

UNIVERZA V NOVI GORICI  
FAKULTETA ZA APLIKATIVNO NARAVOSLOVJE

**ALI JE NAŠA GALAKSIJA SPEKTROMETER  
ZA KOZMIČNE ŽARKE EKSTREMNIH  
ENERGIJ?**

DIPLOMSKO DELO

**Gašper Kukec Mezek**

Mentor: prof. dr. Danilo Zavrtanik

Ajdovščina, 2011



## **Zahvala**

Najprej bi se rad zahvalil mentorju prof. dr. Danilu Zavrtaniku in prof. dr. Samu Staniču za svetovanje, pomoč pri izdelavi diplomske naloge in razlago, kjer je bila potrebna. Hkrati bi se zahvalil tudi prof. slovenščine Azemini Cinac za lektoriranje ter družini in prijateljem za nenehno spodbudo ob pisanju.



## Povzetek

Kozmični žarki so delci, ki že skoraj eno stoletje spodbujajo zanimanje fizikov s svojo visoko energijo, ki je na zemlji le stežka ali celo ne moremo poustvariti. Med njimi se najdejo nizkoenergijski, ki vsako sekundo preletijo vsakega izmed nas, pa do navidez neulovljivih kozmičnih žarkov ekstremnih energij, ki jih poredko opazijo celo na ogromnih detektorskih sistemih, kot je Observatorij Pierre Auger v Argentini. Ravno ti delci, z energijami nad 10 EeV ( $\approx 1,6$  J), pa morda nosijo odgovore na mnoga vprašanja, kot so: Kaj so izvori kozmičnih žarkov ekstremnih energij? Kateri delci sestavljajo te žarke? Na kakšen način so delci pospešeni do tako visokih energij? Pri odkrivanju teh skrivnosti bi si lahko pomagali z masnim spektrometrom, ki z magnetom loči delce po njihovih razmerjih med maso in nabojem. Kako? Kozmični žarki ekstremnih energij na svoji dolgi poti proti zemlji prečkajo, med ostalimi, tudi galaktično magnetno polje naše galaksije. Ali to pomeni, da je naša galaksija spektrometer za takšne delce?

**Ključne besede:** kozmični žarki, magnetni odklon, Observatorij Pierre Auger

**PACS:** 96.50.S-, 98.70.Sa

## Abstract

Cosmic rays are particles that have been stimulating the interest of every physicist for almost a century with their high energy, which is hard or even impossible to obtain on Earth. They consist of low-energy cosmic rays, passing every second through each and everyone, and cosmic rays with extreme energies that are rarely observed even with vast detectors like the Pierre Auger Observatory in Argentina. Precisely these particles, with energies in excess of 10 EeV ( $\approx 1,6$  J), might give answers to many questions, such as: What are the sources of ultra-high energy cosmic rays? Which particles are they composed of? How are particles accelerated to such high energies? When uncovering these secrets, we could use the help of a mass spectrometer which separates particles on their mass-to-charge ratio using a magnet. How? Ultra-high energy cosmic rays encounter, among others, the galactic magnetic field of our galaxy. Does this mean that our galaxy is a spectrometer for such particles?

**Keywords:** cosmic rays, magnetic deflection, Pierre Auger Observatory

**PACS:** 96.50.S-, 98.70.Sa

# Kazalo

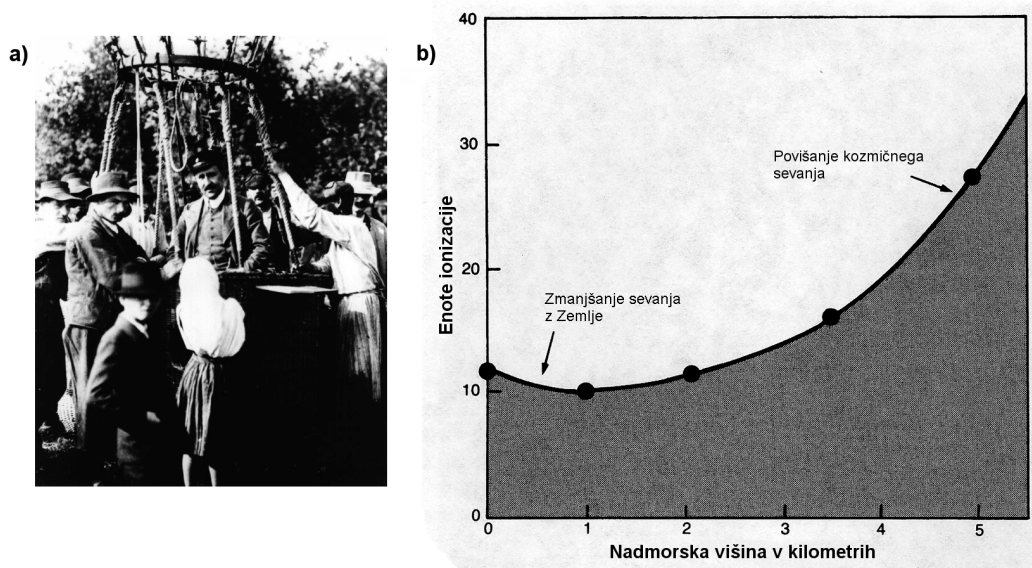
<b>Zahvala</b>	<b>i</b>
<b>Povzetek</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iv</b>
<b>1 Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Kozmični žarki</b>	<b>5</b>
2.1 Izvori kozmičnih žarkov . . . . .	6
2.2 Kozmični žarki ekstremnih energij (UHECR) . . . . .	8
2.3 Širjenje kozmičnih žarkov . . . . .	9
<b>3 Detekcija kozmičnih žarkov</b>	<b>13</b>
3.1 Detekcija kozmičnih žarkov ekstremnih energij . . . . .	13
3.1.1 Površinska detektorska mreža . . . . .	15
3.1.2 Fluorescenčni detektorji . . . . .	16
<b>4 Observatoriji kozmičnih žarkov ekstremnih energij</b>	<b>19</b>
4.1 Observatorij Pierre Auger . . . . .	20
<b>5 Iskanje izvorov kozmičnih žarkov ekstremnih energij</b>	<b>23</b>
5.1 Preselekcija meritev . . . . .	23
5.2 Analiza kozmičnih žarkov ekstremnih energij . . . . .	24
5.3 Kandidati za izvore kozmičnih žarkov ekstremnih energij . . . . .	29
<b>6 Zaključki</b>	<b>41</b>
<b>Literatura</b>	<b>43</b>





# 1 Uvod

Čeprav kozmični žarki obstajajo že od samega začetka vesolja, se za nas njihova zgodovina prične leta 1912, ko Victor F. Hess (slika 1.1 a) prvi odkrije delce, ki prihajajo na zemljo iz vesolja. Njegove meritve so bila potovanja z balonom na



Slika 1.1: (a) Victor Hess v pripravi na meritev z balonom [2]. (b) Hessovi podatki meritev: Najprej se ionizirajoče sevanje zmanjšuje zaradi oddaljevanja od zemlje, potem pa naraste zaradi kozmičnega dela naravnega ozadja [3].

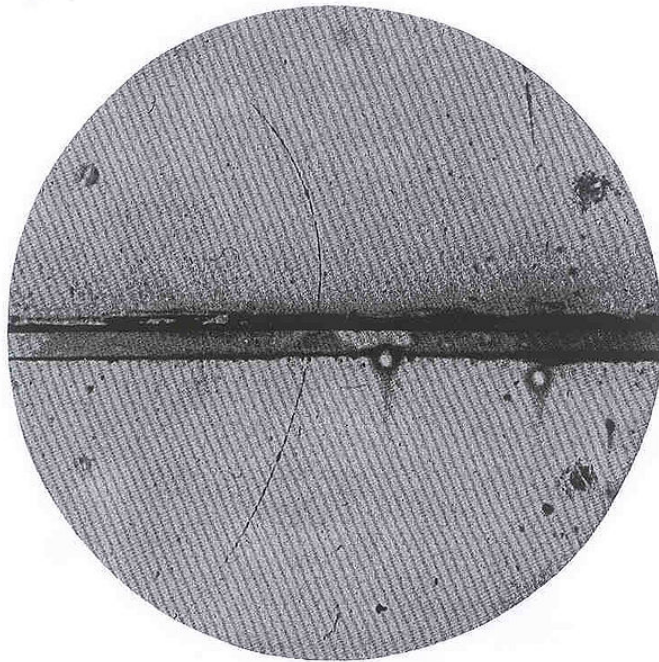
višine do 5000 m, kjer je s pomočjo elektroskopa dokazal, da se z višino povečuje tudi količina ionizirajočega sevanja (slika 1.1 b). Ionizirajoče sevanje so delci ali elektromagnetno valovanje, ki atomu ali molekuli odstranijo elektron. S tem je Hess pokazal, da zemlja ni edini vir ionizirajočega sevanja, kot je bilo pred tem mišljeno. V letih med 1929 in 1937 se je za merjenje kozmičnega sevanja večinoma uporabljal izum Charlesa Wilsona – meglična celica. Ob prehodu delca skozi meglično celico, zaradi ionizacije plina (npr. alkohola), ta kondenzira in tvori sledi, po katerih je priletel delec. Leta 1938 je francoski fizik Pierre Auger (slika 1.2) z uporabo večih detektorjev na določeni razdalji drug od drugega izmeril prihod več delcev ob enakih časih, iz česar je zaključil, da so ti delci nastali iz skupnega izvora. S tem je odkril, da primarni delec ob preletu v atmosfero povzroči plaz sekundarnih delcev. Po zbranih podatkih naj bi kozmični žarek, ki ga je izmeril Auger, imel energijo preko 1 PeV. Augerjevo odkritje je spodbudilo razvoj in gradnjo površinskih detektorskih mrež, ki bi najbolj zajele celoten plaz sekundarnih delcev. Ti so bili najprej kar Geiger-Müllerjevi števci, ki merijo ionizirajoče sevanje, vendar ne nosijo informacije o energiji delca, ki je preletel detektor. Z napredkom elektronike in razvojem fotopomnoževalk pa so začeli uporabljati scintilacijske detektorje in detektorje Čerenkova. Prvi za namen detekcije uporabljajo prozorno plastiko, drugi pa ponavadi visoko destilirano vodo, kjer pride do Čerenkovega po-



Slika 1.2: Pionir na področju detekcije kozmičnih žarkov visokih energij – Pierre Auger [4].

java, opisanega v poglavju 3.1.1. Zbrani podatki iz teh detektorskih mrež so začeli prinašati vedno več podatkov o energijskem spektru kozmičnih žarkov, dokler niso v 50. letih odkrili prvega izmed prevojev v spektru, imenovanega koleno. V prevoju se spremeni naklon energijskega spektra, kar lahko nakazuje na spremembo lastnosti, izvorov ali poti izmerjenih žarkov. Z množico detektorskih sistemov, kot so Volcano Ranch, Haverah Park, Yakutsk in Fly's Eye (opisani v poglavju 4), se je postopoma odkrilo še drugi prevoj (gleženj) in nekatere kozmične žarke, ki presegajo naše trenutno znanje o pospeševanju delcev, saj imajo energijo višjo od 100 EeV. Skrivnosti, ki jih nosijo ti kozmični žarki z resnično ekstremno energijo, so zaenkrat še neodkrите in čakajo na bodoče podatke z vedno bolj kompleksnih observatorijev kozmičnih žarkov.

Kozmični žarki so ogromno prispevali tudi k odkritjem na področju fizike visokih energij, saj so bili prvi pospeševalniki delcev zgrajeni šele v 50. letih prejšnjega stoletja. Carl Anderson je leta 1933 odkril pozitron z uporabo meglíčne celice in magneta, ki je pozitronovo pot odklonil v nasprotno smer kot elektronovo [5]. Štiri leta kasneje pa Anderson in Seth Neddermeyer odkrijeta še mion, ki se zaradi svoje mase v magnetnem polju odkloni bolj kot proton in manj kot elektron [6]. Na sliki 1.3 je vidna pot pozitrona v meglíčni celici, kot jo je videl Anderson. Leta 1947 se je s pomočjo kozmičnih žarkov odkrilo še pion, kjer so fotografske plošče, postavljene visoko v Pirenejih in Andih, z emulzijo zabeležile dvojne sledi, ki jih naredijo razpadni produkti piona. Prvo teoretično razlago glede pospeševanja kozmičnih žarkov in njihovih virov je podal Enrico Fermi leta 1949, kjer predpostavi, da kozmične žarke pospešujejo odboji delcev od magnetnih polj [25]. Ta bi nastajala preko eksplozij supernov ali ostalih katastrofalnih dogodkov v galaksijah. Kmalu



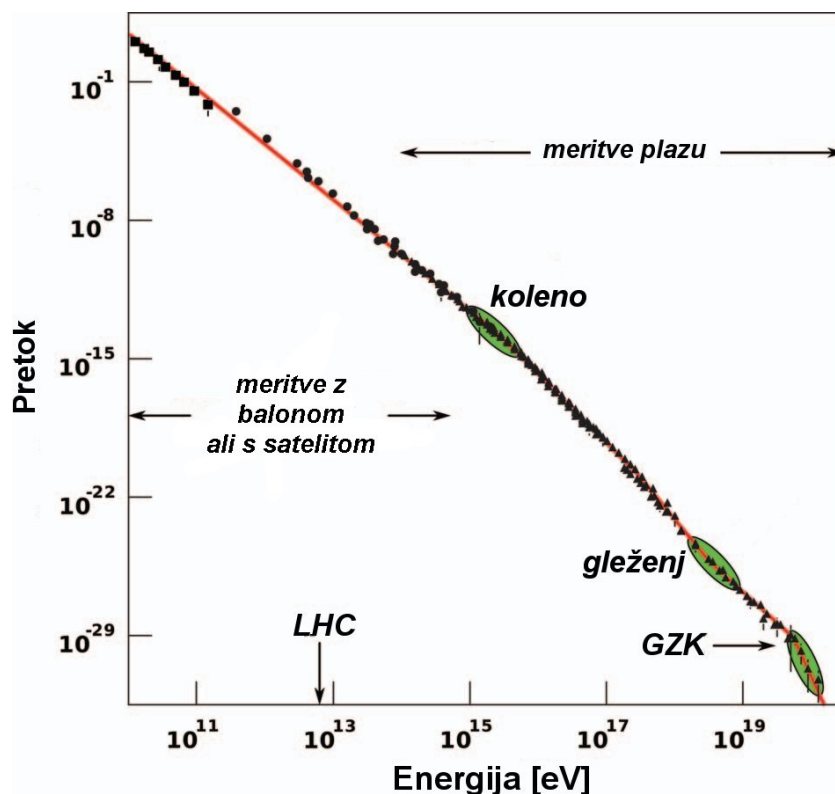
Slika 1.3: Ukrivljena pot pozitrona v meglični celici zaradi zunanjega magnetnega polja pri poskusu Carla Andersona. Elektron bi se odklonil v nasprotno smer (v desno) [5].

zatem pa iskanje osnovnih delcev prevzamejo pospeševalniki, saj se z njimi zagotovi konstanten in bolj zanesljiv vir pospešenih delcev, ki je hkrati tudi monokromatski.



## 2 Kozmični žarki

Kozmični žarki – delci, ki prihajajo na Zemljo iz vesolja – neprestano bombardirajo naš planet. Od tistih z manjšo energijo in visoko pogostostjo, pa do visoko-energijskih kozmičnih žarkov (UHECR – Ultra-High Energy Cosmic Rays) z 10 ali več redov velikosti višjo energijo, ki prispejo do Zemlje le poredko. Njihov energijski razpon se razteza od 10 GeV, ki prihajajo iz bližnjih virov, do preko 100 EeV iz neznanih, oddaljenih virov. Slika 2.1 prikazuje izmerjen spekter kozmičnih žarkov in nam določa pretok kozmičnih žarkov v odvisnosti od njihove energije. Meritve nakazujejo, da so kozmični žarki z višjimi energijami vedno manj pogosti.

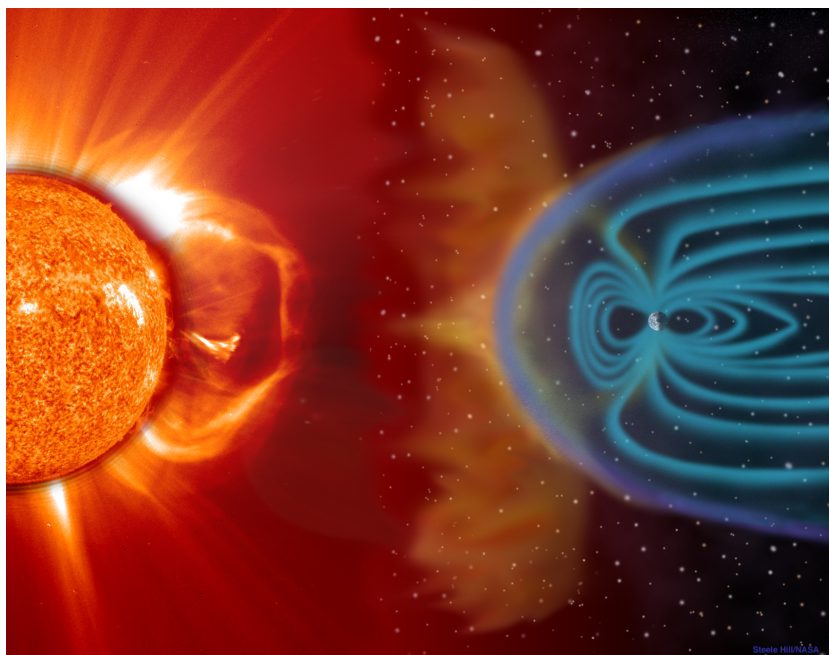


Slika 2.1: Spekter kozmičnih žarkov z označenimi prevoji: kolenom, gležnjem in energijsko mejo kozmičnih žarkov GZK [1]. Meritve se do energije  $\approx 100$  TeV opravljajo neposredno z balonom ali s satelitom, nad to energijo pa je možno kozmične žarke detektirati le preko sekundarnega plazmu delcev.

Spekter je možno opisati s potenčno funkcijo energije  $E^\gamma$  in vsebuje dva prevoja, pri energijah okoli 3 PeV in 3 EeV, ki ju imenujemo koleno in gleženj. Pri kolenu se pojavi približno en kozmični žarek na  $\text{m}^2$  na sekundo, pri gležnju pa en na  $\text{m}^2$  na leto. Čeprav je njuna energija že precej natančno določena preko meritev, je razlog za njun pojav še vedno neznan. GZK, bolj podrobno predstavljen v poglavju 2.3, je izmerjena mejna energija, ki jo dosega kozmični žarki. Zaradi izjemno visoke energije (nad 50 EeV), pa se v tem delu spektra kozmični žarki pojavljajo le približno enkrat na  $\text{km}^2$  na leto, v skrajnih primerih pa celo na stoletje.

