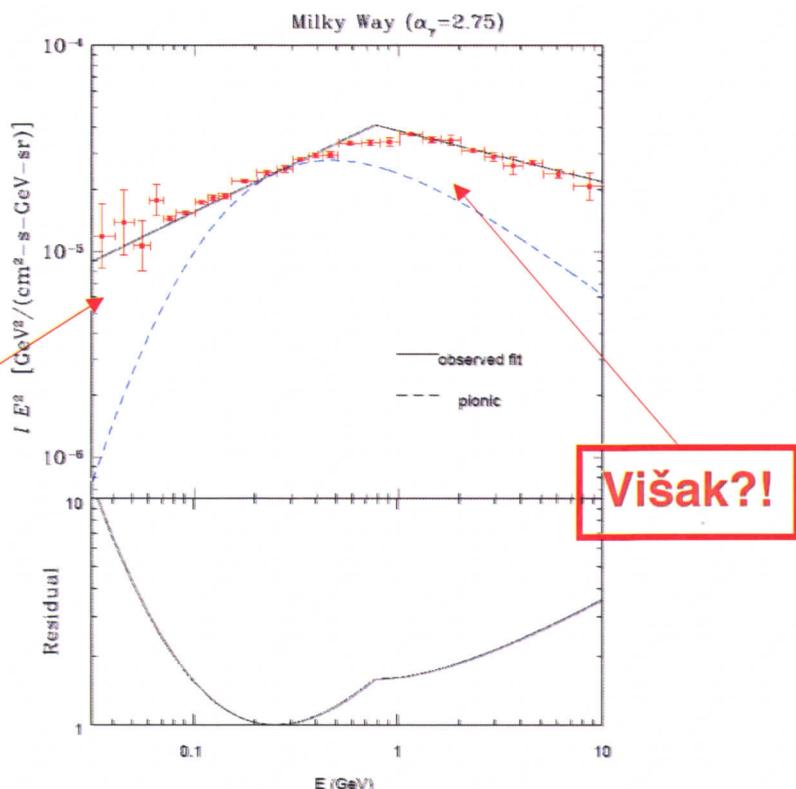
Prvu detaljnu analizu difuzne emisije iz ravni Galaksije ( $|b| \leq 10^\circ$ ) načinili su Hunter et al. 1997. godine [5] i ona je potvrdila rezultate ranijih eksperimenata da je velika većina emisija jasno povezana sa očekivanom galaktičkom difuznom emisijom. Takođe se pokazalo da, u proseku, postoji generalno opadanje emisivnosti  $\gamma$ -zračenja po H atomu, a s tim i opadanje gustine kosmičkog zračenja, sa povećanjem rastojanja od centra Galaksije.

Ono što je bilo intrigantno jeste da spektar  $\gamma$ -zraka, računat pod pretpostavkom da protonski i elektronski spektri u Galaksiji liče na one merene lokalno, otkriva višak zračenja na energijama iznad 1 GeV (EGRET spektar, slika 3.2.).



### 3.1.1. „GeV višak“

Analize podataka dobijenih sa EGRET detektora  $\gamma$ -zraka ukazuju na anomaliju u formi viška difuznog galaktičkog fluksa na GeV energijama, u odnosu na onaj koji je teorijski predviđen. Pojavila su se različita objašnjenja za ovu anomaliju, uključujući i anihilaciju supersimetrične tamne materije, kao najzanimljiviji predlog.



Slika 3.2. Na ovoj slici predstavljen je maksimalan pionski doprinos galaktičkom spektru  $\gamma$ -zračenja. Tačke EGRET podataka su uzete iz reference Hunter, S. D., et al., *Astrophys. J.*, 481, 205, 1997. Donji deo grafika predstavlja ostatak, koji iznosi  $\log\left[\left(I/E^2\right)_{\text{obs}} / \left(I/E^2\right)_{\pi0}\right] = \log\left(I_{\text{obs}} / I_{\pi0}\right)$ . Zapazimo da je prelom fita na 0,77 GeV nefizički. (Reprodukovan po osnovu: [4]).

Teorijske studije fizike i astrofizike o galaktičkoj produkciji  $\gamma$ -zračenja su obezbedile predviđanja očekivanih flukseva i spektara e. U energetskom opsegu iznad  $\sim 1$  GeV fluksevi koje je izmerio EGRET tim su bili i do  $\sim 60\%$  veći od teorijskih predviđanja. Ovo očigledno neslaganje flukseva (posmatranih i teorijski predviđenih) je označeno kao „GeV anomalija“.

Nerazlučeni galaktički tačasti izvori se mogu isključiti iz mogućih objašnjenja GeV anomalije i to iz dva razloga: (1) oni su strogo koncentrisani u galaktičkoj ravni a GeV anomalija se, kao što će se pokazati, vidi izotropno preko celog neba, i (2) najveća klasa galaktičkih tačastih izvora su pulsari i takvi izvori su koncentrisani u unutrašnjoj galaksiji i oni učestvuju sa manje od 15% u ukupnom galaktičkom fluksu.

Postoje tri predloga rešenja GeV anomalije, i to: (1) uvođenjem spektra elektrona, proporcionalnog sa  $E^2$  (manji spektralni indeks od tipičnog), kome najveći doprinos daje inverzno komptonovsko zračenje, (2) izmenama pretpostavki numeričkih modela o spektrima

nukleona i elektrona primarnog kosmičkog zračenja, da bi se povećali totalni teorijski fluksevi  $\gamma$ -zračenja, ili (3) postuliranjem nove fizike, u vidu anihilacije supersimetrične tamne materije.