## 2.1 Izvori kozmičnih žarkov

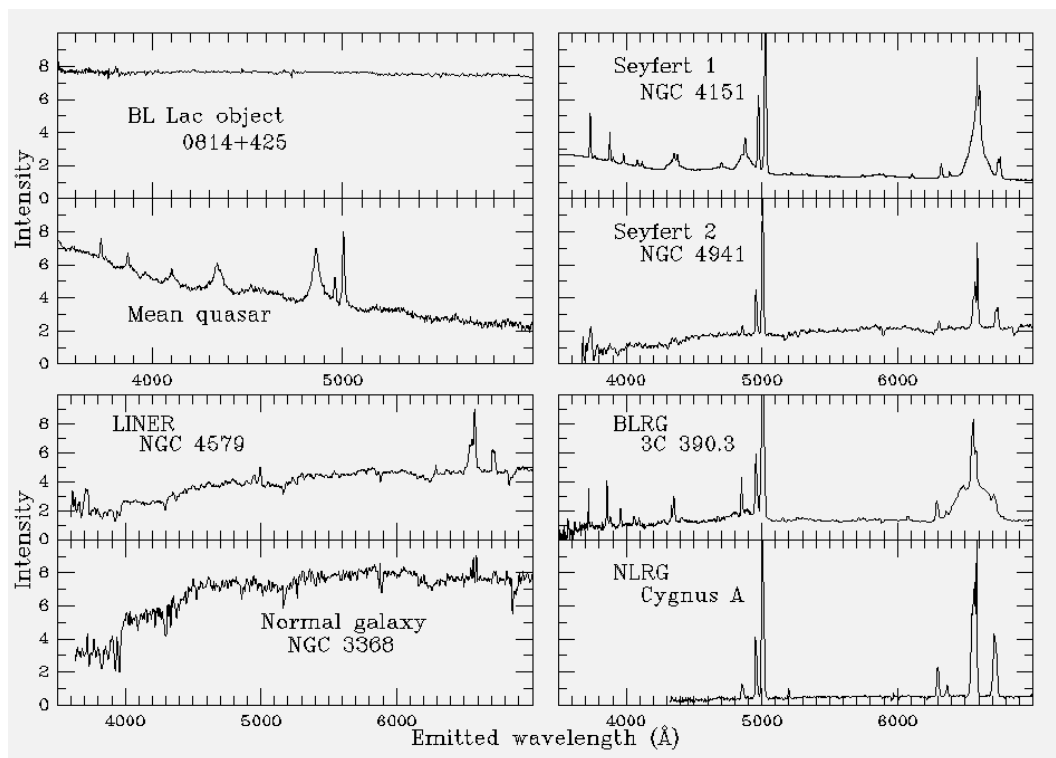
Kozmični žarki imajo izvore v vsaki galaksiji in v sončnih sistemih znotraj njih. Nizkoenergijski delci so posledica procesov v galaksiji sami (npr. sončevi izbruhi, solarni veter, eksplozije supernov . . .), visokoenergijski pa prihajajo iz zaenkrat še neznanih virov. Na sliki 2.2 je prikazan sončev izbruh in njegov vpliv na zemljo. Zaenkrat kot potencialni viri visokoenergijskih zarkov veljajo aktivna galaktična je-



Slika 2.2: Izbruh na soncu odda veliko količino nizkoenergijskih kozmičnih žarkov. Na sliki je z modro prikazano tudi zemljino magnetno polje [7].

dra (AGN), kvazarji in drugi astronomski “pospeševalniki” ter t. i. eksotični izvori, ki bi bili najverjetneje ostanki z začetka vesolja.

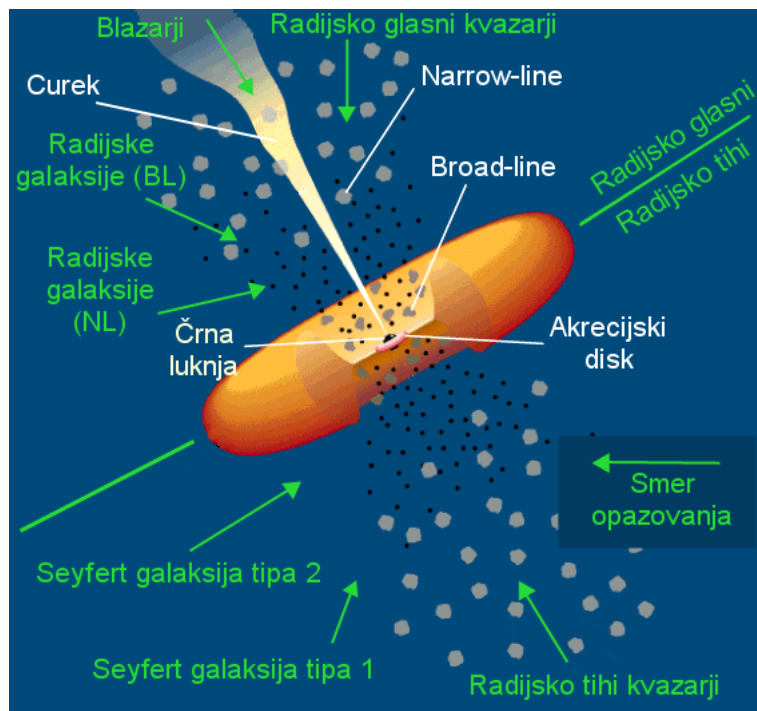
Aktivne galaksije so tiste galaksije, ki imajo v svojem jedru močan izvor sevanja, ki je povišano v delu elektromagnetnega spektra, lahko pa tudi na celotnem območju od radiofrekvenčnega valovanja pa do gama žarkov. Primeri sevalnih spektrov aktivnih galaksij so prikazani na sliki 2.3. Zgoraj levo sta spektra za blazar (BL Lac) in kvazar, zgoraj desno za galaksijo tipa Seyfert 1 in 2, spodaj levo za nizko aktivno jedro (LINER) in normalno galaksijo (brez aktivnega jedra) ter spodaj desno za dve različni radijski galaksiji (Broad-Line, Narrow-Line). V jedru aktivnih galaksij se najverjetneje skriva masivno telo, kot je črna luknja (z maso  $10^6$  do  $10^9$  krat večjo od našega sonca), ki za “gorivo” uporablja okoliško snov. Okoliška snov pa tvori akrecijski disk zaradi gravitacijske privlačnosti črne luknje in vrtilne količine, ki je posledica kroženja sistema okoli telesa. Kozmični žarki lahko nastanejo zaradi pospešitve pri vrtenju okoli masivnega jedra, kar je posledica močnih gravitacijskih in spreminjajočih magnetnih polj [9], katastrofalnih dogodkov v galaksiji ali udarnih valov iz relativističnega curka. Curek je buren izbruh plazme iz masivnih teles v centru aktivnih galaksij in nastane iz snovi v akrecijskem disku zaradi močnih magnetnih polj. Pri pospešitvi zaradi vrtenja se delcu postopoma povečuje kinetična energija, ko ta zaradi prevelike hitrosti odleti tangencialno na smer kroženja. Poznamo več tipov aktivnih galaktičnih jeder, ki se



Slika 2.3: Sevalni spektri različnih tipov galaksij prikazujejo intenziteto oddanega valovanja ( $1\text{\AA} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}$ ). Skala valovnih dolžin zajema približno območje vidne svetlobe ( $\sim 3900 - 7500\text{\AA}$ ) in del UV [8].

razlikujejo v spektrih elektromagnetnega sevanja, vendar so to, po vsej verjetnosti, galaksije s podobnimi lastnostmi, ki jih opazujemo pod različnimi koti. Najbolj poznani tipi aktivnih galaksij so:

- **Seyfert:** Zelo močni izvori IR sevanja in z višjo količino na področju med UV in gama žarki. Delimo jih na Seyfert 1 in Seyfert 2 (lahko tudi nekaj med obema tipoma), ki se razlikujeta po sevalnih spektrih. Seyfert 2 ima ostre, natančno določene vrhove v elektromagnetnem spektru, Seyfert 1 pa ima, poleg tega, tudi bolj razširjene vrhove.
- **Kvazar:** Visokoenergijski (energije nad 100 MeV) viri gama žarkov izven naše galaksije (v povprečju oddaljeni okoli  $15 \times 10^{12}$  svet. let). Med aktivnimi galaktičnimi jedri so tudi najbolj verjetni izvori visokoenergijskih kozmičnih žarkov.
- **Blazar:** Aktivna galaktična jedra, ki imajo relativistični curek obrnjen proti Zemlji, tako da je večino vidnega sevanja s tega področja. Po svetlosti so za kvazarji, vendar imajo še vedno povišano sevanje gama žarkov in radijskega valovanja.
- **Radijska galaksija:** Radijske galaksije, kot že ime pove, oddajo večino svoje energije v obliki sevanja v radiofrekvenčnem področju. To je posledica spiralnega kroženja elektronov v njihovem magnetnem polju, kar povzroči sinhrotronsko sevanje. Spreminjajoča magnetna polja bi v radijskih galaksi-



Slika 2.4: Shema aktivne galaksije s smermi opazovanja, ki določajo tip galaksije (blazar, kvazar, Seyfert in radijska galaksija) [11].

jah lahko, poleg elektronov, pospešila tudi katerega izmed ostalih delcev, za kar jih štejemo med možne vire kozmičnih žarkov ekstremnih energij.

Na sliki 2.4 je prikazana sestava aktivne galaksije in smeri opazovanja, ki določajo njen tip.

Zaradi energijske meje kozmičnih žarkov (opisane v poglavju 2.3) se postavlja vprašanje: Kaj so izvori delcev z energijami nad 10 EeV? Eksotični izvori in eksotični delci bi lahko odgovorili na to vprašanje, saj v nasprotju z navadno metodo pospeševanja predvidevajo obstoj masivnih visokoenergijskih delcev z začetka vesolja, ki postopoma razpadajo in s tem oddajajo kozmične žarke ekstremnih energij. Med možne izvore sodijo topološke napake, kot so strune in magnetni monopoli, ki so zaenkrat le teoretični delci v teoriji velikega poenotenja (GUT) [10].

## 2.2 Kozmični žarki ekstremnih energij (UHECR)

Kozmični žarki ekstremnih energij so po vsej verjetnosti nukleoni, atomska jedra, leptoni ali fotoni, ki dosegajo izjemno visoke energije (nad 10 EeV  $\approx 1,6$  J). Po kinetični energiji se takšni delci lahko primerjajo s teniško žogo, ki se giblje s hitrostjo 27 km/h in ima maso, ki je  $3,4 \times 10^{25}$  krat večja od mase protona. Večina kozmičnih žarkov, ki vstopi v našo atmosfero, ima izvor v naši galaksiji in jih sestavljajo protoni, vodikova jedra, helijeva jedra ali težji elementi, manjši del pa predstavljajo elektroni in nevtrini. Za razliko od teh delcev, z energijami med 10 GeV in 100 TeV, pa je sestava visokoenergijskih kozmičnih žarkov še vedno uganka, ker jih ni možno neposredno detektirati. Neposredna detekcija bi bila možna izven naše atmosfere, kjer pa bi moral biti detektor dovolj velik, da izniči



vpliv majhne pogostosti kozmičnih žarkov z ekstremnimi energijami. Do takrat se bo treba zadovoljiti s posrednim merjenjem na zemljinem površju in v ozračju. Znanstveni interes glede kozmičnih žarkov pa je tako velik ravno zaradi njihove izjemno visoke energije, ki je zaenkrat v trkalnikih ni možno pridobiti. Trkalnik LHC v CERN-u lahko pospeši delce do energije 7 TeV, kar je okoli 6 redov velikosti manj od energije visokoenergijskih kozmičnih žarkov ( $\approx 10$  EeV). Celotna razpoložljiva energija za interakcijo (trk),

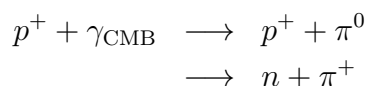
$$s = \left( \sum_{i=1}^n E_i \right)^2 - \left( \sum_{i=1}^n p_i c \right)^2 \quad (2.1)$$

znaša pri LHC  $\sqrt{s_{\text{lhc}}} = 14$  TeV, pri visokoenergijskih kozmičnih žarkih pa tudi 30 krat več ( $\sqrt{s_{\text{uhccr}}} \approx 400$  TeV). Ravno višja energija pospešenih delcev pa nam lahko razloži, iz česa sta vsa snov in antinov sestavljena ter kako je nastajalo vesolje oziroma kaj se je dogajalo po nastanku vesolja. Hkrati bi z identificiranjem virov kozmičnih žarkov lahko bolje razumeli procese, ki omogočajo, da delci s tako visoko energijo sploh obstajajo.

## 2.3 Širjenje kozmičnih žarkov

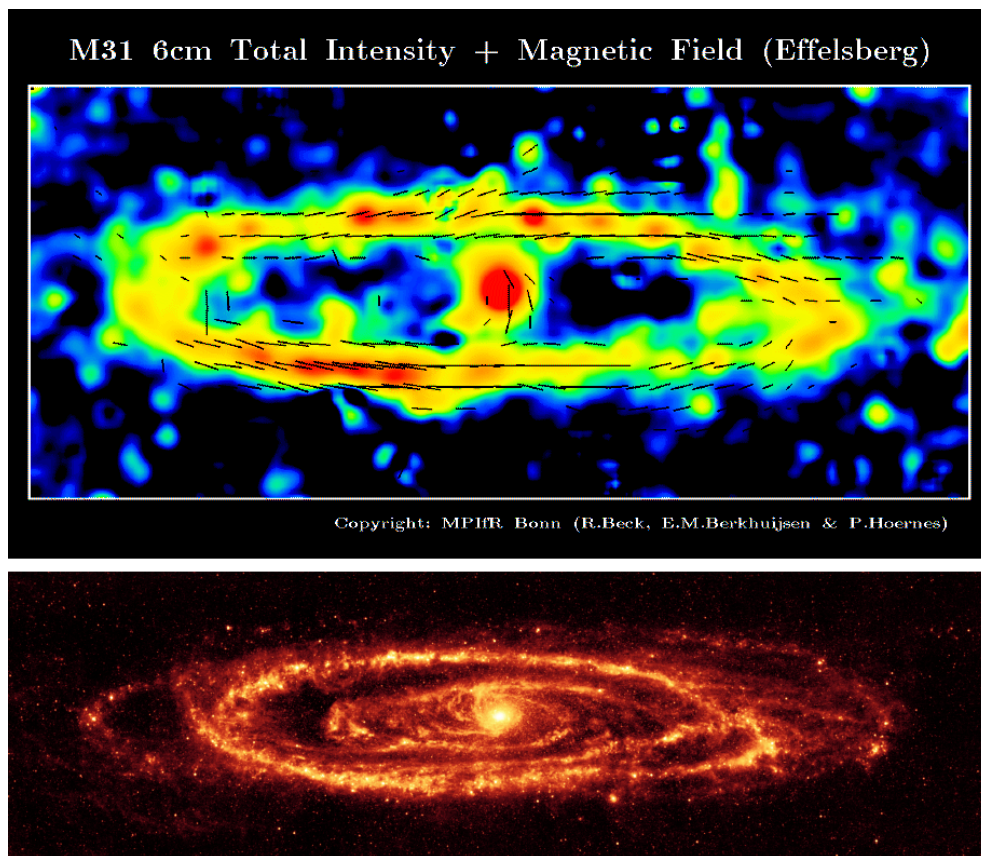
Kozmični žarki na poti proti Zemlji prepotujejo nepredstavljivo dolge razdalje, tako da je za iskanje možnih izvorov potrebno upoštevati več faktorjev, ki lahko na to pot vplivajo.

Vesolje ni popolnoma prepustno za visokoenergijske kozmične žarke, ker je polno fotonov, preostalih zaradi anihilacije snovi in antinov, ki ga imenujemo kozmično mikrovalovno ozadje (CMB – Cosmic Microwave Background). To ozadje je bolj ali manj enakomerno po celotnem vesolju in ima energijo  $\approx 235$   $\mu\text{eV}$  (ali temperaturo  $\approx 2,725$  K), ki pa se zaradi širjenja vesolja zmanjšuje. Energija visokoenergijskega kozmičnega žarka se pri potovanju skozi vesolje počasi zmanjšuje, saj se ob trku s fotoni CMB tvorijo pioni, kot je prikazano spodaj:



Ko energija žarka pade pod mejno vrednost za produkcijo pionov ( $\approx 50$  EeV), se interakcije s fotoni ne pojavljajo več. V energijskem spektru je zato opazen bolj strm naklon pri visokih energijah, ki ga imenujemo meja GZK (Greisen-Zatsepin-Kuzmin) [24]. Vseeno pa so bili izmerjeni kozmični žarki z energijami nad to mejno vrednostjo, ki postavljajo nova vprašanja o njihovi energiji na začetku poti – pri izvoru. Ti kozmični žarki bi lahko bili nevtrini, ker slabo interagirajo z ostalimi delci, vendar jih je ravno zaradi tega in njihove nevtralnosti tudi težko detektirati (ob vstopu v atmosfero verjetno ne povzročijo plazmu sekundarnih delcev). Naslednja razlaga bi lahko ležala v izvorih, ki so bližje Zemlji, tako da imajo kozmični žarki kljub izgubi energije na svoji poti še vedno višjo energijo od mejne vrednosti. Še ena razlaga pa omogoča obstoj eksotičnih izvorov in eksotičnih delcev, ki imajo že od samega začetka energijo, ki je mnogo višja od meje GZK (opis eksotičnih virov v poglavju 2.1).