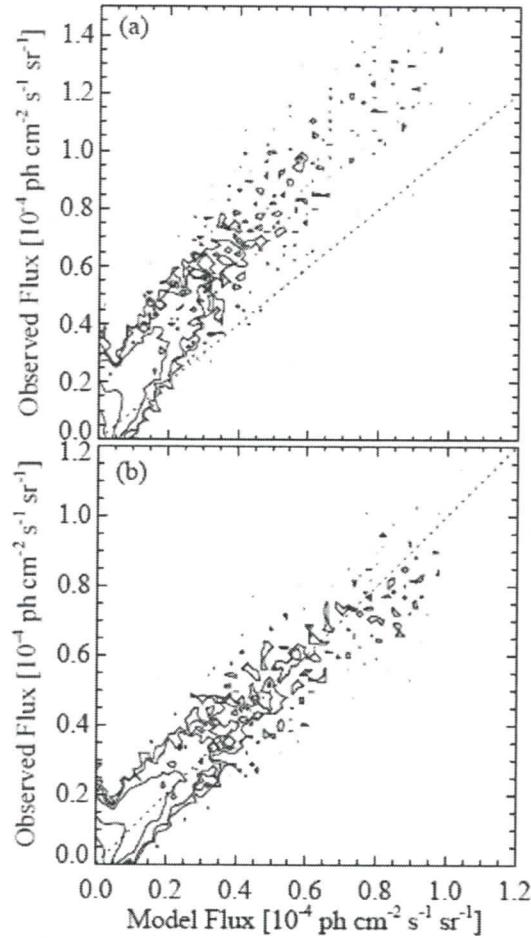
Prvi predlog postulira da je spektar elektrona kosmičkog zračenja, meren na Zemlji, mnogo strmiji od prosečnog spektra u Galaksiji, ali da ova *ad hoc* situacija može biti rezultat efekta distribucije supernova remnanata koji proizvode elektrone, ili efekta elektronskih gubitaka dok interaguju u ISM. Predviđanje ovog modela je „centralno-anticentralna“ asimetrija u anomaliji, zbog jake galaktocentrične radialne distribucije SNR-a. Takođe se može očekivati i smanjeni maksimum na većim galaktičkim širinama i to zbog strmijeg lokalnog spektra elektrona kosmičkog zračenja.

Predlog (2) je detaljno razmotren [6] i ono što je konstatovano jeste da je povećanje brzine produkcije galaktičkog  $\gamma$ -zračenja na GeV energijama dovelo do smanjenja u impliciranom vangalaktičkom difuznom fluksu u narednoj kalkulaciji, sa veoma naznačenim padom pri energijama blizu  $\sim 1$  GeV. Ovo je u suprotnosti sa originalnim određenjem spektra vangalaktičke pozadine, koji je ranije dat od strane EGRET tima.

Postuliranjem da je GeV anomalija prouzrokovana  $\gamma$ -komponentom anihilacije supersimetrične tamne materije ima, naravno, mnogo veće značenje. Naime, kombinovane studije većeg broja astrofizičkih fenomena daju nam ubedljive dokaze za postojanje nebarionske tamne materije (DM – *Dark Matter*). S obzirom na strukturu Univerzuma, favorizuje se hladna tamna materija (CDM – *Cold Dark Matter*), tj. njene konstitutivne čestice se kreću nerelativističkim brzinama. To su čestice od GeV do TeV masa, koje podležu samo slaboj i gravitacionoj sili, ili pak nekoj drugoj koja nije jača od slabe nuklearne sile. Otuda im i dolazi ime „slabo-interagujuće masivne čestice“ ili WIMP-ovi (*Weakly Interacting Massive Particles*). Eksperimentalna potvrda postojanja ovih čestica rešila bi brojne astrofizičke i kosmološke probleme. Ove čestice imaju mnoge osobine neutrina ali su mnogo masivnije i sporije od njega, ali i od svih standardnih čestica. Te dve osobine nalažu da one teže grupisanju i otuda pretpostavka o postojanju velikih podstruktura u haloima galaksija<sup>4</sup>. U teoriji, WIMP-ovi mogu da anihiliraju ili da se raspadaju na detektibilne čestice, a posebno bitni produkti njihovog raspada su  $\gamma$  - zraci, čime se povećava mogućnost njihove indirektne detekcije. Prepoznavanje takvog  $\gamma$  - zračenja u poznatim spektrima je, za sada, nemoguće. Pored toga, postoji opšta saglasnost da bi takvi procesi stvarali anizotropije u difuznoj pozadini a to se ne slaže sa utvrđenim svojstvima „GeV anomalije“.

Naime, skorašnja sveobuhvatna analiza [7] potvrđuje da je GeV anomalija *uniformna preko celog neba*, što je kvantitativno prikazano slikom 3.3. Nedostatak bilo kojeg strukturnog dela anomalije, koji je povezan sa ravni Galaksije, galaktičkim centrom ili pak anti-centrom (haloom), snažno ukazuje da se GeV anomalija javlja usled sistematske greške EGRET kalibracije (videti ispod) a ne usled nekog realnog astronomskog efekta. Odlična (1:1) korelacija EGRET podataka sa modelom, proširenim na celo nebo, i na celokupan emisioni opseg, posle množenja prostim faktorom renormalizacije, dalja je potvrda ovog zaključka, kao što je takođe prikazano slikom 3.3.

<sup>4</sup> Takozvani MACHO objekti – *Massive Compact Halo Object*.



Slika 3.3. (a) Prikaz integrala ( $E > 1 \text{ GeV}$ ) difuznog fluksa po modelu u odnosu na EGRET-ov mereni fluks za  $335^\circ < l < 45^\circ$ ,  $|b| < 90^\circ$ . (b) Sličan prikaz, ali sa uključenim faktorom renormalizacije, koji iznosi  $(1.6)^{-1}$  i primenjen je na mereni fluks. I kod jednog i kod drugog prikaza difuznom modelu je dodat sumirani vangalaktički difuzni fluks, koji iznosi  $1.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$ . Isprekidana linija ukazuje na očekivani 1:1 odnos između flukseva koje daju model i posmatranja. Konture pokazuju broj  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  piksela koji sadrže fluks koji nastaje unutar bina širine  $1.6 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$ . Vrednosti kontura su  $10^4, 10^3, 10^2, 10^1, \dots$  Ovi prikazi jasno pokazuju da GeV anomalija egzistira uniformno preko celog neba i proteže se od visokih do niskih intenziteta galaktičke emisije. (Izvor: [7]).