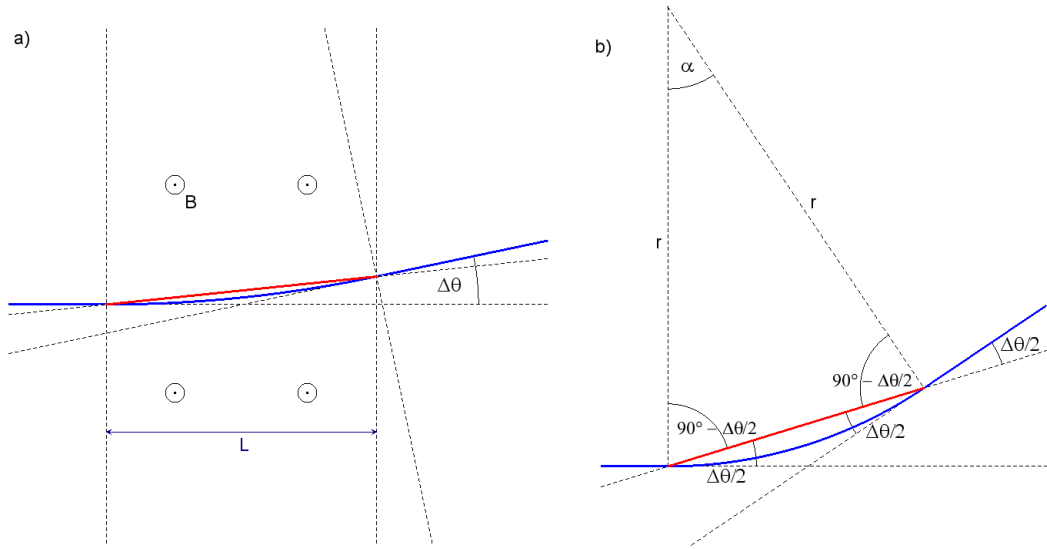
Galaktična magnetna polja so prisotna v medzvezdnem mediju galaksije in poleg gravitacije predstavljajo pomemben vir sil v vesolju. To magnetno polje pa



Slika 2.5: Galaksija Andromeda (M31, NGC 224) v 6 cm radiofrekvenčnem območju z dodanimi vektorji magnetnega polja (zgoraj) [26] in v 24  $\mu\text{m}$  infrardečem območju (spodaj) [27].

vpliva le na nabite delce, saj odklanja njihove smeri in, v primeru hitro spreminjajočih magnetnih polj, pospeši delce do ekstremnih energij. Prvi je galaktično magnetno polje predstavil Fermi leta 1949, ki je predpostavil, da imajo kozmični žarki vir v medzvezdnem mediju, kjer jih pospešujejo magnetna polja [25]. Glavne metode merjenja galaktičnih polj pregledujejo interakcijo elektromagnetnega valovanja in delcev z magnetnim poljem ter preko njih določajo povprečno jakost polja. V veliko pomoč so tudi številni modeli galaktičnih polj, ki predpostavljajo obliko galaktičnega polja in njegovo jakost [28]. S hkratno uporabo modelov in meritev pa lahko določimo povprečno jakost magnetnega polja. Slika 2.5 predstavlja galaksijo Andromeda (tudi M31 ali NGC 224) v infrardečem in radiofrekvenčnem območju z dodanimi vektorji magnetnega polja. Tipične vrednosti galaktičnih magnetnih polj se gibljejo od  $\sim 5 \mu\text{G}$  ( $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$ ) za šibke radijske galaksije,  $\sim 10 \mu\text{G}$  za spiralne galaksije pa tudi do  $\sim 50\text{--}100 \mu\text{G}$  v nekaterih galaksijah z visoko stopnjo nastajanja novih zvezd (npr. M82) [29]. Magnetno polje naše galaksije je v povprečju  $\sim 6 \mu\text{G}$  v okolici sonca in  $\sim 20\text{--}40 \mu\text{G}$  v galaktičnem centru.

Z detekcijo plazme sekundarnih delcev in s podatkom o njihovi energiji lahko preko rekonstrukcije določimo smer, iz katere je priletel primarni delec. Ta smer je sicer uporabna za iskanje možnih izvorov, vendar sam postopek ni tako enostaven, saj se nabiti primarni delci zaradi prisotnih magnetnih polj na svoji poti odklonijo. Nevtralni delci, kot so nevtrini in nevtroni, se na taki poti ne bi uklonili, vendar jih je tudi težje detektirati. Nevtrini zelo slabo interagirajo z okoliško snovjo, nevtroni



Slika 2.6: Prikaz poti delca (modra) v magnetnem polju dolžine  $L$ . (a) Z rdečo je prikazan približek poti, ki je pri pogoju  $\Delta\theta \rightarrow 0$  vedno bolj natančen. (b) Geometrijski prikaz razmerja med kotoma  $\alpha$  in  $\Delta\theta$  (približek poti je tu pretiran zaradi boljše vidnosti).

pa sicer povzročijo plaz sekundarnih delcev, ampak ga zaenkrat ni možno ločiti od plazu, ki ga ustvarijo protoni.

Da bi ugotovili, kakšen je odklon delcev v magnetnem polju, je potrebno uporabiti Lorentzov zakon, predstavljen z enačbo (2.2), kjer  $Ze$  predstavlja naboj delca,  $\vec{E}$  jakost električnega polja,  $\vec{v}$  hitrost potujočega delca in  $\vec{B}$  jakost magnetnega polja.

$$\vec{F}_{\text{em}} = Ze \left( \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right) \quad (2.2)$$

V magnetnem polju vsak nabit delec naredi krožno pot, kar pomeni, da sta centripetalna sila in Lorenzova sila enaki, kot je prikazano z enačbo (2.3).

$$\vec{F}_{\text{cp}} = m \frac{v^2}{r} \cdot \frac{\vec{v}}{|\vec{v}|} = \vec{F}_{\text{em}} \quad (2.3)$$

Če predpostavimo, da nimamo prisotnega električnega polja in da se delec giblje pravokotno na silnice magnetnega polja, lahko iz enačbe (2.3) izrazimo radij kroženja delca  $r$ ,

$$r = \frac{mv}{ZeB} = \frac{p}{ZeB}. \quad (2.4)$$

Na sliki 2.6 a je prikazan odklon delca ob prehodu magnetnega polja z dolžino  $L$ , na sliki 2.6 b pa je vidno razmerje med kotom, ki ga opiše krožni lok poti delca  $\alpha$ , in odklonskim kotom  $\Delta\theta$ . To razmerje je  $\alpha = \Delta\theta$ . Lok, ki ga opiše kozmični žarek pri potovanju v magnetnem polju, je enak  $l = \alpha r$ . S pomočjo približka poti (na slikah 2.6 prikazan z rdečo daljico) lahko zapišemo radij kroženja delca  $r$  z enačbo,

$$r = \frac{l}{\alpha} = \frac{L}{\Delta\theta \cos(\Delta\theta)}. \quad (2.5)$$

Hitrost kozmičnih žarkov ekstremnih energij je večinoma zelo blizu hitrosti svetlobe, magnetna polja galaksij pa so ocenjena kot relativno šibka ( $\sim \mu\text{G}$ ), tako da

so odklonski koti takih žarkov precej majhni in zato lahko uporabimo približek  $\Delta\theta \rightarrow 0$ . To precej poenostavi računanje, saj velja  $\cos(\Delta\theta) \approx 1$  (npr. pri kotu  $10^\circ$  naredimo le 1.5% napako), iz enačb (2.4) in (2.5) pa lahko dobimo izraz za odklonski kot delca v magnetnem polju,

$$\Delta\theta = \frac{LZeB}{p} = D\frac{1}{p} = D\frac{c}{E}. \quad (2.6)$$

V enačbi (2.6) definiramo odklonsko moč  $D = LZeB$  in uporabimo ultra-relativistično relacijo  $p = E/c$ , saj poznamo energijo kozmičnega žarka. V primeru nehomogenega magnetnega polja pa je potrebno določiti smer jakosti magnetnega polja v vsaki točki poti, kar opišemo z enačbo,

$$D = Ze \int_0^L B(x) \sin \phi(x) dx \quad (2.7)$$

kjer je  $\phi$  kot med smerjo gibanja in smerjo magnetnega polja.

## 3 Detekcija kozmičnih žarkov

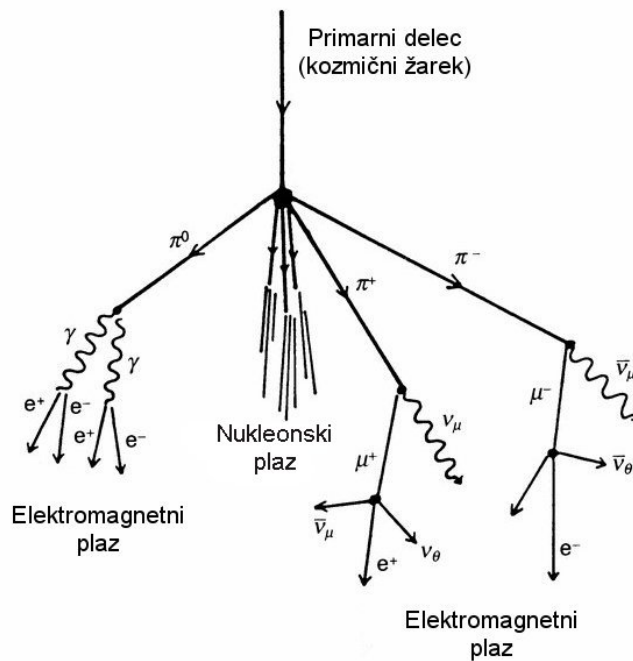
Kozmični žarki se v grobem delijo na visokoenergijske in nizkoenergijske, od tega pa je tudi odvisno njihovo merjenje. Nizkoenergijske, ki imajo zelo veliko pogostost, lahko merimo direktno s scintilacijskim detektorjem, z Geiger-Müllerjevo cevjo, s Čerenkovim detektorjem ali proporcionalnim števcem. Sicer je s tem možno meriti tudi visokoenergijske delce, vendar je potrebno zagotoviti dovolj veliko mrežo detektorjev, da zajamemo vsaj večino plaz sekundarnih delcev, ki ga pri vstopu v atmosfero povzroči primarni delec. Tako je, na primer, vrsta detektorjev v orbiti našega planeta (PAMELA, Alpha Magnetic Spectrometer, Spaceship Earth ...), ki merijo nizkoenergijsko kozmično sevanje z izvorom v naši galaksiji. Vesoljski detektorji niso primerni za merjenje kozmičnih žarkov ekstremnih energij, saj bi s svojo majhno velikostjo le s težavo izmerili te manj pogoste delce. Trenutno edini koncept za detekcijo visokoenergijskih delcev v vesolju je EUSO (Extreme Universe Space Observatory), kjer bi se uporabljali fluorescenčni detektorji (opisani v poglavju 3.1.2), ki spremljajo plaz sekundarnih delcev ob vstopu v atmosfero [12].

### 3.1 Detekcija kozmičnih žarkov ekstremnih energij

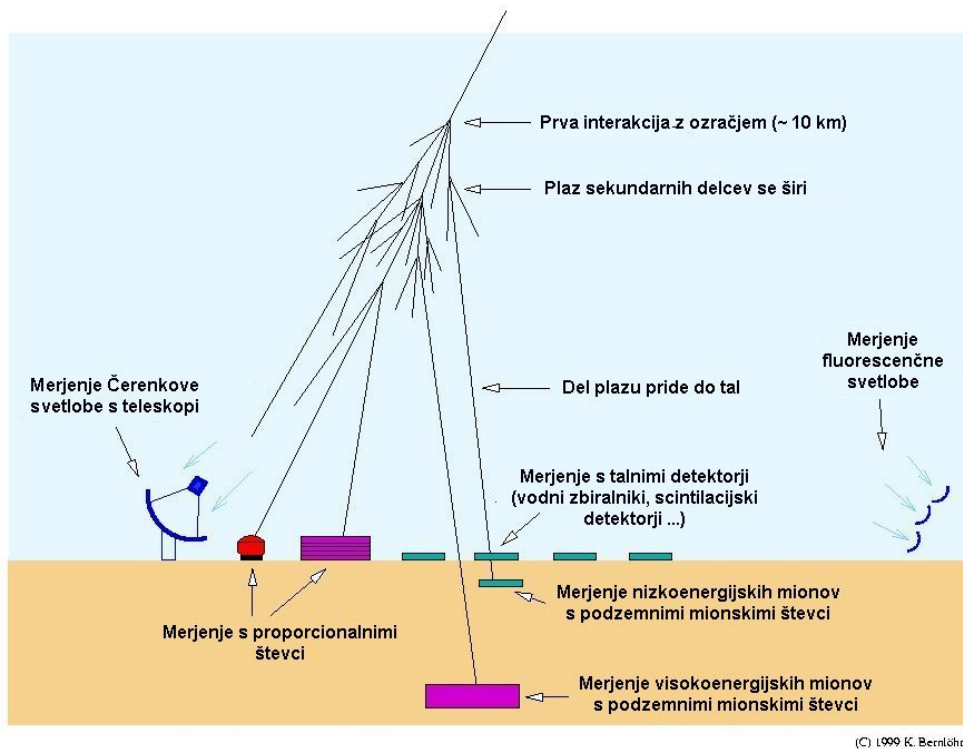
Kozmične žarke ekstremnih energij je zaenkrat možno meriti le posredno, preko plaz sekundarnih delcev. Ta nastane takoj, ko visokoenergijski kozmični žarek vstopi v atmosfero in interagira z zračnimi molekulami. Najprej se iz primarnega delca (kozmičnega žarka) ustvarijo barioni in mezoni, med katerimi so najbolj prisotni pioni, ki ob nadaljnjem gibanju skozi atmosfero spet interagirajo z zračnimi molekulami ali pa prej razpadejo. Nabiti pioni tako, odvisno od gostote atmosfere, razpadajo naprej v mione, nenabiti pa v dva fotona. Slika 3.1 prikazuje shemo plaz sekundarnih delcev in njihovih razpadov, kjer je primarni delec proton. Zaradi oddajanja energije pri trkih delcev se s časom število na novo nastalih delcev zmanjšuje, tako da veliko sekundarnih delcev ne pride do gladine morja. Tisti, ki uspejo priti do gladine morja, so v okoli 99% primerov fotoni, elektroni, pozitroni ali nevtrini in nosijo večino energije plaz. Preostali od teh delcev so še mioni in manj prisotni barioni. Točka, kjer je število sekundarnih delcev maksimalno  $X_{\max}$  (tu je plaz sekundarnih delcev najbolj številčen), je zmnožek med gostoto medija, skozi katerega prepotuje delec, in prepotovane dolžine. Zaenkrat sta najbolj uporabljena tipa detektorjev kozmičnih žarkov dva:

- Talna mreža detektorjev, ki meri površinsko porazdelitev plaz.
- Fluorescenčni detektorji, ki merijo oddano UV svetlobo vzbujenih dušikovih molekul v zraku.

Hibridni detektorski sistemi uporabljajo več različnih detektorjev hkrati. Ti dopolnjujejo drug drugega in omogočajo zajemanje čimbolj natančnih podatkov. Trenutno najbolj uporabljena kombinacija sta površinska detektorska mreža in fluorescenčni detektor.



Slika 3.1: Shema plazu sekundarnih delcev ob vpadu visokoenergijskega kozmičnega žarka v Zemljino atmosfero. Do plazu pride zaradi interakcij med kozmičnim žarkom in jedri plinov v ozračju [13].

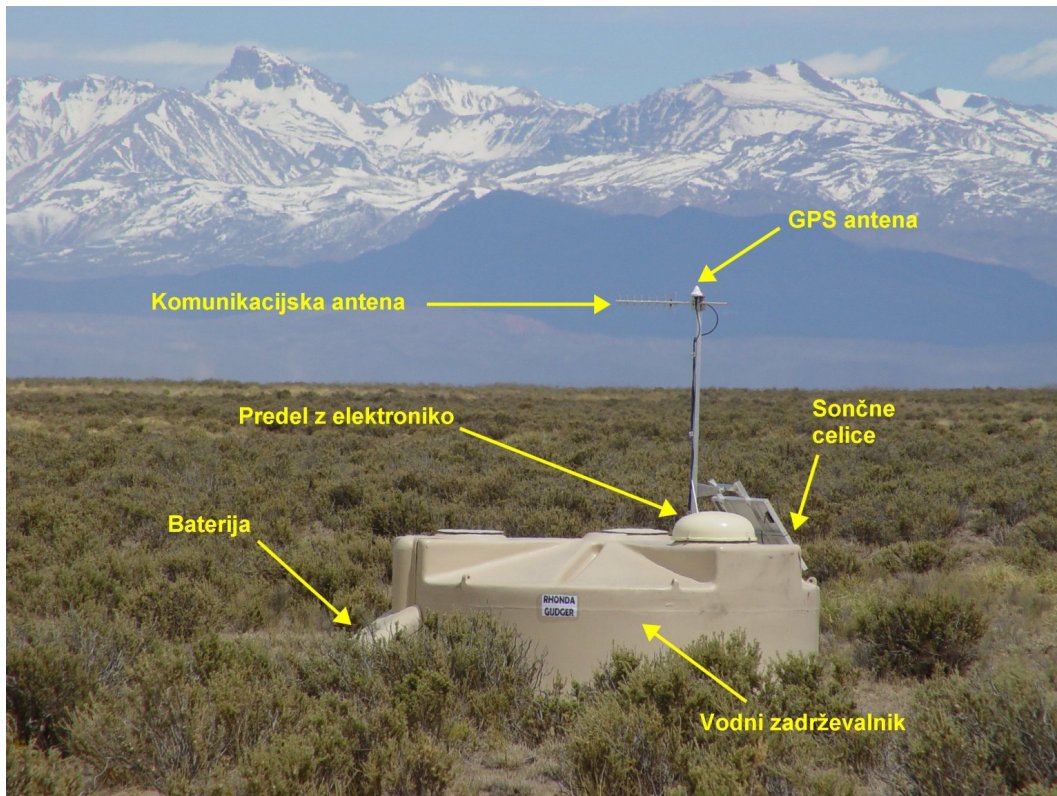


(C) 1999 K. Bernlöhr

Slika 3.2: Sistemi za detekcijo kozmičnih žarkov: površinska detektorska mreža, fluorescenčni detektor, teleskopi za merjenje Čerenkove svetlobe, podzemni mionski števci [14].

### 3.1.1 Površinska detektorska mreža

Pogostost visokoenergijskih kozmičnih žarkov je majhna, tako da je za njihovo merjenje potrebna dovolj velika detektorska površina. V ta namen se uporabljajo površinske detektorske mreže (SD – Surface Detector), ki s svojo veliko površino zajamejo večino vpadlih sekundarnih delcev. Ti detektorji so sestavljeni iz vodnih

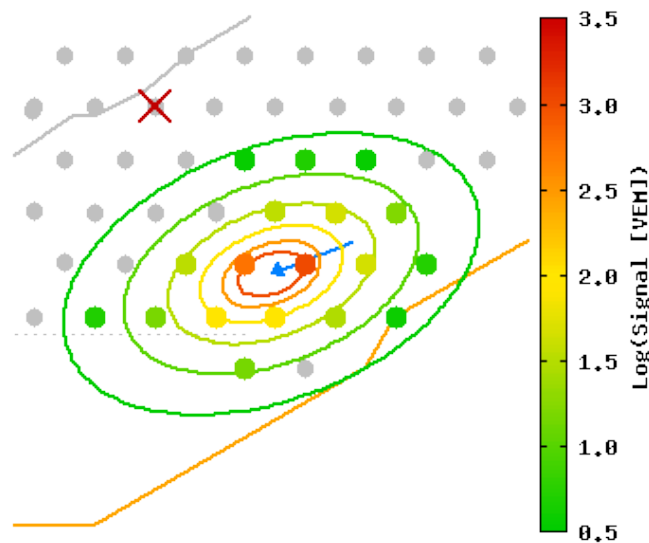


Slika 3.3: Prikaz vodnega zadrževalnika površinske detektorske mreže z označenimi glavnimi komponentami [11].

zadrževalnikov (slika 3.3), ki delujejo s pomočjo Čerenkovega pojava, v nekaterih primerih pa so sestavljeni iz scintilacijskih detektorjev, kjer delec vzbudi atome v prozorni plastiki, ki nato na podlagi fluorescence izsevajo svetlobo. V vakuumu je meja, za vso snov in elektromagnetno valovanje, hitrost svetlobe  $c_0 = 2,99792458 \times 10^8$  m/s, saj nič ne more preseči te vrednosti. V mediju pa hitrost svetlobe ni nepresegljiva meja, saj se ta zaradi lomnega količnika zmanjša. Vpadli delci se tako lahko gibljejo z nadsvetlobno hitrostjo,

$$c_{k\check{z}} > \frac{c_0}{n} \quad (3.1)$$

kjer je  $c_0$  hitrost svetlobe v vakuumu,  $n$  lomni količnik svetlobe v mediju in  $c_{k\check{z}}$  hitrost kozmičnega žarka, ki je kljub trkom z jedri medija še vedno izjemno blizu svetlobni hitrosti v vakuumu (zaradi izjemno visoke energije delec ob trkih izgublja malo energije). Čerenkova svetloba tako seva v značilni stožčasti obliki glede na smer gibanja, kar je posledica relativistično izsevane svetlobe delca. Čerenkov pojav uporabimo tudi v vodnih zadrževalnikih, kjer nastalo Čerenkovo svetlobo izmerimo s fotopomnoževalkami. Te proizvedejo električni signal proporcionalen intenziteti svetlobe. Površinske mreže enako oddaljenih detektorskih sistemov izmerijo



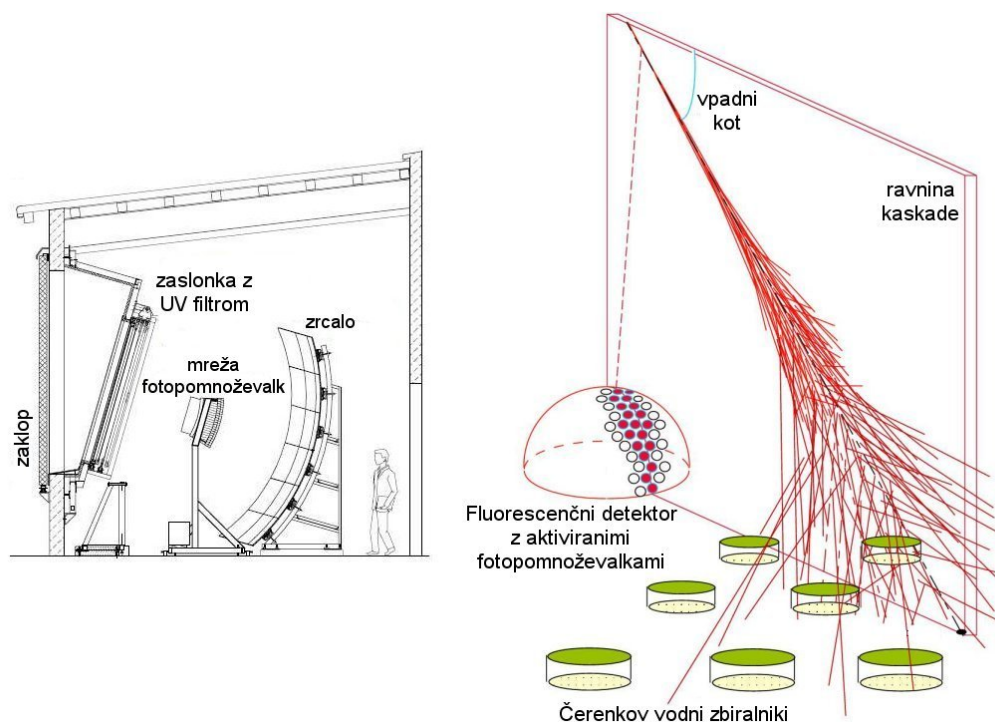
Slika 3.4: Shematični prikaz aktiviranih detektorjev (točke) pri vpadu plazmu kozmičnega žarka. Barve označujejo intenziteto električnega signala v posameznem detektorju [11].

površinsko in časovno razporeditev plazmu sekundarnih delcev s pomočjo GPS in komunikacijskih anten na vodnih zadrževalnikih. Aktiviranje večih sosednjih detektorjev v kratkem časovnem zaporedju nam pove smer, iz katere prihaja kozmični žarek, intenziteta električnega signala z vseh aktiviranih detektorjev pa nam da približen podatek o energiji vpadlega žarka, če privzamemo, da ima plazmo osno simetrijo. Slika 3.4 predstavlja razporeditev mreže in količino signala aktiviranih fotopomnoževalk ob vpadu plazmu. Glavne prednosti površinskih detektorjev so dobra časovna resolucija, občutljivost na mione in njihovo neprekinjeno delovanje. Še vedno pa s tem tipom detektorjev zaznamo le delce, ki prispejo do površinske mreže, kar lahko oteži določanje energije primarnega delca.

### 3.1.2 Fluorescenčni detektorji

Poleg površinske detektorske mreže pa se za detekcijo kozmičnih žarkov uporabljajo tudi fluorescenčni detektorji (FD – Fluorescence Detector). Slednji, v nasprotju s površinskimi detektorji, določijo celotno pot plazmu sekundarnih delcev preko izsevane UV svetlobe vzbujenih dušikovih molekul v zraku. Z vsakim trkom delca z molekulami dušika v atmosferi jim ti oddajo del svoje energije. Vzbujejene dušikove molekule s procesom fluorescence oddajajo UV svetlobo z valovno dolžino med 290–430 nm. Število s fluorescenčnim detektorjem izmerjenih fotonov pa je močno odvisno od atmosferskih pogojev. Izsevani fotoni se lahko absorbirajo v molekulah in aerosolih v ozračju, zato se ob meritvah spremlja še količina aerosolov v ozračju s sistemi LIDAR. Fluorescenčni detektor, kot je prikazan na sliki 3.5, je sestavljen iz sferičnega zrcala, ki fokusira žarke na detektorsko mrežo fotopomnoževalk. Detektor sledi poteku plazmu (slika 3.5 desno) in aktivira fotopomnoževalke, ki prejmejo svetlobni signal preko zrcala. Za meritev je potreben vsaj en fluorescenčni detektor, vendar se z večimi, različno orientiranimi detektorji, dosti bolj natančno določi smer prihoda kozmičnega žarka in njegovo energijo. Pred zrcalom se nahaja





Slika 3.5: Shema fluorescenčnega detektorskega sistema (levo). Prikaz sledenja plazmu sekundarnih delcev s fluorescenčnim detektorjem (desno) [15].

tudi UV filter, ki izbere točno določeno valovno dolžino, tako da izločimo čim več ozadja in ostalih nezaželjenih valovnih dolžin. Kalibracija detektorjev se opravlja s posebnim kalibriranim virom svetlobe, ki se ga nastavi na aperturo detektorja in zanj vemo, kakšen mora biti končen signal fotopomnoževalk. S fluorescenčnim detektorjem je možno meriti potek plazmu tudi do 40 km daleč. Po drugi strani pa je največja pomanjkljivost fluorescenčnega detektorja, da potrebujejo noč brez lunine svetlobe in z dobrimi atmosferskimi pogoji (manjša količina aerosolov v ozračju, manj oblačnosti, nižja vlažnost ...) za dovolj natančne meritve. Tako je njihov čas obratovanja le  $\approx 10\%$ , medtem ko je čas obratovanja površinskih detektorjev  $\approx 100\%$ .

Poleg merjenja oddane UV svetlobe lahko detektiramo tudi Čerenkovo sevanje, ki ga oddajajo delci pri gibanju skozi ozračje. Oddana svetloba je usmerjena predvsem v smeri potovanja žarkov in jo merimo s pomočjo teleskopov (slika 3.2), ki z zrcali fokusirajo svetlobo na fotopomnoževalke. V primeru, da je plaz usmerjen proti fluorescenčnemu detektorju, z njim zajamemo tudi večino Čerenkovega sevanja, tako da ga moramo upoštevati v rekonstrukcijskih modeli.



## 4 Observatoriji kozmičnih žarkov ekstremnih energij

Čeprav je že pred enim stoletjem Victor R. Hess prvi odkril obstoj kozmičnih žarkov, se je lov na kozmične žarke ekstremnih energij začel leta 1962 na observatoriju Volcano Ranch v Novi Mehiki. Takrat je bil namreč izmerjen prvi kozmični žarek z energijo večjo od 100 EeV. Zatem se je zvrstilo še nekaj dogodkov z ekstremno energijo, ki so jih opazili v naslednjih observatorijih kozmičnih žarkov ekstremnih energij:

- **Haverah Park:**

Med obratovanjem observatorija, med leti 1968–1987, je bila v Haverah Parku v Angliji največja mreža površinskih detektorjev s površino 12 km<sup>2</sup>. V tem času so bili detektirani štirje dogodki z energijo višjo od 100 EeV. Mreža je bila sestavljena iz Čerenkovih vodnih detektorjev in scintilacijskih detektorjev [16, 1].

- **Yakutsk Extensive Air Shower (EAS) array:**

Ruski observatorij, sedaj sestavljen iz 58 detektorjev površinske mreže, 6 mionskih podzemnih detektorjev in 48 detektorjev Čerenkove svetlobe (ki jo oddajo delci v zraku) s površino  $\sim 10$  km<sup>2</sup>, je zabeležil prve podatke leta 1970. Delec z najvišjo energijo na tem observatoriju ( $\sim 140$  EeV) je bil opažen leta 2004 [17, 1].

- **Fly's Eye in HiRes:**

Observatorij v ameriški zvezni državi Utah in njegov visokoresolucijski naslednik sta bila glavna člena v razvoju fluorescenčnih detektorjev. Prvi je deloval v letih 1981-1993 in je bil sestavljen iz dveh fluorescenčnih detektorjev, ki sta bila obrnjena v različne smeri, da lahko bolj natančno sledita poteku plazmu sekundarnih delcev (v t. i. stereo pogledu). Leta 1991 je eden izmed detektorjev zasledil kozmični žarek z do sedaj največjo energijo 320 EeV in precejšno napako na energiji (natančnost meritve bi bila večja, če bi kozmični žarek izmeril tudi drugi detektor). Observatorij z dvema visokoločljivima (HiRes) detektorjema deluje od leta 1994 naprej in ima, za razliko od predhodnika, večji zrcali in bolj fino mrežo fotopomnoževalk, kar izboljša ločljivost. Vidno polje obeh detektorjev je nekje med 3° in 17° nad horizontom [18, 1].

- **AGASA - Akeno Giant Air Shower Array:**

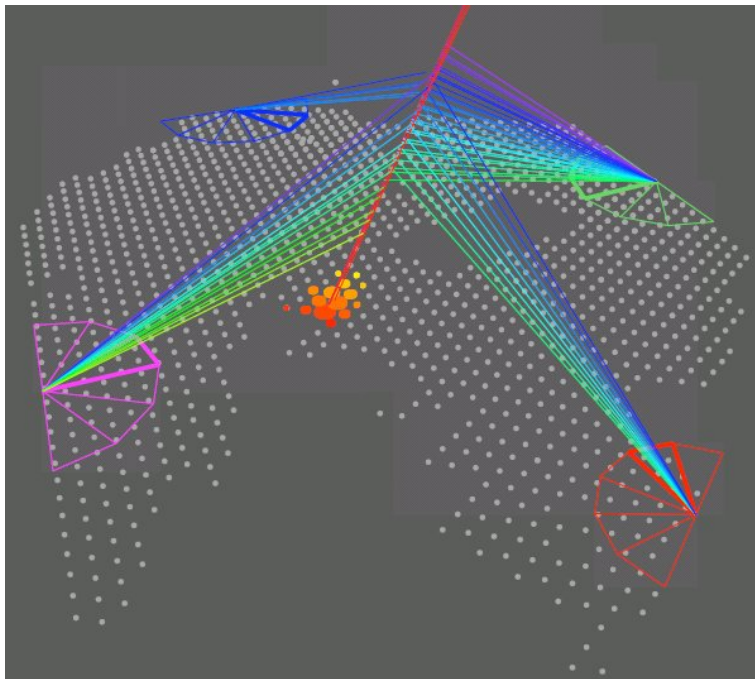
Observatorij se nahaja v Akeni na Japonskem, kjer je 111 površinskih detektorjev in 27 mionskih detektorjev razporejenih v mrežo na površini okoli 100 km<sup>2</sup>. V letih delovanja je zabeležil enajst dogodkov z energijo večjo od 100 EeV, med njimi tudi drugi na lestvici najbolj energijskih kozmičnih žarkov z energijo  $\approx 200$  EeV [19, 1].

- **Observatorij Pierre Auger:**

Observatorij Pierre Auger v Argentini že od leta 2004 meri prihajajoče visokoenergijske kozmične žarke in je trenutno vodilni detektorski sistem za merjenje kozmičnih žarkov ekstremnih energij. Bolj podroben opis je v poglavju 4.1.

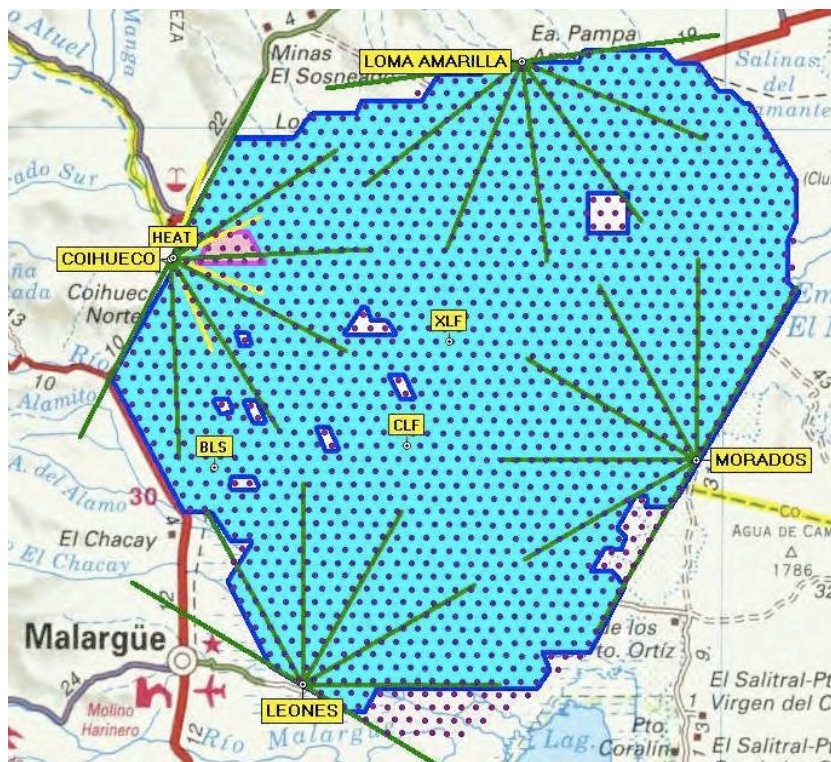
## 4.1 Observatorij Pierre Auger

Observatorij Pierre Auger, ki se nahaja v rumeni pampi (Pampa Amarilla) zahodne Argentine, je trenutno najobširnejši sistem za detekcijo kozmičnih žarkov ekstremnih energij, poimenovan po francoskem znanstveniku Pierru Victorju Augerju. Observatorij je bil popolnoma zgrajen leta 2008 in sedaj vključuje znanstvenike iz 19 držav, ki sodelujejo pri raziskavah. Hibridni sistem je sestavljen iz površinskih detektorskih mrež in fluorescenčnih detektorjev (slika 4.1). Prvi so sestavljeni iz okoli



Slika 4.1: Hibridni sistem Observatorija Pierre Auger ob vstopu kozmičnega žarka v vidno področje fluorescenčnih detektorjev. Površinska detektorska mreža, tu še nedokončana (slika iz leta 2007), je izmerila signal v obarvanih točkah [11].

1600 Čerenkovih vodnih zadrževalnikov, ki so napolnjeni s približno 12t visoko filtrirane in deionizirane vode. Zadrževalniki so razporejeni v trikotno mrežo, kjer stranice merijo 1,5 km, celoten sistem pa pokriva območje v velikosti 3000 km<sup>2</sup>. Vsak izmed detektorjev v mreži vsebuje tri 9 palične fotopomnoževalke, ki merijo svetlobo proporcionalno energiji vpadlega delca. Štirje fluorescenčni detektorji, sestavljeni iz 24 optičnih teleskopov, pa pregledujejo večino ozračja nad površino detektorjev za vpadle kozmične žarke (med 1.5° in 30° nad horizontom). Oba sistema (slika 4.2) delujeta hkrati približno 10% časa zaradi načina delovanja fluorescenčnega detektorja, vendar bistveno prispevata k bolj zanesljivim podatkom in lažji določitvi poteka plazmu sekundarnih delcev.



Slika 4.2: Prikaz pokritosti Observatorija Pierre Auger: Modre točke predstavljajo površinsko detektorsko mrežo, zelene črte pa smer teleskopov fluorescenčnih detektorjev. Delujoči detektorji so znotraj svetlomodrega območja [20].

V nadaljnjih letih je na Observatoriju v načrtu gradnja:

- dodatnih treh, višje usmerjenih, fluorescenčnih detektorjev (HEAT), ki bi pokrili kote med  $30^\circ$  in  $58^\circ$  nad horizontom. Prvi meri podatke že od januarja 2009 [21];
- površinske detektorske mreže za natančnejši zajem kozmičnih delcev z energijami med  $10^{17}$  eV in  $10^{19}$  eV in podzemne mionske števec (AMIGA) [22];
- radijskih detektorjev, ki bi merili radijske signale, nastale ob vstopu kozmičnega žarka v Zemljino atmosfero (AERA) [23].

Prav tako je načrtovana tudi gradnja observatorija na severni polobli, ki bi opazoval severno nebo, s čimer bi dobili pregled nad celotnim nebom (na sliki 5.5 se lahko vidi del neba, kjer ni vpadlih žarkov).



# 5 Iskanje izvorov kozmičnih žarkov ekstremnih energij

## 5.1 Preselekcija meritev

Pri svoji analizi sem uporabljal zbirko z več kot  $2,8 \times 10^6$  meritvami, pridobljeno na Observatoriju Pierre Auger med leti 2004–2011. Ti vključujejo število aktiviranih detektorjev, vpadno smer in njeno napako, energijo in napako na energiji, čas in datum aktiviranja detektorjev ter ostale vrednosti, ki določajo, če je prišlo do kakšnih napak med detekcijo ali rekonstrukcijo. Za potrebe iskanja izvorov kozmičnih žarkov ekstremnih energij sem naredil naslednjo preselekcijo:

- Energija kozmičnega žarka presega  $E = 10$  EeV.
- Relativna napaka na energiji, izračunana s pomočjo parametrov  $S_{1000}$  in  $dS_{1000}$ , ne presega vrednosti  $\frac{dE}{E} = 0,25$ .
- Odstranil sem podatke z morebitno napačno rekonstrukcijo in v primeru, ko sosed detektorja z najvišjo intenziteto signala ni deloval.
- Zenitni kot ni večji od  $z = 60^\circ$ , ker imajo ti žarki slabo energijsko in kotno resolucijo.