Pri visokim energijama, osetljivost EGRET-a je slabo poznata, delimično i usled nedovoljno istraženog efekta odbijanja nanelektrisanih čestica od površine scintilacionog detektora. Njihovim ponovljenim padanjem na detektor stvaraju se novi signali čime se stvara više „ $\gamma$  - signala“ nego što je to realno. Pokušaj da se odredi količina tog ansambla čestica koje stvaraju pomenuti višak nije urođio plodom. Zbog toga se pribeglo merenju podataka o pulsiranoj i nepulsiranoj emisiji sa Crab, Vela i Geminga maglina, kao i difuznog fluksa sa Lockman-ove crne rupe, za energije iznad 1 GeV. Nađeno je da za različita posmatranja ovih izvora postoje varijacije merenih flukseva i to u višku od 40%. S obzirom da se očekuje konstantan fluks sa ovih izvora, ovo ukazuje na sistematske greške prouzrokovane očiglednim vremenskim varijacijama u toku različitih posmatračkih perioda.

Kao što ćemo videti, FERMI nije reprodukovao „GeV anomaliju“ i time je definitivno stavljena tačka na razlog viška gama zračenja iznad 1 GeV.

### 3.2. Vangalaktička difuzna pozadina

U uvodu je rečeno da će se glavni cilj ovog rada postići korišćenjem podataka i rezultata o doprinosu pionskog zračenja difuznom zračenju Galaksije, ali i usvajanjem pretpostavke o analogiji difuznih procesa koji se dešavaju u drugim normalnim galaksijama koje učestvuju u vangalaktičkoj difuznoj pozadini.

Kao što je ranije pomenuto, difuzna  $\gamma$ -pozadina je komponenta difuzne emisije koju je najteže odrediti. Njen spektar veoma zavisi od usvojenog modela galaktičke emisije (zračenja Galaksije), koja je još uvek u fazi detaljnog utvrđivanja. Nije ispravno pretpostaviti da je izotropna komponenta u potpunosti vangalaktičkog porekla, zbog toga što je i na galaktičkim polovima uporediva sa galaktičkim doprinosom od inverznog komptonovskog rasejanja o fotone galaktičke ravni i CMB. Veličina haloa, tamošnji elektronski spektar, kao i spektar nisko-energetskih pozadinskih fotona su veoma zavisni od usvojenog modela i moraju se izvoditi iz mnogo različitih posmatranja.

Mnogi radovi su objavljeni na temu spektra EGRB-a, a bazirano na osnovu podataka koje je dao EGRET. S obzirom da smo usvojili da su EGRET podaci precenjivali fluks  $\gamma$ -zračenja na energijama iznad 1 GeV usled sistematske greške detektora, može se reći da ti rezultati nisu dovoljno precizni kada je u pitanju određenje pionskog doprinsa vangalaktičkom spektru. Zbog toga će se ovde iskoristiti podaci koje je dao FERMI (GLAST) u avgustu 2009. godine, i u kojima nema ni traga pomenutom „GeV višku“.

Priroda vangalaktičkog spektra zavisi od metoda koji se koristi za oduzimanje zračenja Galaksije, pa se u poslednje vreme pojavljuju različite tehnike koje su dovele do različitih rezultata za oblik i amplitudu spektra. Sve ove tehnike imaju zajedničku karakteristiku a to je da efektivno isključuju disk Galaksije (galaktičke širine do  $\pm 10^\circ$ ) iz merenja EGRB kao i razlučene diskretne galaktičke izvore. Velika većina tih izvora su pulsari (brzo rotirajuće neutronske zvezde).

Uzimajući našu galaksiju kao odrednicu, očekujemo da doprinos diskretnih izvora totalnoj gama emisiji neke galaksije bude mali. Prvo, relativan intenzitet difuznog fluksa je mnogo veći od totalne emisije diskretnih izvora u Mlečnom Putu. Drugo, veoma dobro slaganje između difuzne emisije koju je izmerio FERMI i one koju je dao GALPROP<sup>5</sup> ukazuje da diskretni izvori u Mlečnom Putu nisu dominantna komponenta difuzne emisije. Situacija bi mogla biti znatno drugačija za rane tipove galaksija (eliptične). One imaju malu stopu formiranja zvezda, a većina gama zračenja dolazi iz netermalnih procesa u starijim populacijama stelarnih remanata kao što su pulsari sa periodom od 1 ms. Međutim, doprinos ovakvih galaksija vangalaktičkoj difuznoj pozadini je, prema nekim istraživanjima, veoma mali [8].

Vangalaktičkoj difuznoj pozadini doprinosi mnoštvo izvora, ali, na prvom mestu bi se trebale naći normalne galaksije, kao potvrđeni izvori  $\gamma$ -zračenja. Kao i kod Mlečnog Puta, i u njima se  $\gamma$ -zračenje formira u interakcijama hadrona i leptona sa interstelarnim gasom i fotonima. Međutim, normalne galaksije su veoma brojne, a njihova ukupna emisija verovatno

<sup>5</sup> GALPROP je prihvaćeni računarski softver koji računa kompletну mrežu kosmičkog, gama, sinhrotronskog i drugih zračenja a na osnovu ulaznih podataka o zastupljenostima u njihovim izvorima. Pogledati detaljnije na [www.galprop.stanford.edu](http://www.galprop.stanford.edu)

većinski doprinosi EGRB-u. Teleskop LAT, na FERMI stanicu, trenutno vrši snimanja sa veoma poboljšanim energetskim i ugaonim rezolucijama u odnosu na EGRET. Zbog toga se očekuje da razluči M31 i možda M 33 (od normalnih galaksija), pored već razlučenih LMC (Veliki Magelanov Oblak) [9] i SMC (Mali Magelanov Oblak) [10]. Takođe je objavljeno da je Fermi razlučio i dve „starburst“ galaksije<sup>6</sup>, i to M82 i NGC 253 [11].