Po preselekciji tako ostane še 5612 meritev za nadaljno analizo. Kot primer so v tabeli 5.1 prikazane lastnosti treh kozmičnih žarkov, podanih iz zbirke meritev. Med njimi je tudi kozmični žarek z najvišjo izmerjeno energijo, ki sem ga izključil iz analize zaradi velike napake na energiji ( $\frac{dE}{E} \approx 0,375$ ) in zenitnega kota večjega od  $z = 60^\circ$ .

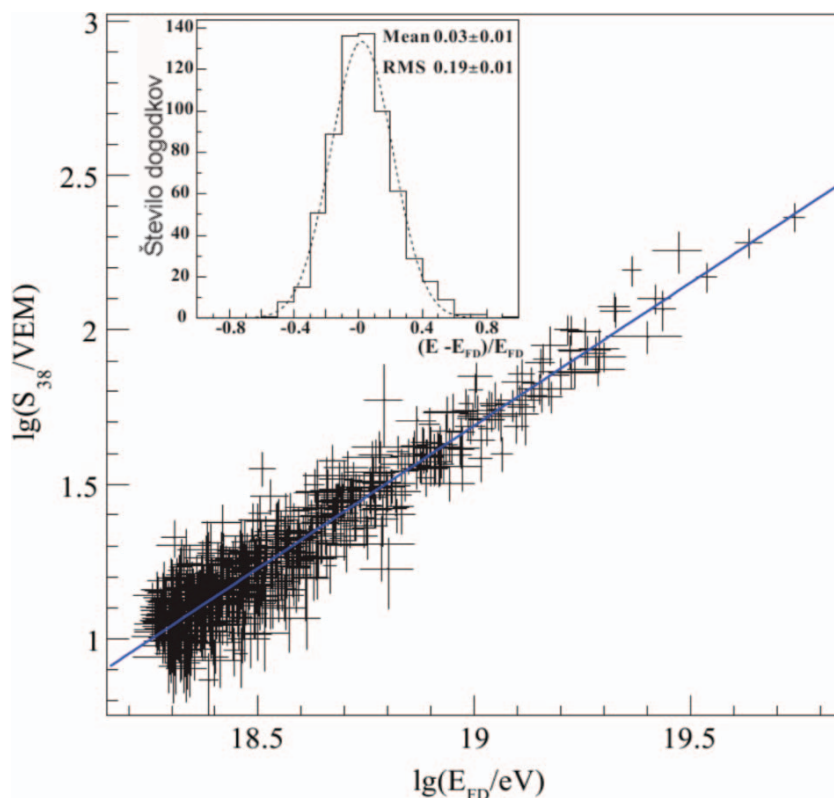
Tabela 5.1: Lastnosti treh najbolj energijskih kozmičnih žarkov, izmerjenih na Observatoriju Pierre Auger.

Auger ID	200724101518	200701303199	200826803082
Št. aktiviranih detektorjev	33	13	24
Datum meritve	30.8.2007	14.1.2007	25.9.2008
Zenitni kot - $z$ ( $^\circ$ )	74,93	14,30	49,82
Azimutni kot - $A_{pa}$ ( $^\circ$ )	63,92	86,20	140,73
$L$ ( $^\circ$ )	76,66	-57,20	36,41
$B$ ( $^\circ$ )	-7	41,81	-3,58
$S_{1000}$	219,58	752,97	415,44
$dS_{1000}$	82,33	26,09	10,44
$dz$ ( $^\circ$ )	0,06	0,15	0,07
$dA_{pa}$ ( $^\circ$ )	0,04	0,63	0,10
Energija (EeV)	168,47	142,07	122,67

## 5.2 Analiza kozmičnih žarkov ekstremnih energij

V zbirki podatkov Observatorija Pierre Auger so za vsako izmed meritev podane merske napake na vpadnih smereh v horizontnih koordinatah in posredno tudi na energiji.

Energija in napaka na energiji se izračunata preko parametra  $S_{1000}$  in napake, ki jo naredimo pri njegovem merjenju.  $S_{1000}$  predstavlja celoten signal, ki ga površinski detektorji izmerijo v oddaljenosti 1000 m od vpadne osi plaz. Dobljeni signal je proporcionalen primarni energiji kozmičnega žarka kot nakazujejo simulacije. Le za žarke, ki prihajajo pod večjimi zenitnimi koti in pri tem prepotujejo daljšo razdaljo po ozračju, je potrebno  $S_{1000}$  prilagoditi za različno porazdelitev signala po površinskih detektorjih. Prav v ta namen se izračuna parameter  $S_{38^\circ}$  pri zenitnem kotu  $38^\circ$ , ki zelo dobro opisuje plazove sekundarnih delcev blizu tega kota. Na sliki 5.1 je prikazana korelacija med signalom površinskega detektorja, izražena s parametrom  $S_{38^\circ}$  in energijo, izmerjeno s fluorescenčnimi detektorji. Ta ko-

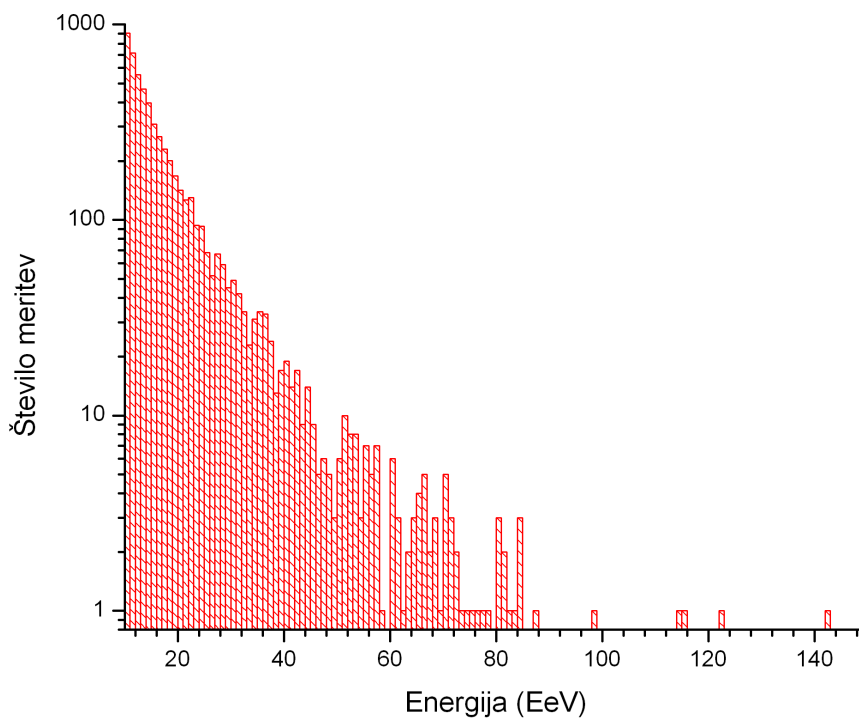


Slika 5.1: Korelacija med parametrom površinskih detektorjev  $S_{38^\circ}$  in energijo, pridobljeno s fluorescenčnim detektorjem. Obe osi sta predstavljeni v logaritemski skali. Notranja slika predstavlja normalno porazdelitev dogodkov okoli izbrane premice [1].

relacija nam nato omogoča umeritev energije iz talnega detektorja na energije fluorescenčnega detektorja, ki so bolj natančne. Napako na energiji sem izračunal iz

$$dE = E \frac{dS_{1000}}{S_{1000}}. \quad (5.1)$$



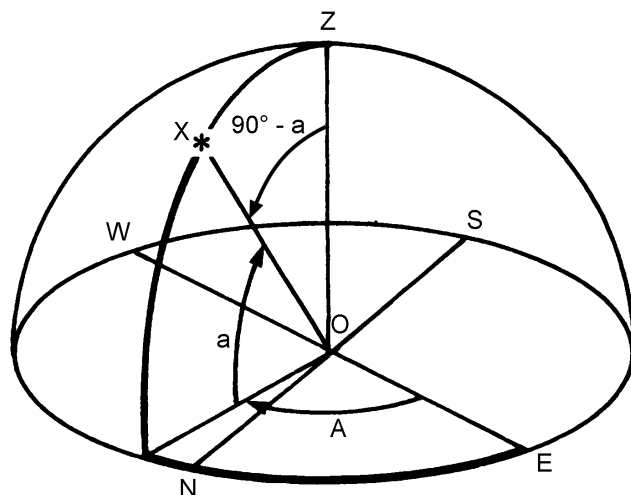


Slika 5.2: Energijski spekter podatkov Observatorija Pierre Auger, omejen z najnižjo energijo  $E_{\min} = 10$  EeV. Število dogodkov je zaradi boljše vidnosti v logaritemski skali.

Meritve sem razvrstil v energijski spekter (slika 5.2), ki dobro ponazarja, kako redki so kozmični žarki z ekstremno energijo, saj so v sedmih letih delovanja observatorija zaznali le šest kozmičnih žarkov z energijo višjo od 100 EeV in dovolj majhno napako na energiji.

Horizontne koordinate so eden od načinov, s katerim astronomi in astrofiziki opisujejo pozicije zvezd in ostalih nebesnih teles v vesolju. Zanje značilna sta altituda  $a$ , ki označuje kot med ravnino obzorja in nebesnim telesom, in azimut  $A$ , ki predstavlja kot med  $0^\circ$  in  $360^\circ$ , kjer sever predstavlja  $0^\circ$ , ostalim smerem neba pa v smeri urinega kazalca določimo kot (vzhod je  $90^\circ$ , jug  $180^\circ$  in zahod  $270^\circ$ ). Predvsem se uporabljajo, ko hočemo opisati neko nebesno telo z naše trenutne pozicije na Zemlji. Alternativno lahko uporabljamo tudi zenitni kot, ki predstavlja kot med točko navpično nad opazovalcem in nebesnim telesom ( $z = 90^\circ - a$ ). Poleg zenitnega kota pa podatki Observatorija Pierre Auger uporabljajo še različno merjenje azimutnega kota, saj kot  $0^\circ$  ustreza smeri proti vzhodu, ostale smeri neba pa si sledijo v smeri nasprotni urinemu kazalcu (sever je  $90^\circ$ , zahod  $180^\circ$  in jug  $270^\circ$ ), kar je enako  $A_{\text{pa}} = 90^\circ - A$ . Na sliki 5.3 je prikazan horizontni koordinatni sistem, kot ga uporablja observatorij Pierre Auger.

Pri svoji analizi sem zaradi zanimanja za ekstragalaktične izvore kozmičnih žarkov uporabljal galaktične koordinate, ki so tudi najbolj uporabne, saj niso odvisne od kroženja in rotacije Zemlje. V tem primeru sta kota, ki opisujeta vpadne smeri, galaktična dolžina  $L$  in galaktična širina  $B$ . Prvi opisuje kot v ravnini galaksije med navidezno premico, ki povezuje naše sonce s centrom galaksije in pravokotno projekcijo nebesnega telesa na ravnino galaksije. Smer merjenja vrednosti  $L$  je v nasprotni smeri urinega kazalca. Galaktična širina predstavlja kot med ravnino



Slika 5.3: Horizontni koordinatni sistem, kot ga uporablja Observatorij Pierre Auger. Črke predstavljajo zenit (Z), azimutni kot (A), altitudo ( $a$ ), položaj opazovalca (O) in strani neba (E, N, W, S) [30].

galaksije in nebesnim telesom. Na sliki 5.4 a so za boljšo predstavo prikazane galaktične koordinate. Napake na vpadnih smereh so, kot sem že prej omenil, v horizontnih koordinatah, tako da je za računanje z galaktičnimi koordinatami potrebno izračunati še njihove napake. Napravil sem transformacijo iz horizontnih v ekvatorialne koordinate in potem še enkrat iz ekvatorialnih koordinat v galaktične koordinate. Pri vsaki izmed teh transformacij gre za rotacijo koordinatnega sistema, tako da se dolžine pri tem ohranjajo. Transformacijo iz horizontnih v ekvatorialne koordinate sestavljata enačbi

$$\sin \delta = \sin a \sin \phi + \cos a \cos \phi \cos A \quad (5.2)$$

in

$$\cos H = \frac{\sin a - \sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta}. \quad (5.3)$$

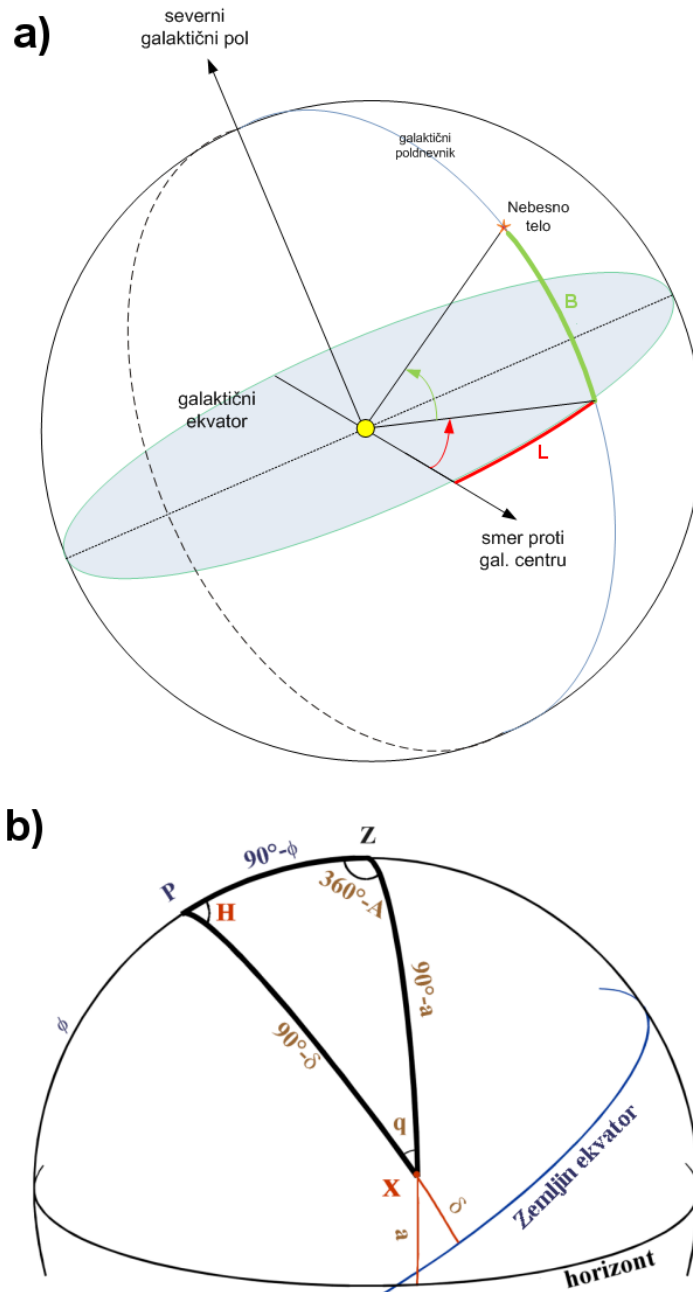
$\delta$  in  $H$  predstavljata deklinacijo in urni kot pri ekvatorialnih koordinatah,  $\phi$  je geografska dolžina,  $a$  in  $A$  pa označujeta že prej predstavljena kota horizontnih koordinat. Rotacija med horizontnimi in ekvatorialnimi koordinatami je predstavljena na sliki 5.4 b. Transformacijo iz ekvatorialnih v galaktične koordinate pa predstavljata enačbi

$$\sin B = \cos \delta \cos(27,4^\circ) \cos(\alpha - 192,25^\circ) + \sin \delta \sin(27,4^\circ) \quad (5.4)$$

in

$$\tan L = \frac{\sin \delta - \sin B \sin(27,4^\circ)}{\cos \delta \sin(\alpha - 192,25^\circ) \cos(27,4^\circ)} + 33^\circ. \quad (5.5)$$

Tu  $\alpha$  predstavlja rektascenzijo, ki je kot med soncem ob pomladnem enakonočju (točka med Zemljinim ekvatorjem in ekliptiko - horizontalno potjo okoli sonca) in soncem ob poljubnem dnevu v letu. Z urnim kotom je ta povezan  $\alpha = \text{LST} - H$ , pri čemer LST (Local Sidereal Time) predstavlja siderski ali zvezdni čas (več o



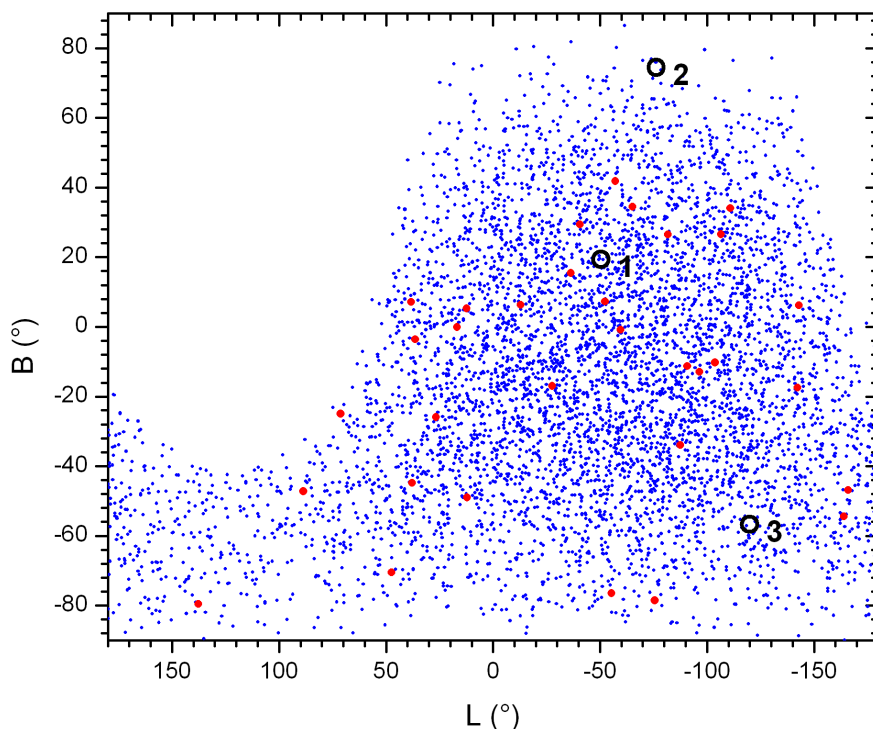
Slika 5.4: (a) Prikaz galaktičnega koordinatnega sistema, kjer je  $L$  (rdeče) galaktična dolžina in  $B$  (zeleno) galaktična širina. Sredinska točka (rumena) označuje naše sonce [32]. (b) Primerjava med horizontnimi in ekvatorialnimi koordinatami. Oznake predstavljajo: zenit ( $Z$ ), Zemljin pol ( $P$ ), pozicijo nebesnega telesa ( $X$ ), altitudo ( $a$ ), azimut ( $A$ ), geografsko širino ( $\phi$ ), urni kot ( $H$ ) in deklinacijo ( $\delta$ ) [31].