Normalne galaksije takođe imaju karakterističnu pojavu u svom spektru, a to je maksimum, koji je siguran marker hadronskog porekla njihove emisije. Kao rezultat, kada se oduzme doprinos blazara, čiji je spektar manje upadljiv, doprinos od normalnih galaksija preuzima vodeću ulogu. Ukoliko FERMI razluči što više blazara (očekuje se oko 1000 a možda i više), kao činioца koji pojedinačno najviše doprinose vangalaktičkoj pozadini, utoliko će doprinos normalnih galaksija biti preciznije određen. Ono što je za sada određeno, na osnovu najnovijih podataka koje daje Fermi, jeste da je doprinos nerazlučenih blazara difuznoj pozadini najviše 23%.

Blazari pripadaju grupi aktivnih galaksija, i to onih koje imaju aktivno galaktičko jezgro (AGJ). Poznati relativistički džetovi iz oblasti aktivnog galaktičkog jezgra stvaraju se usled akrecije materijala i njegove brze rotacije oko supermasivne crne rupe, koja je izvor napajanja. U slučaju blazara, ti relativistički džetovi su usmereni pravo prema Zemlji pa se zato registruje mnogo više  $\gamma$ -zračenja nego kod ostalih aktivnih galaksija.

Anizotropija u EGRB-u je proučavana teoretski od strane brojnih autora da bi se uočili „otisci“ različitih izvora koji doprinose spektru. Galaksije su grupisane jer prate raspodelu materije na velikim skalamama u Univerzumu, i ova pojava bi trebala da se vidi u EGRB-u. Zatim, anizotropije mogu stvarati pomenuti blazari, supernove tipa Ia, ali i, takođe pomenuta, anihilacija tamne materije.

Takođe, postoji opšta rastuća saglasnost da formiranje struktura na velikim skalamama vodi do sudara u barionskom gasu a samim tim i do ubrzanja čestica. Rezultujući „kosmološki kosmički zraci“ takođe mogu sudelovati u difuznoj  $\gamma$ -pozadini i stvarati emisije i u hadronskim i u inverznim komptonovskim procesima.

Još jedan egzotičan fenomen jeste Hokingovo zračenje primordijalnih crnih rupa, čiji posmatrački dokaz ne postoji, ali koje bi moglo da doprinosi gama pozadini. Primordijalne crne rupe su fenomen koji je vezan za rani Univerzum, kada su temperatura i pritisak bili enormno visoki. U takvim uslovima bilo kakva fluktuacija gustine materije bi rezultovala nastankom crnih rupa u oblastima povećane gustine. I premda bi većina regiona sa povećanom gustinom brzo nestala zbog ekspanzije Univerzuma, primordijalna crna rupa bi trebala biti stabilna i održiva do danas. Naime, Stiven Hoking<sup>7</sup> je postavio hipotezu da takve minorne crne rupe moraju postojati u halou naše galaksije. On je takođe izračunao i količinu zračenja koju ta crna rupa može da emituje. Po tom proračunu, količina zračenja je obrnuto proporcionalna masi crne rupe, pa će manja crna rupa intenzivnije isparavati, formirajući veliki bljesak zračenja u finalnoj fazi. Takvi bljeskovi još nisu detektovani, niti se zna da li zaista postoje i da li doprinose spektru  $\gamma$ -zračenja. Poznati „gama bljeskovi“ su bili

<sup>6</sup> To su galaksije sa veoma intenzivnom formacijom zvezda. Imaju mnogo mlađih zvezda i ionizovanog vodonika a nastaju usled sudara ili bliskog susreta dve ili više normalnih galaksija.

<sup>7</sup> Stephen William Hawking (1942 - ) je poznati engleski teoretski fizičar koji radi na polju opšte teorije relativnosti, kosmologije, i drugih oblasti. Pogledati detaljnije na [www.hawking.org.uk](http://www.hawking.org.uk)

predlagani kao rešenje zračenja primordijalnih crnih rupa dok nije shvaćeno da su oni povezani sa eksplozijama supernovih u veoma udaljenim galaksijama.