LST v [31]). Napake na galaktičnih kotih so tako sestavljene iz napak na kotih horizontnega sistema in se jih izračuna po enačbah (5.6) in (5.7) [33]. Ti enačbi predstavljata le transformacijo med ekvatorialnimi in galaktičnimi koordinatami, vendar se za pretvorbo med horizontalnimi in ekvatorialnimi koordinatami uporabi isto enačbo.

$$dL^2 = \left(\frac{\partial L}{\partial \alpha}\right)^2 d\alpha^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial \delta}\right)^2 d\delta^2 \quad (5.6)$$

$$dB^2 = \left(\frac{\partial B}{\partial \alpha}\right)^2 d\alpha^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial \delta}\right)^2 d\delta^2 \quad (5.7)$$

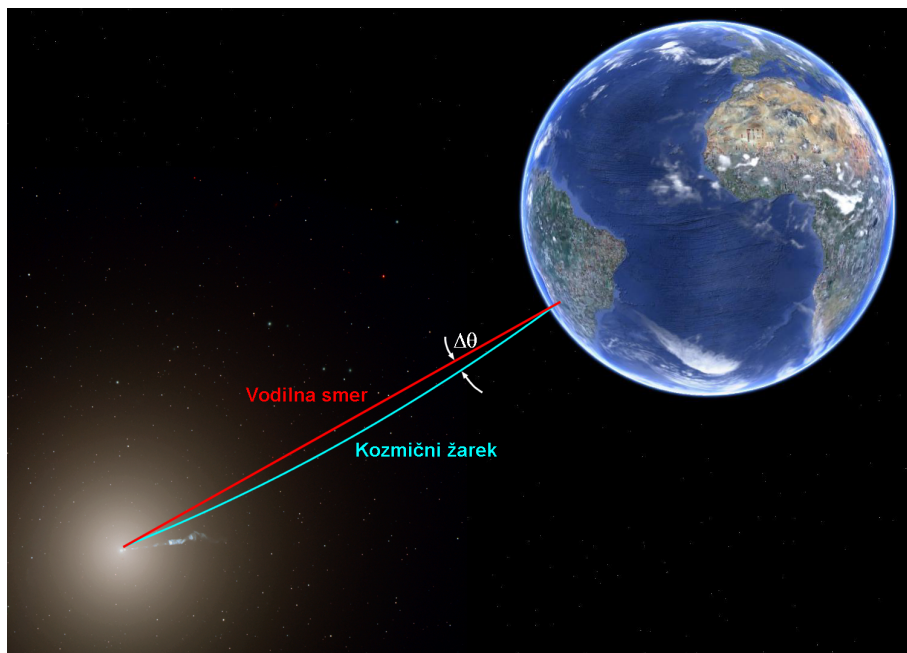
Za izračun napak na galaktičnih koordinatah v enačbi (5.6) in (5.7) vstavimo (5.4) in (5.5), izračunamo odvode, nato pa vstavimo na enak način izračunani napaki  $d\alpha$  in  $d\delta$ . S podanimi podatki o vpadnih smereh kozmičnih žarkov, ki se jih izračuna preko rekonstrukcije plazmu, je možno narisati porazdelitev vpadnih smeri po nebu. Podatke sem po preselekciji vrisal v graf LB na sliki 5.5, kjer modre točke predstavljajo smeri kozmičnih žarkov. Na sliko sem za boljšo preglednost kozmičnih žarkov ekstremnih energij dodal še oranžne točke, ki predstavljajo kozmične žarke z energijami, višjimi od  $E = 70$  EeV. Rdeči krogi označujejo tri izmed najmočnejših izvorov radijskega sevanja na nebu: Centaurus A, Virgo A in Fornax A.



Slika 5.5: Porazdelitev vpadnih smeri kozmičnih žarkov v galaktičnih koordinatah (modre točke), vpadnih smeri tistih z energijo nad  $E = 70$  EeV (rdeče točke) in smeri treh izmed najmočnejših radijskih izvorov (črni krogi): 1) Centaurus A ( $L = -50, 48^\circ$ ,  $B = 19, 42^\circ$ ), 2) Virgo A ( $L = -76, 22^\circ$ ,  $B = 74, 49^\circ$ ) in 3) Fornax A ( $L = -119, 84^\circ$ ,  $B = -56, 69^\circ$ ).

### 5.3 Kandidati za izvore kozmičnih žarkov ekstremnih energij

V poglavju 2.3 je prikazan poenostavljen izračun odklonskega kota kozmičnega žarka v magnetnem polju, če poznamo jakost magnetnega polja in energijo žarka. V resnici pa je jakost potrebno izmeriti v vsaki točki poti kozmičnega žarka, kar pa ni enostavno, saj se lahko smer silnic magnetnega polja tudi spreminja oziroma je ne poznamo. Zaradi tega se je lažje odločiti za vodilno smer, kjer predpostavimo, da se nahaja izvor in uporabimo kozmične žarke v okolici, da nam povedo nekaj o magnetnem polju, skozi katerega potujejo (slika 5.6). Pri iskanju možnih izvorov tako lahko rečemo, da bi lahko bili žarki z maksimalnim kotom  $\Delta\theta_{\max}$  okoli vodilne smeri še vedno iz istega izvora. Z znano energijo žarka lahko preko skalarnega



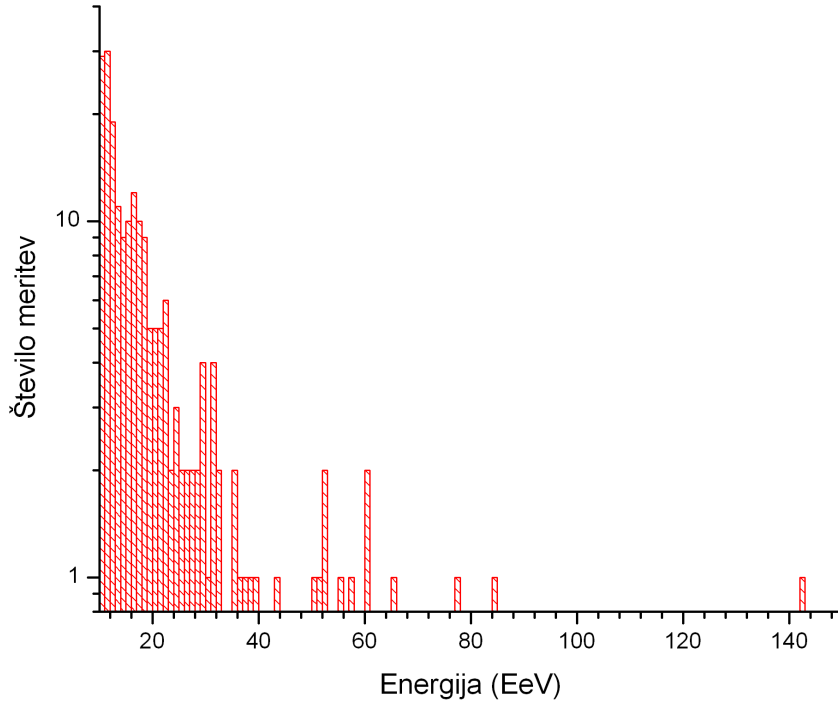
Slika 5.6: Rdeča črta predstavlja vodilno smer oziroma smer, v kateri npr. pričakujemo izvor, modra črta pa prikazuje pot kozmičnega žarka od izvora do Zemlje, ki je odklonjen za kot  $\Delta\theta$  zaradi galaktičnega magnetnega polja. Na sliki je izvor aktivna galaksija Virgo A, fotografirana s Hubblovim teleskopom [34].

produkta dveh žarkov izračunamo odklonsko moč  $D$  za žarke iz istega izvora. S tem izberemo dva vektorja:  $\vec{a} = (R, L_a, B_a)$  in  $\vec{b} = (R, L_b, B_b)$ , kjer je  $\vec{a}$  vodilna smer,  $\vec{b}$  pa žarek v bližini,  $R$  je oddaljenost, ki jo vzamemo enako  $R = 1$ ,  $L$  in  $B$  pa predstavljata galaktične koordinate. Odklonski kot  $\Delta\theta$  med obema vektorjema se izračuna z enačbo (5.8).

$$\cos(\Delta\theta) = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|} = \frac{1 + L_a L_b + B_a B_b}{\sqrt{(1 + L_a^2 + B_a^2)(1 + L_b^2 + B_b^2)}} \quad (5.8)$$

Ker pa imamo na galaktičnih koordinatah  $L$  in  $B$  napake, se s pomočjo enačb (5.6) in (5.7) lahko zapiše še napako na kotu  $\Delta\theta$ ,

$$d(\Delta\theta)^2 = \left( \frac{\partial(\Delta\theta)}{\partial L} \right)^2 dL^2 + \left( \frac{\partial(\Delta\theta)}{\partial B} \right)^2 dB^2. \quad (5.9)$$



Slika 5.7: Energijski spekter kozmičnih žarkov z odklonom od prvega vodilnega žarka, ki je manjši od  $\Delta\theta_{\max} = 10^\circ$ . Vodilni kozmični žarek ima najvišjo energijo, ki znaša  $E = 142,07$  EeV.

Podobno kot pri širjenju napak na kotih galaktičnih koordinat, v enačbo (5.9) vstavimo enačbo (5.8), izračunamo odvode in vstavimo izračunani napaki  $dL$  in  $dB$ . Pri analizi sem s pomočjo te enačbe in ostalih, opisanih v prejšnjem poglavju (poglavju 5.2), izbral tiste dogodke, ki so od vodilne smeri oddaljeni največ za kot  $\Delta\theta_{\max} = 10^\circ$ .

Med kozmičnimi žarki po preselekciji sem si izbral dva kot vodilna žarka za iskanje njihovih izvorov. Pri tem sem upošteval, da višja, kot je energija žarka, manj se bo odklonil v magnetnem polju. Tako sem vzel kozmična žarka s podatki:

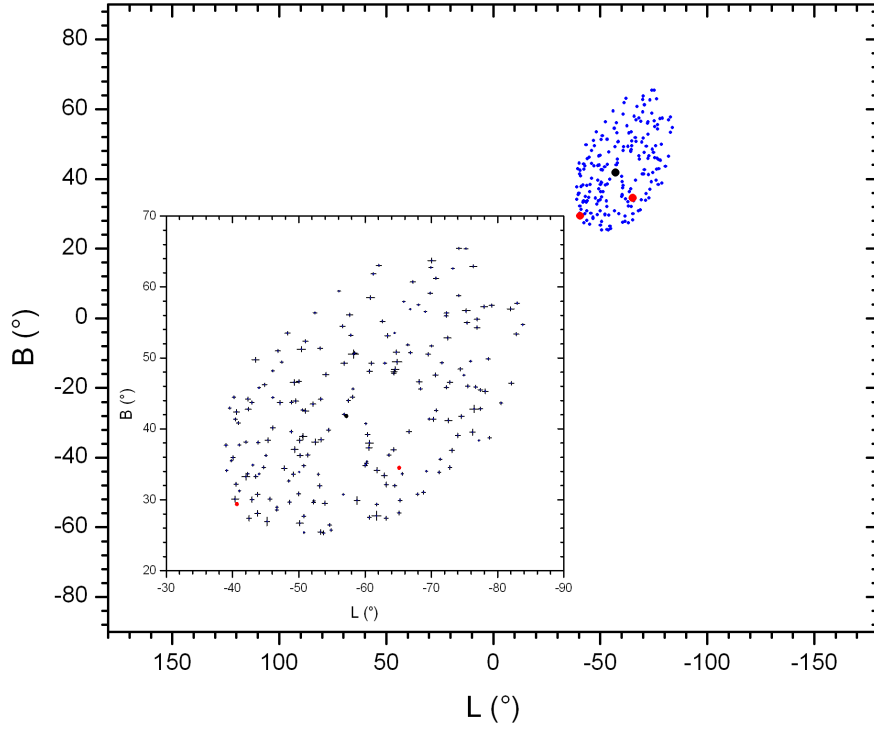
1.  $ID_1 = 200701303199$ ,  $L_1 = -57,2^\circ$ ,  $B_1 = 41,81^\circ$  in  $E_1 = 142,07$  EeV
2.  $ID_2 = 201102605648$ ,  $L_2 = -110,88^\circ$ ,  $B_2 = 34,09^\circ$  in  $E_2 = 114,88$  EeV

Za oba sem, preko enačb (5.1), (5.6) in (5.7), izračunal napake na energiji in vpadnih kotih.

$$dE_1 = 4,92 \text{ EeV}, \quad dL_1 = 0,21^\circ, \quad dB_1 = 0,15^\circ \quad (5.10)$$

$$dE_2 = 3,40 \text{ EeV}, \quad dL_2 = 0,18^\circ, \quad dB_2 = 0,15^\circ \quad (5.11)$$

Enako sem napravil še za kozmične žarke v okolici, ki glede na vodilno smer opišejo kot manjši od  $\Delta\theta_{\max} = 10^\circ$ . Zanje sem določil kot  $\Delta\theta$  po enačbi (5.8) in napako na kotu  $d(\Delta\theta)$  po enačbi (5.9), ki je odvisna od napak na galaktičnih koordinatah  $L$  in  $B$ , ter oddaljenostjo od vodilne smeri. Za prvi vodilni žarek sem kozmične žarke z omejitvijo na kotu  $\Delta\theta_{\max}$  razvrstil v energijski histogram (slika 5.7) in graf porazdelitve kozmičnih žarkov po nebu (slika 5.8). Pri sliki 5.8 bi pričako-

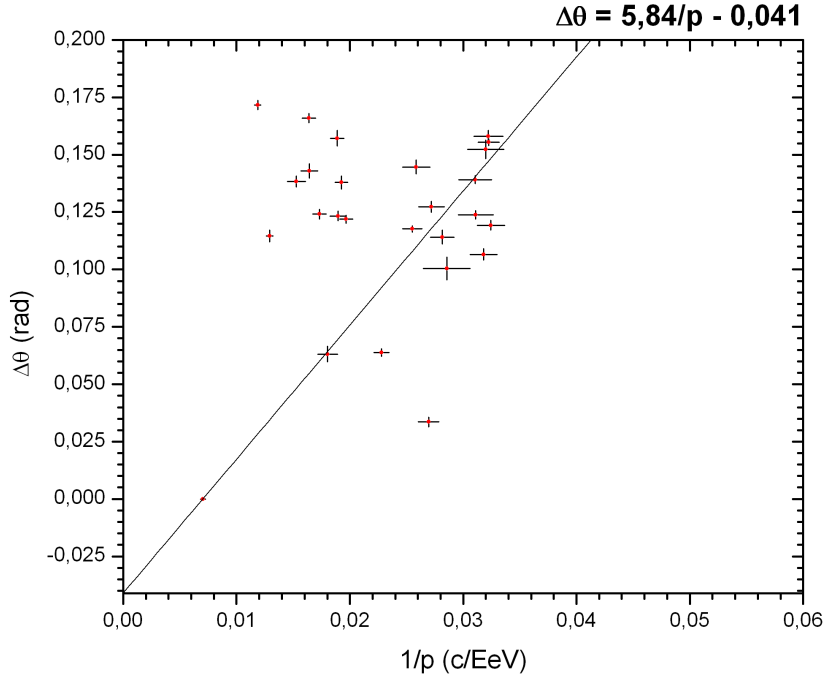


Slika 5.8: Porazdelitev vpadnih smeri kozmičnih žarkov po nebu v galaktičnih koordinatah z odklonom od prvega vodilnega žarka, ki je manjši od  $\Delta\theta_{\max} = 10^\circ$  (modre točke). Vodilni kozmični žarek je označen s črno točko, tisti z energijo višjo od 70 EeV pa so označeni z rdečimi točkami (za lažjo primerjavo s sliko 5.5). Notranja slika predstavlja iste podatke, le da z bolj podrobno skalo in dodanimi napakami na vpadnih smereh.

vali, da bodo preostali kozmični žarki v krogu okoli vodilne smeri. To je res, vendar prikaz v pravokotni projekciji popači sliko v delih, ki so najbolj oddaljeni od sredine. Podobno se zgodi, če površino zemlje preslikamo v pravokotno projekcijo. Izračunane vrednosti odklonskega kota  $\Delta\theta$  sem uporabil pri njegovi odvisnosti z gibalno količino, kjer  $D$  iz enačbe (2.6) predstavlja naklon premice v grafu. Premica, ki povezuje več točk, pa blizu ležeče kozmične žarke poveže z enakim možnim izvorom, saj vsi ti žarki občutijo enako odklonsko moč  $D$ , le njihovi odkloni so različni zaradi različne energije. Poleg tega pa nam presečišče premice z ordinatno osjo  $n_{iz}$  pove približno oddaljenost izvora od vodilnega žarka. Na sliki 5.9 je prikazan graf odvisnosti odklonskega kota od recipročne vrednosti gibalne količine pri energijah, višjih od 30 EeV. Z metodo  $\chi^2$  sem našel čim boljše prilaganje premice glede na podatke ( $\chi^2/N = 27, 36$ ), kjer gre premica skozi žarek z najvišjo energijo. Enačba premice je zapisana nad sliko in nam pove vrednost  $D_1$  in oddaljenost od izvora  $n_{iz1}$  ter njune napake:

$$D_1 = 5,84 (1 \pm 0,02) \frac{\text{EeV rad}}{c} \quad n_{iz1} = -0,041 (1 \pm 0,02) \text{ rad} \quad (5.12)$$

Pri izračunu  $D_1$  in  $n_{iz1}$  so bili podatki omejeni z minimalno energijo 30 EeV, tako da nekaterih meritev z nižjo energijo, ki bi se še dovolj dobro prilagali k premici, ni bilo vključenih. Zato sem za vsako izmed točk v podatkih določil pravokotno