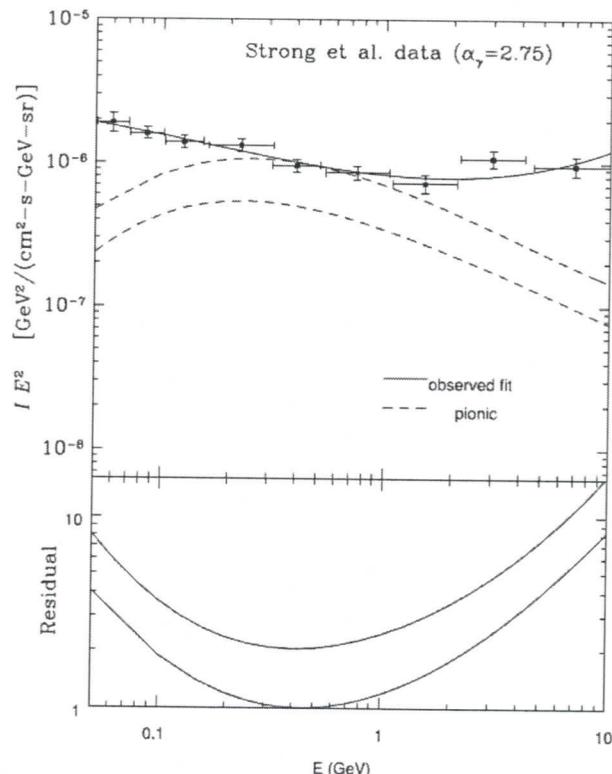
## 4. Podaci

Za fluks pionskog zračenja pogodno je iskoristiti model koji su izveli Prodanović & Fields 2005. Naime, iskorišćena su dobro definisana svojstva spektra pionskog raspada radi određivanja maksimalnog pionskog udela u intenzitetu posmatranog  $\gamma$ -zračenja. Maksimalan pionski doprinos vangalaktičkom spektru zavisan je od energije; takođe je zavisan od raspona crvenih pomaka, u kojem se izvori nalaze, jer se uvodi pretpostavka da na istom crvenom pomaku, sve normalne galaksije imaju približno jednake parametre koji su od interesa, a to su SFR i odnos gas-masa.

Po ovom modelu, makimalizovan fit (slika 4.1.) dobijenog pionskog spektra je kubna logaritamska funkcija i ima sledeću formu:

$$\ln(I_\pi E^2) = -14,171 - 0,546 \ln E - 0,131(\ln E)^2 + 0,032(\ln E)^3 \quad (6)$$

gde je  $I_\pi$  fluks pionskog  $\gamma$ -zračenja a  $E$  odgovarajuća energija. Jednačina (6) opisuje spektar pionskog zračenja, sumiran po galaksijama na pomacima od  $z = 0$  do  $z = 10$ , za neku usvojenu raspodelu galaksija. U sebe uključuje i konstante za ravan Univerzum, brzinu nastajanja novih zvezda u normalnim galaksija, odnose gas-masa i druge relevantne parametre.



Slika 4.1. Gornji deo slike prikazuje EGRB spektar i njegovo poređenje sa spektrom raspada piona koji su galaktičkog porekla. Podaci sa greškama su preuzeti iz Strong et al. (2004). Puna linija prikazuje fit EGRET podataka a isprekidane linije pionski spektar (kao kolektivno pionsko zračenje svih galaksija od  $z = 0$  do  $z = 10$ ), i to: gornja – maksimalizovan; donja – normalizovan na Mlečni Put. Donji deo slike prikazuje funkciju ostatka, koja iznosi:  $\log[(I_E^2)_\text{obs} / (I_E^2)_\pi] - \log(I_\text{obs} / I_\pi)$ . (Izvor: [1]).

Zapazimo da su na slici prikazani EGRET podaci za EGRB. S obzirom da će se u radu koristiti podaci koje je dao FERMI 2009. godine, jednačina (6) će poslužiti samo da bi se našao pionski spektar, normalizovan na Mlečni Put, koji vodi do pomenute donje granice za ideo pionskog  $\gamma$ -zračenja. To je naša objektivna procena i ona je predstavljena donjom isprekidanim linijom na slici 4.1. Naime, zadržavamo isti oblik pionskog spektra ali ga ovaj put poređimo sa novim (Fermi) podacima.

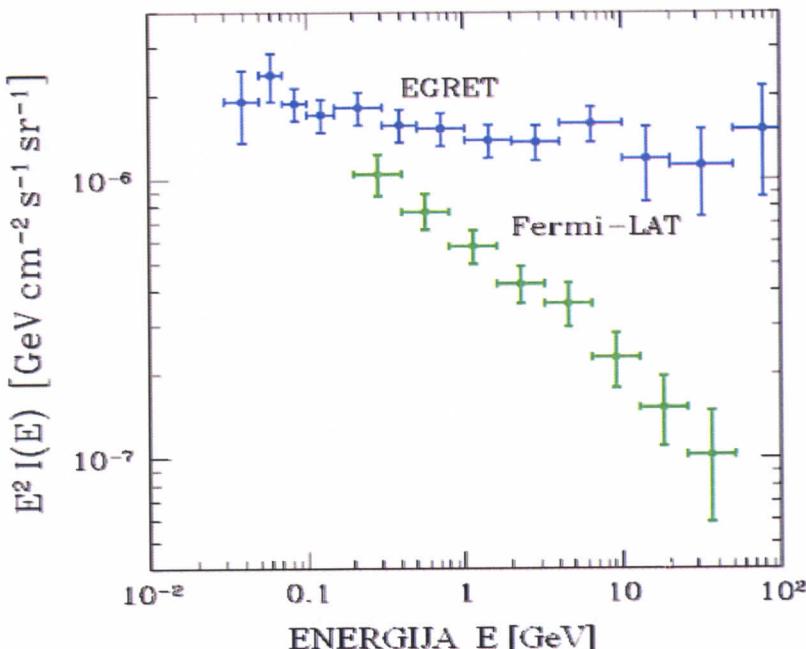
Tako, očitavanjem vrednosti energije i fluksa koji odgovaraju maksimumu fita normalizovanog na Mlečni Put tj.  $E_0 = 0,235 \text{ GeV}$  i  $I E^2 = 5,176 \times 10^{-7} \text{ GeV}$ , dolazi se do vrednosti za slobodan član i on iznosi -14,892. Sada imamo jednačinu koja nam opisuje spektar pionskog  $\gamma$ -zračenja (normalizovanog na Mlečni Put):

$$\ln(I_\pi E^2) = -14,892 - 0,546 \ln E - 0,131(\ln E)^2 + 0,032(\ln E)^3 \quad (7)$$

Sada je lako naći fluks  $\gamma$ -zračenja koje potiče od raspada neutralnih piona:

$$I_\pi = e^{-14,892} \times E^{-2,546 - 0,131 \ln E + 0,032(\ln E)^2} \quad (8)$$

Najnovije posmatračke podatke o spektru vangalaktičkog  $\gamma$ -zračenja zabeležio je FERMI i oni su objavljeni tokom 2009. godine. Ono što se očekivalo da će FERMI pokazati, po prvim preliminarnim rezultatima, ostvareno je. Naime, nema traga dugo pominjanom „GeV višku“, što je pokazalo da je ispravna bila teorija o sistematskoj grešci EGRET detektora na GeV energijama (slika 4.2.).



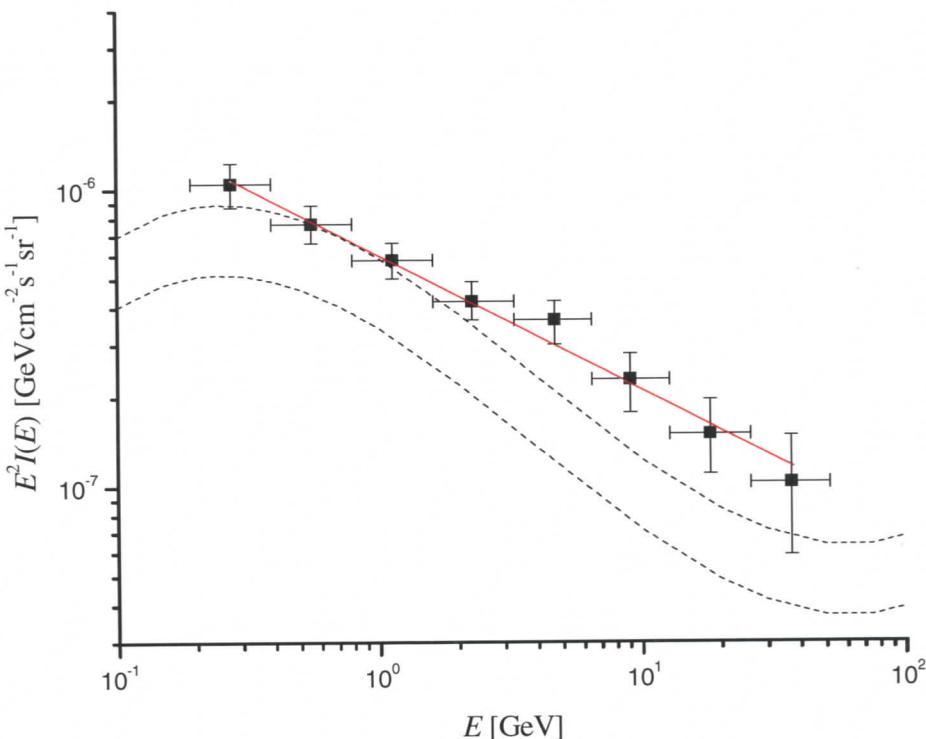
Slika 4.2. Poređenje spektara EGRB po EGRET-u i FERMI-u. Zapaža se strm pad u EGRB spektru prema podacima koje je dao FERMI. (Reprodukovan po osnovu [8])

Da bi se odredio udeo pionskog fluksa u totalnom vangalaktičkom fluksu, potreban je fit podataka ukupnog EGRB po FERMI-u. U ovom slučaju, za opseg koji se razmatra, pogodan je linearan fit (pri fitovanju u obzir nisu uzimane greške očitavanja) i to je ono što je prikazano slikom 4.3.:

$$\log I_\gamma E^2 = -0,453 \log E - 6,224 \quad (9)$$

pa se zavisnost fluksa od energije može izraziti kao:

$$I_\gamma = E^{-2,453} \times 10^{-6,224} \quad (10)$$



Slika 4.3. Fit EGRB (crvena linija) i pionskog (isprikidane linije)  $\gamma$ -zračenja. *Gornja isprekidana:* maksimalizovan fit. *Donja isprekidana:* normalizovan fit.

Važno je napomenuti da savijanje fita na krilima pionskog spektra nije realno već je to posledica nesavršenosti fita.

Da bi se odredio novi maksimalan doprinos pionskog zračenja u vangalaktičkoj pozadini potrebno je pronaći jednačinu maksimalizovanog fita. Ona će se od jednačine (7) razlikovati samo po slobodnom članu, a koji se dobija postavljanjem uslova  $I_\gamma = I_\pi$  na energiji  $E = 0,725$  GeV. To je tačka u kojoj je linearan fit EGRB podataka tangenta na spektor pionskog zračenja. Na taj način, jednačina maksimalizovaog fita postaje:

$$\ln(I_\pi E^2) = -14,333 - 0,546 \ln E - 0,131(\ln E)^2 + 0,032(\ln E)^3 \quad (11)$$

Sada je lako odrediti maksimalnu vrednost fluksa pionskog zračenja, integracijom jednačine:

$$I_{\pi,\max} = e^{-14,333} \times E^{-2,546 - 0,131 \ln E + 0,032 (\ln E)^2} \quad (12)$$

a zatim i udeo u EGRB.

## 5. Rezultati i diskusija

Posle integracije izraza (10) i (8), dobijaju se sledeće vrednosti za fluks ukupnog  $\gamma$ -zračenja vangalaktičke pozadine,  $F_{tot}$ , i  $\gamma$ -zračenja koje potiče iz raspada piona,  $F_\pi$ :

$$F_{tot} = 10^{-6.224} \int_{0.1}^{100} E^{-2.453} dE = 1,166 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \quad (13)$$

i

$$F_\pi = e^{-14.892} \int_{0.1}^{100} E^{-2.546 - 0.131 \ln E + 0.032 (\ln E)^2} dE = 4,45 \times 10^{-6} \text{ GeV}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \quad (14)$$

pa je procena pionskog prema ukupnom  $\gamma$ -zračenju u vangalaktičkom spektru, za opseg (0.1, 100 GeV) jednak:

$$\frac{F_\pi}{F_{tot}} = 40\% \quad (15)$$

Ovaj rezultat se može se može protumačiti kao očekivani (prosečan) udeo normalnih galaksija u fluksu vangalaktičkog gama zračenja.