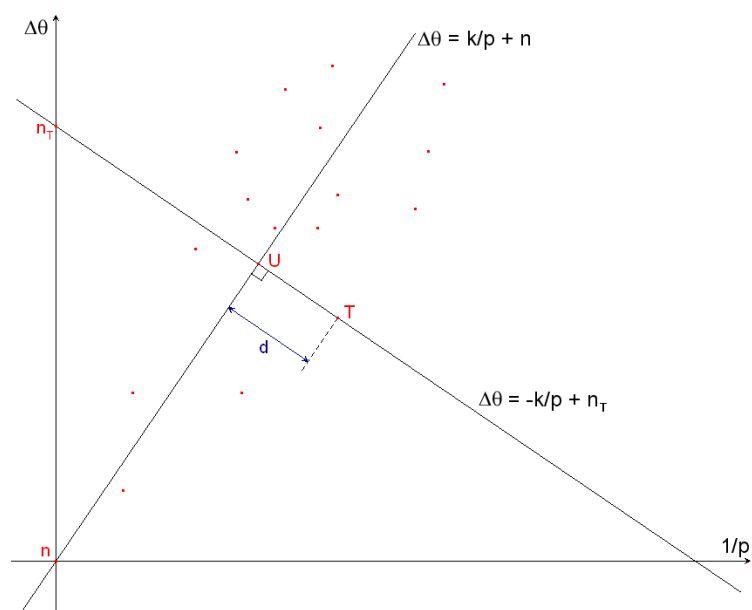
Slika 5.9: Graf prikazuje odvisnost odklonskega kota  $\Delta\theta$  od recipročne vrednosti gibalne količine  $1/p$  z dodanimi napakami in prilegajočo se premico. Maksimalni odklonski kot je  $\Delta\theta_{\max} = 10^\circ$ . Podatki se nanašajo na okolico prvega vodilnega žarka z minimalno energijo  $E = 30$  EeV. Premica je bila določena z metodo  $\chi^2$  in poteka skozi vodilni žarek ( $\chi^2/N = 27, 36$ ).

oddaljenost  $d$  od premice, kot je predstavljeno z enačbo

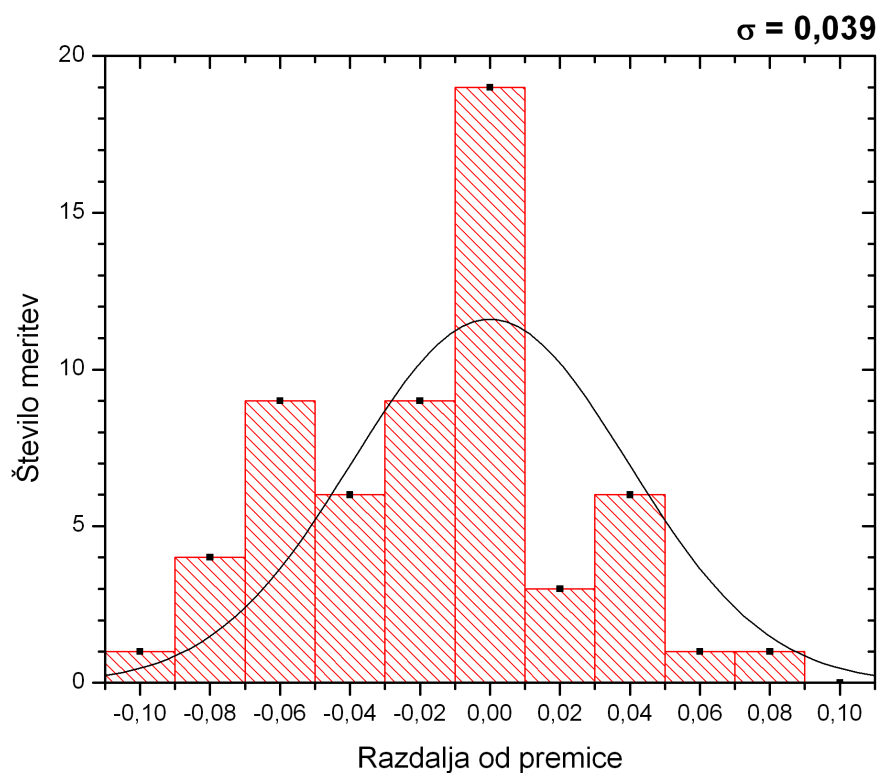
$$\begin{aligned}
 d &= \sqrt{\left(\frac{1}{p_T} - \frac{1}{p_U}\right)^2 + (\Delta\theta_T - \Delta\theta_U)^2} = \\
 &= \sqrt{\left(\frac{1}{2p_T} - \frac{\Delta\theta_T - n}{2k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\theta_T - n}{2} - \frac{k}{2p_T}\right)^2}. \quad (5.13)
 \end{aligned}$$

$1/p_T$  in  $\Delta\theta_T$  sta koordinati točke  $T$ , za katero iščemo oddaljenost od premice,  $k$  in  $n$  pa sta naklon in začetna vrednost premice.  $1/p_U$  in  $\Delta\theta_U$  sta koordinati točke  $U$ , ki predstavlja pravokotno projekcijo točke  $T$  na premico in je v pomoč pri računanju razdalje. Zbrane pravokotne razdalje točk sem razvrstil v histogram, predstavljen na sliki 5.11. Razporeditev okoli premice ima približno normalno porazdelitev, tako da sem na histogram dodal še Gaussovo funkcijo, ki se najbolj prilega podatkom. Standardna deviacija iz histograma mi je služila kot maksimalna meja za izbiro podatkov okoli premice, saj sem za ponovno prileganje premice uporabil le podatke s pravokotno oddaljenostjo, manjšo od  $d = \sigma = 0,039$ . Na sliki 5.12 je ponovno graf odvisnosti odklonskega kota  $\Delta\theta$  od recipročne vrednosti gibalne količine  $1/p$ , vendar so tokrat dodani še kozmični žarki z energijo manjšo od 30 EeV, ki so od premice oddaljeni za manj kot  $\sigma$ . Vrednosti  $\Delta\theta$  sem glede na prejšnje prileganje (slika 5.9) povečal za začetno vrednost prejšnje premice  $n_{iz1} = 0,041$ . Na podlagi prilaganja premic (sliki 5.9 in 5.12) je sedaj možno določiti odklonsko moč  $D_1$

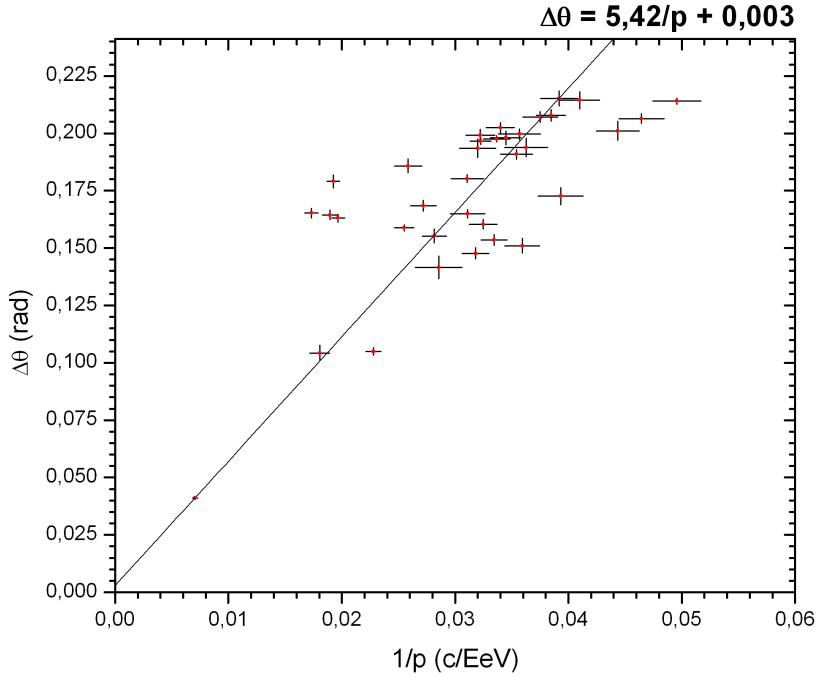




Slika 5.10: Shematični prikaz pravokotne oddaljenosti točke  $T(1/p_T, \Delta\theta_T)$  od premice z enačbo  $\Delta\theta = k/p + n$ .



Slika 5.11: Histogram pravokotnih oddaljenosti točk z minimalno energijo 20 EeV od premice  $\Delta\theta = 5,84/p - 0,041$ . Vrednosti pod premico imajo negativen, tiste nad premico pa pozitiven predznak. Dorisana je normalna porazdelitev s standardno deviacijo  $\sigma = 0,039$ .



Slika 5.12: Graf prikazuje odvisnost odklonskega kota  $\Delta\theta$  od recipročne vrednosti gibalne količine  $1/p$  z dodanimi napakami in prilegajočo se premico. Podatki se nanašajo na okolico prvega vodilnega žarka z minimalno energijo  $E = 20$  EeV in maksimalno pravokotno oddaljenostjo  $d = 0,039$  od premice. Premica je bila določena z metodo  $\chi^2$  ( $\chi^2/N = 6,39$ ). Vrednosti  $\Delta\theta$  so glede na graf 5.9 dvignjene za  $n_{iz1} = 0,041$ , kot je znašala začetna vrednost prvega iskanja premice.

in oddaljenost prvega vodilnega žarka od izvora  $\Delta\theta_{iz1}$ :

$$D_1 = 5,42 (1 \pm 0,02) \frac{\text{EeV rad}}{c}, \quad \Delta\theta_{iz1} = 0,038 (1 \pm 0,096) \text{ rad} \quad (5.14)$$

$\Delta\theta_{iz1}$  sem izračunal iz absolutne vrednosti vsote presečišč premic  $\Delta\theta = 5,84/p - 0,041$  in  $\Delta\theta = 5,42/p + 0,003$  z ordinatnima osema. Napako na kotu  $\Delta\theta_{iz1}$  sem izračunal z enačbo,

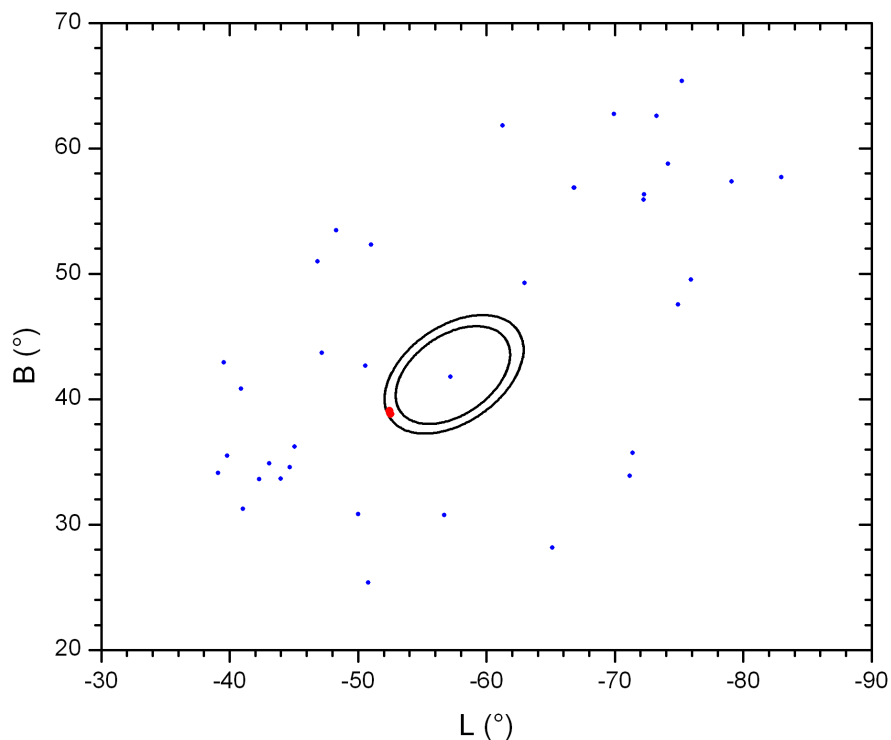
$$d\Delta\theta_{iz1} = \sqrt{dn_{\text{fit1}}^2 + dn_{\text{fit2}}^2} \quad (5.15)$$

kjer je  $dn_{\text{fit1}}$  napaka na začetni vrednosti prve premice in  $dn_{\text{fit2}}$  napaka na začetni vrednosti druge premice.

Z uporabo kataloga aktivnih galaktičnih jeder pa lahko na ta način pridemo do možnih izvorov kozmičnih žarkov ekstremnih energij. Za mojo analizo sem uporabljal VCV katalog, ki vključuje kvazarje in ostala aktivna galaktična jedra [36]. Iskanje sem omejil na oddaljenosti od vodilnega kozmičnega žarka  $\Delta\theta_{iz}$  (napaka na  $\Delta\theta_{iz}$  določa minimalno in maksimalno vrednost) in rdeči premik. Rdeči premik sem omejil na 0,018 (v enotah razdalje je to enako  $276 \times 10^6$  svet. let ali 84,7 Mpc), saj je v primeru bolj oddaljenih izvorov potrebno upoštevati še mejo GZK, ki zmanjšuje energijo kozmičnega žarka in spreminja njegov odklon v magnetnem polju [35]. V kozmologiji rdeči premik nastane zaradi oddaljevanja vira od opazovalca, kjer se valovne dolžine oddanega elektromagnetnega valovanja premaknejo proti daljšim valovnim dolžinam.

Tabela 5.2: Možna izvora za žarke v okolici prvega vodilnega kozmičnega žarka ( $L = -57,2^\circ$ ,  $B = 41,81^\circ$ ,  $E = 142,07$  EeV). Podatki so zbrani iz VCV kataloga kvazarjev in aktivnih galaktičnih jeter [36] z dodanim odklonskim kotom  $\Delta\theta$  glede na vodilni žarek.

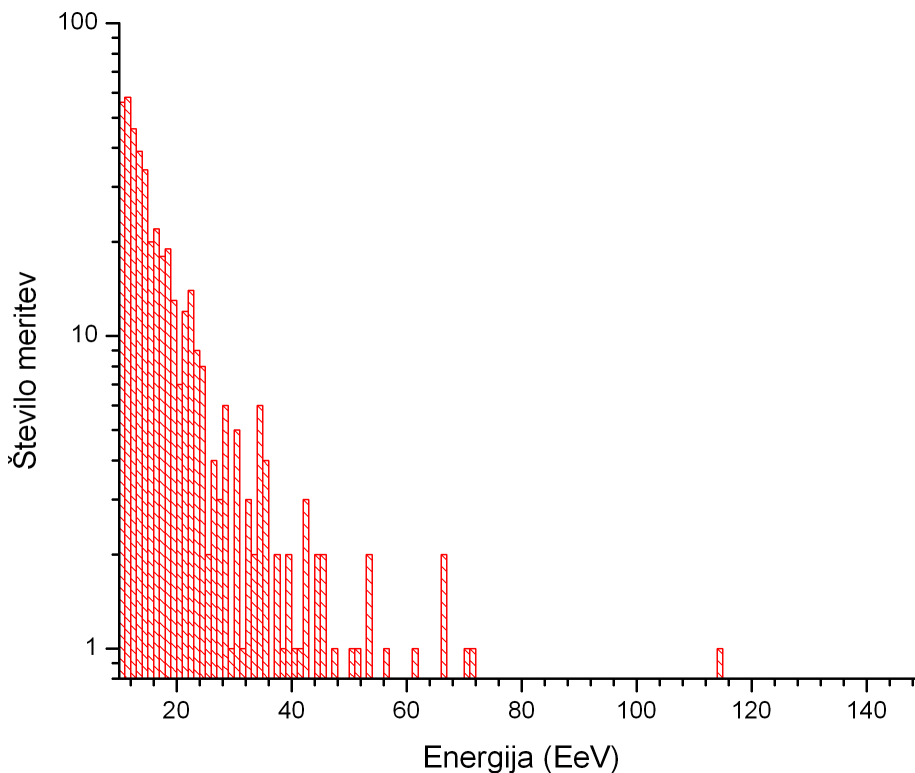
Ime	NGC 4968	ESO 508-G05
$L$ ( $^\circ$ )	-52,4518	-52,5183
$B$ ( $^\circ$ )	39,0545	38,8181
Rdeči premik	0,009 (38,2 Mpc)	0,01 (42,4 Mpc)
Tip AGN	Seyfert 2	Seyfert 2
Detekcija radijskih valov	Da	Ne
Navidezna magnituda	14,79	13,6
Pretok pri $\lambda = 6$ cm (mJy)	15	
Pretok pri $\lambda = 20$ cm (mJy)	33	
$\Delta\theta$ (rad)	0,04005	0,04034



Slika 5.13: Porazdelitev kozmičnih žarkov (modre točke), ki so bili vključeni pri drugem prilagajanju premerice za prvi vodilni žarek. Črne črte predstavljajo mejne vrednosti  $\Delta\theta_{izl} = 0,038$  ( $1 \pm 0,096$ ) rad, znotraj katerih se nahajajo možni izvori. Rdeči točki sta možna izvora (glej tabelo 5.2), ki imata rdeči premik manjši od 0,018.

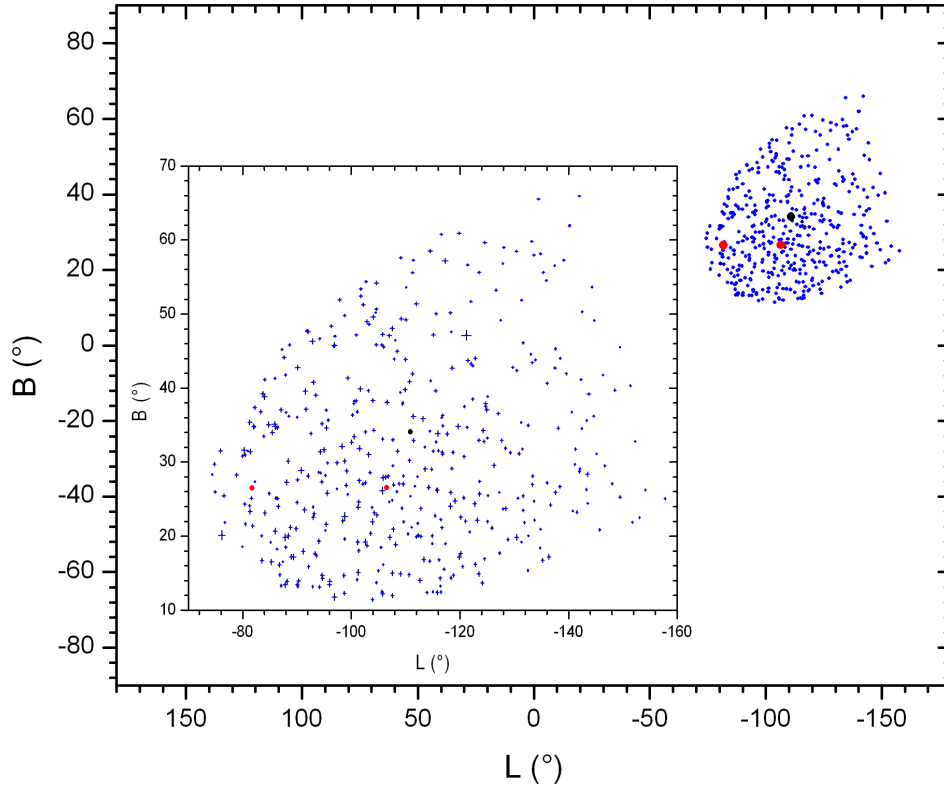
Zaradi širjenja vesolja pa bolj kot so telesa oddaljena od nas, hitreje se premikajo, in imajo vedno večji premik. Na sliki 5.13 je prikazana porazdelitev kozmičnih žarkov, ki sem jih uporabil pri prileganju premice (slika 5.12) in možna izvora kozmičnih žarkov glede na uporabljene omejitve (rdeči točki) za prvi vodilni kozmični žarek. Izmed precejšnega števila izvorov sta omejitvi na kotu  $\Delta\theta$  in rdečem premiku ustrezala dva izvora, ki sem ju razvrstil v tabelo 5.2 z bolj pomembnimi podatki iz kataloga. VCV katalog podaja dve vrednosti pretoka elektromagnetnega valovanja, ki sem jih vključil v tabelo 5.2. Oba merita količino radiofrekvenčnega valovanja, eden pri valovni dolžini 6 cm, drugi pa pri valovni dolžini 20 cm. Njune enote so Jansky, ki so enakovredne  $1 \text{ mJy} = 10^{-23} \text{ W/m}^2\text{Hz}$ . Navidezna magnituda ( $m$ ) predstavlja svetlost nebesnega telesa, kot ga vidimo z Zemlje. Nižja, kot je navidezna magnituda, svetlejši je izvor svetlobe. Za primerjavo ima sonce vrednost  $m \approx -26,7$ , polna luna pa  $m \approx -12,7$ .