Izračunaćemo i maksimalan fluks pionskog zračenja, a on se dobija integracijom izraza (12):

$$F_{\pi,\max} = e^{-14.333} \int_{0.1}^{100} E^{-2.546 - 0.131 \ln E + 0.032 (\ln E)^2} dE = 7,78 \times 10^{-6} \text{ GeV}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \quad (16)$$

što na kraju za maksimalan udeo pionskog u vangalaktičkom  $\gamma$ -zračenju nalaže:

$$\frac{F_{\pi,\max}}{F_{tot}} = 67\% \quad (17)$$

Ovaj odnos je u saglasnosti sa očekivanjima, i on pokazuje da na ovom opsegu energija, maksimalan doprinos normalnih galaksija prevazilazi doprinose mnogo „svetlijih“, ali manje brojnih, aktivnih galaksija.

Ovaj rezultat se može uporediti sa ranijim radovima, koji su bili bazirani na podacima za EGRB koje je davao EGRET. Tako, na primer, Prodanović & Fields 2005 za ovaj odnos daju vrednost od 75%. Postavlja se pitanje kako protumačiti neočekivano (neznatno) manji doprinos po FERMI-u u odnosu na EGRET, s obzirom na uticaj poznatog „GeV viška“. Odgovor na to pitanje može se tražiti, recimo, u oduzimanju doprinsa razlučenih blazara od ukupnog EGRB po FERMI-u, koji je svakako veći nego u slučaju EGRET-a. U momentu objavljivanja podataka o ukupnom EGRB-u 2009. godine, efektivno je oduzet doprinos određenog broja razlučenih blazara i drugih diskretnih objekata, koji su ranije ulazili u sastav difuzne pozadine zbog slabije rezolucije EGRET-a.

Može se pokazati da za opseg 0.2 GeV do 10 GeV, postoji još bolje slaganje pionskog fita i fita EGRB tj. za ovaj opseg, maksimalan intenzitet pionskog zračenja iznosi  $3,73 \times 10^{-6}$   $\text{GeV}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$  a totalnog EGRB  $4,25 \times 10^{-6}$   $\text{GeV}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ , pa je traženi odnos:

$$\frac{F_{\pi, \max(0.2, 10)}}{F_{tot}} = 88\% \quad (18)$$

Ovaj rezultat ima mnogo veće značenje, i iz njega se mogu izvesti neki bitni zaključci.

## Zaključak

Po vodećoj ideji ovog rada, iskorišćena su dobro definisana svojstva pionskog raspada radi određivanja ukupnog doprinosa normalnih galaksija spektru vangalaktičke  $\gamma$ -pozadine. Za to su iskorišćene i neke razumne pretpostavke, za koje još nemamo sigurne posmatračke dokaze, ali koje proizilaze iz nekih indirektnih procesa ili su potkrepljene teorijski. FERMI je pokazao da postoji dobro slaganje modela i posmatranja jer nije reprodukovao „GeV višak“ koji je dugo mučio naučnike.

Zbog velikog broja normalnih galaksija, iste proizvode najmanje anizotropije u vangalaktičkoj  $\gamma$ -pozadini, mnogo manje od blazara ili drugih potencijalnih objekata. Taj njihov minorni doprinos anizotropijama bi trebao poslužiti za pronalaženje manjih ali upadljivih izvora u difuznoj pozadini.

S obzirom na pomenuti podatak o broju normalnih galaksija koje će FERMI potencijalno razlučiti, to znači da će većina njih i dalje ostati „tamna“ i doprinositi difuznoj pozadini. Ovo nije slučaj za blazare jer će svi koji budu razlučeni (tj. njihovo zračenje) biti izuzeti iz doprinosa nerazlučenih objekata. Stoga, povećanje osetljivosti FERMI-a neće narušiti ulogu normalnih galaksija kao glavnih činilaca u formiranju difuzne pozadine.

Model za pionsko  $\gamma$ -zračenje, koji je iskorišćen u ovom radu, daje prihvatljive i očekivane rezultate za energije iznad 0,1 GeV. S obzirom da je maksimum pionskog zračenja na  $\sim 0,235$  GeV, jasno je zašto se naglo povećao pionski doprinos EGRB kada se uzme opseg energija od 0,2 GeV do 10 GeV. U ovom opsegu pionski fit najbolje „prati“ fit ukupnog EGRB. Na energijama  $>10$  GeV već postoji blago odstupanje, što bi moglo da daje naznaku o dodatnim procesima koji stvaraju zračenje. U prilog tome idu i najnoviji podaci o EGRB koje je izmerio FERMI (2010. god), u kojima postoji neznatno smanjenje nagiba spektra za energije  $>10$  GeV. Pomenuti dodatni procesi, koji bi mogli da povećavaju fluks iznad 10 GeV su, na prvom mestu, inverzno komptonovko zračenje, a zatim i zakočno zračenje, ali i drugi potencijalni procesi.

## Literatura:

1. Brian D. Fields, Tijana Prodanović, The Astrophysical Journal, 623:877–888, 2005 April 20.
2. Thomas K. Gaisser: „Cosmic Rays and Particle Physics“, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1990.
3. “Cosmic Gamma-Ray Sources” eds. K.S. Cheng & G.E. Romero (Dordrecht: Kluwer), Astrophysics and Space Science Library v.304, Poglavlje 12, strane 279-310 (2004).
4. Tijana Prodanović, Brian D. Fields, Astropart.Phys. 21 (2004) 627-635.
5. Hunter, S. D., et al., Astrophys. J., 481, 205, 1997.
6. A. W. Strong, I. V. Moskalenko, and O. Reimer, Astrophys. J. 613, 962 (2004).
7. F. W. Stecker, S. D. Hunter, D. A. Kniffen, Astropart.Phys.29:25-29,2008.
8. Shin'ichiro Ando i Vasiliki Pavlidou, Mon. Not. R. Astron. Soc. 400, 2122 (2009).
9. Abdo A.A. et al., Astronomy and Astrophysics, Volume 512, id.A7, 03/2010.
10. Abdo A.A. et al., The Astrophysical Journal Supplement, Volume 188, Issue 2, pp. 405-436 (2010).
11. Abdo A.A. et al.,The Astrophysical Journal Letters, Volume 709, Issue 2, pp. L152-L157 (2010).
12. Abdo A.A. et al., The Astrophysical Journal Supplement, Volume 188, Issue 2, pp. 405-436 (2010).
13. B.D. Fields, V. Pavlidou, T. Prodanović, arXiv:1003.3647v1 [astro-ph.CO] 18 Mar 2010.
14. D. Bhattacharya et al., Research in Astron. Astrophys. Vol. 9 No. 11, 1205 – 1214, 2009.
15. A. Cuoco et al. arXiv:1005.0843v1 [astro-ph.HE] 5 May 2010.
16. [www.df.uns.ac.rs/~prodanvc/predavanja/L\\_09\\_Galaksiye](http://www.df.uns.ac.rs/~prodanvc/predavanja/L_09_Galaksiye)
17. [www.nasa.gov/diffuse\\_background.html](http://www.nasa.gov/diffuse_background.html)
18. [www.galprop.stanford.edu](http://www.galprop.stanford.edu)
19. [www.hawking.org.uk](http://www.hawking.org.uk)
20. <http://www-glast.stanford.edu/>
21. [http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/know\\_12/pulsars.html](http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/know_12/pulsars.html)
22. [http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/know\\_11/cosmic\\_rays.html](http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/know_11/cosmic_rays.html)
23. [http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/know\\_12/active\\_galaxies.html](http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/know_12/active_galaxies.html)
24. [http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/features/exhibit/cgro\\_bla...s.html](http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/features/exhibit/cgro_bla...)
25. [http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/know\\_12/gamma-ray\\_burst.html](http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/know_12/gamma-ray_burst.html)
26. [http://www.nasa.gov/worldbook/blackhole\\_worldbook.html](http://www.nasa.gov/worldbook/blackhole_worldbook.html)

## Biografija



Praštalo Zoran je rođen u Somboru 1982. godine. Prirodni smer gimnazije „Veljko Petrović“ u Somboru završava 2001. godine. Na Prirodno-matematičkom fakultetu u Novom Sadu, 2003. godine upisuje smer Astronomija sa astrofizikom, Odsek za Fiziku, i odbranom diplomskog rada stiče zvanje profesora fizike i astronomije. Prosečna ocena u toku studiranja je 8,87.



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

*Redni broj:*

**RBR**

*Identifikacioni broj:*

**IBR**

*Tip dokumentacije:*

Monografska dokumentacija

**TD**

*Tip zapisa:*

Tekstualni štampani materijal

**TZ**

*Vrsta rada:*

Diplomski rad

**VR**

*Autor:*

Zoran Praštalo

**AU**

*Mentor:*

dr Tijana Prodanović

**MN**

*Naslov rada:*

Doprinos normalnih galaksija vangalaktičkom gama zračenju

**NR**

*Jezik publikacije:*

srpski (latinica)

**JP**

*Jezik izvoda:*

srpski/engleski

**JL**

*Zemlja publikovanja:*

Srbija i Crna Gora

**ZP**

*Uže geografsko područje:*

Vojvodina

**UGP**

*Godina:*

2010

**GO**

*Izdavač:*

Autorski reprint

**IZ**

*Mesto i adresa:*

Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

**MA**

*Fizički opis rada:*

5/182/32/0/71/0/3

**FO**

*Naučna oblast:*

Fizika

**NO**

*Naučna disciplina:*

Astronomija

**ND**

*Predmetna odrednica/ ključne reči:*

Normalna galaksija, gama zračenje

**PO**

**UDK**

*Čuva se:*

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

**ČU**

*Važna napomena:*

nema

**VN**

*Izvod:*

**IZ**

*Datum prihvatanja teme od NN veća:* 26.04.2010.

**DP**

*Datum odbrane:* 16.06.2010.

**DO**

*Članovi komisije:*

**KO**

*Predsednik:* dr Dušan Mrđa

*član:* dr Milan Pantić

*član:*

UNIVERSITY OF NOVI SAD  
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

*Accession number:*

**ANO**

*Identification number:*

**INO**

*Document type:*

**DT**

Monograph publication

*Type of record:*

**TR**

Textual printed material

*Content code:*

**CC**

Final paper

*Author:*

**AU**

Zoran Praštalo

*Mentor/comentor:*

**MN**

dr Tijana Prodanović

*Title:*

**TI**

Normal galaxy contribution to the extragalactic gamma-ray background

*Language of text:*

**LT**

Serbian (Latin)

*Language of abstract:*

**LA**

English

*Country of publication:*

**CP**

Serbia and Montenegro

*Locality of publication:*

**LP**

Vojvodina

*Publication year:*

**PY**

2010

*Publisher:*

**PU**

Author's reprint

*Publication place:*

**PP**

Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

*Physical description:*

**PD**

5/182/32/0/71/0/3

*Scientific field:*

**SF**

Physics

*Scientific discipline:*

**SD**

Astronomy

*Subject/ Key words:*

**SKW**

Normal galaxy, gamma-ray

**UC**

*Holding data:*

Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

**HD**

*Note:*

none

**N**

*Abstract:*

**AB**

*Accepted by the Scientific Board:* 26.04.2010.

**ASB**

*Defended on:* 16.06.2010.

**DE**

*Thesis defend board:*

**DB**

*President:* dr Dušan Mrđa

*Member:* dr Milan Pantić

*Member:*