Enak postopek iskanja potencialnega izvora kot pri prvem, sem uporabil tudi za drugi vodilni kozmični žarek ( $L_2 = -110,88^\circ$ ,  $B_2 = 34,09^\circ$ ,  $E_2 = 114,88 \text{ EeV}$ ). Sliki 5.14 in 5.15 prikazujeta energijski spekter in porazdelitev kozmičnih žarkov



Slika 5.14: Energijski spekter kozmičnih žarkov z odklonom od drugega vodilnega žarka, ki je manjši od  $\Delta\theta_{\max} = 10^\circ$ . Vodilni kozmični žarek ima energijo  $E = 114,88 \text{ EeV}$ .

po nebu za žarke, ki so od vodilnega oddaljeni za kot, manjši od  $\Delta\theta_{\max} = 10^\circ$ . Za drugi vodilni žarek sem prav tako pregledal korelacijo meritev glede na njihove odklonske kote in recipročno vrednostjo gibalne količine in določil najboljši potek korelacijske premice. Pri prileganju premice sem uporabil metodo  $\chi^2$  ( $\chi^2/N = 33,72$ ) in omejil podatke okoli vodilnega žarka na minimalno energijo 30 EeV. Na podlagi



Slika 5.15: Porazdelitev vpadnih smeri kozmičnih žarkov po nebu v galaktičnih koordinatah z odklonom od drugega vodilnega žarka, ki je manjši od  $\Delta\theta_{\max} = 10^\circ$  (modre točke). Vodilni kozmični žarek je označen s črno točko, tisti z energijo višjo od 70 EeV, pa so označeni z rdečimi točkami (za lažjo primerjavo s sliko 5.5). Notranja slika predstavlja iste podatke, le da z bolj podrobno skalo in dodanimi napakami na vpadnih smereh.

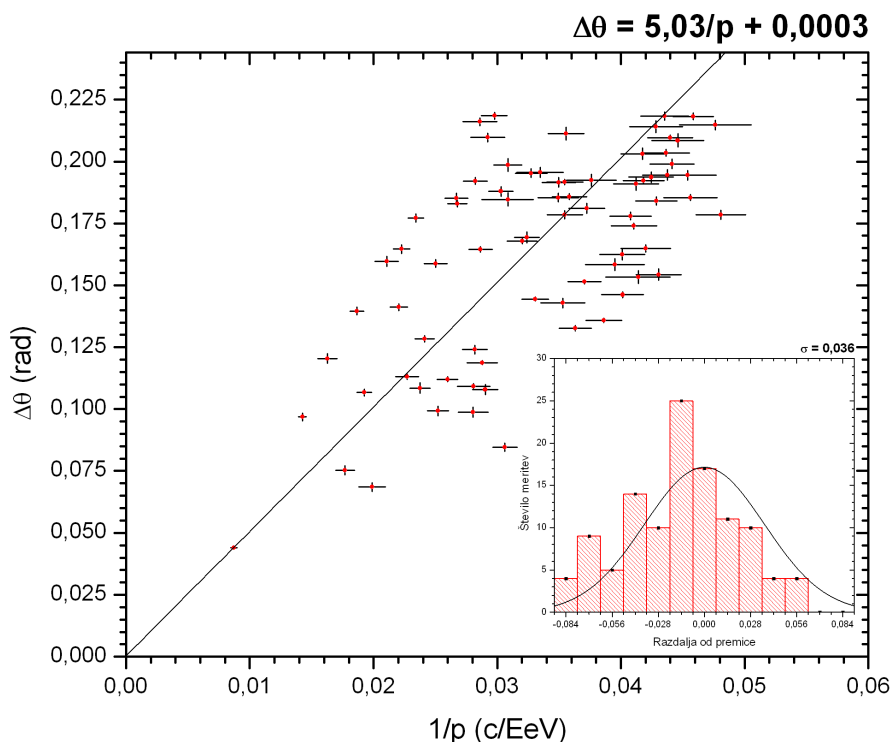
prileganja sem določil parametra  $D_2$  (odklonska moč) in  $n_{iz2}$  (začetna vrednost):

$$D_2 = 5,06 (1 \pm 0,05) \frac{\text{EeV rad}}{c}, \quad n_{iz2} = -0,044 (1 \pm 0,05) \text{ rad.} \quad (5.16)$$

Žarkom v okolici drugega vodilnega žarka sem dodal še meritve z energijami, nižjimi od 30 EeV, in določil njihovo pravokotno oddaljenost od premice z enačbo (5.13). Pravokotna oddaljenost meritev od premice je z dorisano normalno porazdelitvijo predstavljena na sliki 5.16 b. Na sliki 5.16 a pa je ponovno prilaganje premice k meritvam, ki se nahajajo znotraj  $\sigma$  normalne porazdelitve in so tako oddaljene manj kot  $d = 0,036$  od premice  $\Delta\theta = 5,06/p - 0,044$ . Vrednosti  $\Delta\theta$  so na sliki 5.16 a premaknjene navzgor za začetno vrednost  $n_{iz2}$  iz prvega iskanja premice (5.16). Preko obeh korelacijskih premic sem dobil odklonsko moč  $D_2$  in oddaljenost vira  $\Delta\theta_{iz2}$  za kozmične žarke v okolici drugega vodilnega žarka:

$$D_2 = 5,03 (1 \pm 0,05) \frac{\text{EeV rad}}{c}, \quad \Delta\theta_{iz2} = 0,044 (1 \pm 0,055) \text{ rad.} \quad (5.17)$$

Kot  $\Delta\theta_{iz2}$  in njegovo napako sem izračunal na enak način kot pri prejšnjem vodilnem žarku.  $\Delta\theta_{iz2}$  nam tako kot pri prvem vodilnem žarku podaja približno oddaljenost drugega vodilnega žarka od izvora. V katalogu VCV omejitvi na kotu  $\Delta\theta_{iz2}$

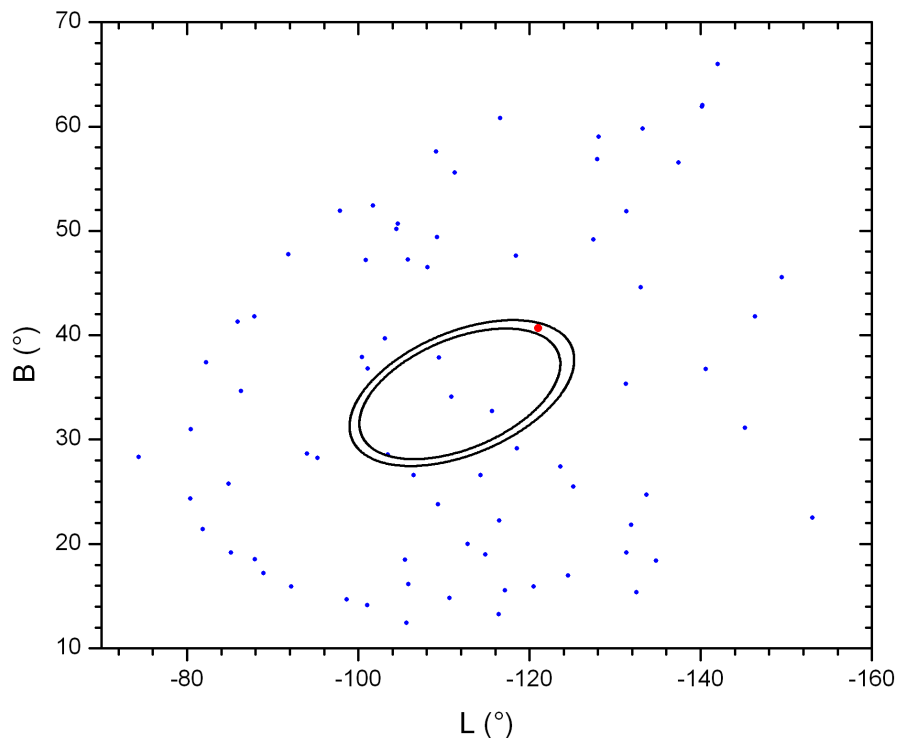


Slika 5.16: (a) Odvisnost odklonskega kota  $\Delta\theta$  od recipročne vrednosti gibalne količine  $1/p$  z dodanimi napakami in s prilegajočo se premico. Podatki se nanašajo na okolico drugega vodilnega žarka z minimalno energijo  $E = 20$  EeV in maksimalno pravokotno oddaljenostjo  $d = 0,036$  od premice. Premica je bila določena z metodo  $\chi^2$  ( $\chi^2/N = 7,71$ ). Vrednosti  $\Delta\theta$  so dvignjene za  $n_{iz2} = 0,044$ . (b) Histogram pravokotne oddaljenosti meritev od premice  $\Delta\theta = 5,06/p - 0,044$  z dorisano normalno porazdelitvijo ( $\sigma = 0,036$ ).

( $\Delta\theta_{iz2} = 0,044 (1 \pm 0,055)$ ) in omejitvi na rdečem premiku ( $\leq 0,018$ ) ustreza le en izvor, ki je opisan v tabeli 5.3. Ta je prikazan tudi na grafu porazdelitve kozmičnih žarkov po nebu (slika 5.17) okoli drugega vodilnega kozmičnega žarka, ki imajo pravokotno oddaljenost od premice manjšo od  $d = 0,036$ .

Tabela 5.3: Možna izvora za žarke v okolici drugega vodilnega kozmičnega žarka ( $L = -110,88^\circ$ ,  $B = 34,09^\circ$ ,  $E = 114,88$  EeV). Podatki so zbrani iz VCV kataloga kvazarjev in aktivnih galaktičnih jeter [36] z dodanim odklonskim kotom  $\Delta\theta$  glede na vodilni žarek.

Ime	SDSS J09596+0002
$L$ ( $^\circ$ )	$-121,0109$
$B$ ( $^\circ$ )	$40,6821$
Rdeči premik	$0,017$ (72 Mpc)
Tip AGN	Seyfert 1
Detekcija radijskih valov	Ne
Navidezna magnituda	$20,42$
Pretok pri $\lambda = 6$ cm (mJy)	
Pretok pri $\lambda = 20$ cm (mJy)	
$\Delta\theta$ (rad)	$0,04379$



Slika 5.17: Porazdelitev kozmičnih žarkov (modre točke), ki so bili vključeni pri drugem prilagajanju premice za drugi vodilni žarek. Črne črte predstavljajo mejne vrednosti  $\Delta\theta_{1\sigma} = 0,044$  ( $1 \pm 0,055$ ), znotraj katerih se nahajajo možni izvori. Rdeča točka predstavlja možni izvor (glej tabelo 5.3), ki ima rdeči premik manjši od 0,018.





## 6 Zaključki

Kozmični žarki so od samega začetka pripomogli k odkritjem na področju fizike osnovnih delcev, kjer so dolgo igrali vlogo današnjih pospeševalnikov. Vseeno pa po zagonu prvih pospeševalnikov niso izgubili na pomenu zaradi izjemnih energij, ki jih dosegajo. Čeprav redki, so ti visokoenergijski delci izjemno pomembni za nadaljne raziskave na področju kozmologije in fizike visokih energij. Izvori kozmičnih žarkov so zaenkrat še neznani, vendar jih je možno z rekonstrukcijo njihovih poti in vedno večjim številom meritev vsaj približno določiti. Z njimi bi imeli preko odklona kozmičnih žarkov boljši vpogled v jakost galaktičnih magnetnih polj, sestavo kozmičnih žarkov ekstremnih energij in pogoje za njihov nastanek. V tem diplomskem delu sem preko odklonov kozmičnih žarkov iskal potencialne izvore za skupino žarkov okoli vodilne smeri z uporabo zbirke meritev Observatorija Pierre Auger. Pri tem sem za vodilne smeri izbral kozmična žarka z visokima energijama ( $L_1 = -57,2^\circ$ ,  $B_1 = 41,81^\circ$ ,  $E_1 = 142,07$  EeV in  $L_2 = -110,88^\circ$ ,  $B_2 = 34,09^\circ$ ,  $E_2 = 114,88$  EeV), saj se takšni žarki pri svojem potovanju po galaktičnih magnetnih poljih tudi najmanj odklonijo. Če predpostavimo, da so vsi kozmični žarki v okolici vodilnega žarka iz istega izvora, lahko poiščemo korelacijo med meritvami na odklonskem kotu in energijo kozmičnega žarka. Korelacijska premica je predstavljena z enačbo,

$$\Delta\theta = \frac{Dc}{E} + \Delta\theta_{iz} \quad (6.1)$$

kjer odklonska moč  $D$  predstavlja naklon premice v grafu,  $\Delta\theta_{iz}$  pa določa približni odklonski kot, ki ga naredi vodilni kozmični žarek glede na izvor. Z normalno porazdelitvijo točk sem nato določil maksimalno pravokotno razdaljo točk okoli korelacijske premice, ki je bila enaka vrednosti standardne deviacije  $\sigma$  in premico prilagodil glede na meritve z izbrano razdaljo. Preko parametra premice  $D$  bi lahko določili jakost magnetnega polja, dolžino poti, ki jo naredijo kozmični žarki ali naboj, ki ga nosijo. Parameter  $\Delta\theta_{iz}$  pa služi namenu iskanja potencialnih izvorov. Iskal sem aktivne galaksije, ki bi lahko bile izvor kozmičnih žarkov ekstremnih energij. Izmed mnogih aktivnih galaktičnih jeder v katalogu VCV sem za prvi vodilni kozmični žarek našel dve galaksiji z dovolj majhnim rdečim premikom in znotraj mej odklonskega kota  $\Delta\theta_{iz1}$  in napake na njem. Ti dve galaksiji sta ESO 508-G05 in NGC 4968. Za drugi vodilni žarek je v katalogu, znotraj postavljenih omejitev na rdečem premiku in  $\Delta\theta_{iz2}$ , le en potencialen izvor – galaksija SDSS J09596+0002. Z nadaljnim delovanjem Observatorija Pierre Auger in večjo količino zbranih meritev kozmičnih žarkov ekstremnih energij bo morda iskanje potencialnih izvorov preko rekonstrukcije njihovih poti vedno lažje.



# Literatura

- [1] D. Zavrtanik, *Ultra high energy cosmic rays*, Contemporary Physics, **51** (2010), 513 – 529.
- [2] <http://scienzapertutti.lnf.infn.it/risposte/ris247.html> (9.8.2011).
- [3] J. Kraus, *Cosmic search*, **2**, Issue 5 (1980), 20.
- [4] Pierre Auger Observatory, <http://www.ast.leeds.ac.uk/Auger> (10.8.2011).
- [5] C.D. Anderson, *The positive electron*, Phys. Rev. **43** (1933), 491.
- [6] S.H. Neddermeyer, C.D. Anderson, *Note on the nature of cosmic-ray particles*, Phys. Rev. **51** (1937), 884 – 886.
- [7] S. Hill, Solar Dynamics Observatory, <http://sdo.gsfc.nasa.gov/gallery/main.php?v=item&id=34> (11.8.2011).
- [8] B. Keel, *Quasars and active galactic nuclei*, <http://www.astr.ua.edu/keel/agn/spectra.html> (5.8.2011).
- [9] S.A. Tyul'bashev, *Magnetic fields around AGNs at large and small scales*, Astronomy&Astrophysics, **387** (2002), 818 – 820.
- [10] P. Bhattacharjee, G. Sigl, *Origin and propagation of extremely high-energy cosmic rays*, Phys. Rep. **327** (2000), 109.
- [11] Pierre Auger Observatory, <http://www.auger.org> (30.7.2011).
- [12] Extreme Universe Space Observatory, <http://www.rssd.esa.int/index.php?project=EUSO&page=index> (11.8.2011).
- [13] GRAPES-3 Experiment, <http://alpha.sci.osaka-cu.ac.jp/grapes3/principle-j.html> (26.7.2011).
- [14] K. Bernlöhr, *Cosmic-ray air showers*, <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/CosmicRay/ShowerDetection.html> (14.7.2011).
- [15] P. Nečesal, A. Creusot, A. Filipčič, T. Paul, D. Veberič, D. Zavrtanik, M. Zavrtanik, *The fluorescence detector of the Pierre Auger observatory*, J. Phys.: Conf. Ser. **293** (2011).

- [16] Haverah Park research site,  
<http://www.ast.leeds.ac.uk/haverah/havpark.shtml> (28.7.2011).
- [17] Yakutsk EAS array, <http://eas.yasn.ru> (28.7.2011).
- [18] The Fly's Eye (1981-1993),  
<http://www.cosmic-ray.org/reading/flyseye.html> (28.7.2011).
- [19] AGASA Results,  
<http://www-akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA/results.html>  
(28.7.2011).
- [20] D. Zavrtanik, *Results from the Pierre Auger observatory*, Nucl. Instr. and Methods in Phys. Research A, **630** (2011), 166 – 170.
- [21] M. Kleifges, *Extension of the Pierre Auger observatory using high-elevation fluorescence telescopes (HEAT)*, Proc. 31<sup>th</sup> ICRC (Łódź – Poland), (2009).
- [22] M. Platino, *AMIGA – Auger muons and infill for the ground array of the Pierre Auger observatory*, Proc. 31<sup>th</sup> ICRC (Łódź – Poland), (2009).
- [23] A.M. van den Berg, *Radio detection of cosmic rays at the southern Auger observatory*, Proc. 31<sup>th</sup> ICRC (Łódź – Poland), (2009).
- [24] K. Greisen, *End to the cosmic-ray spectrum?*, Phys. Rev. Lett., **16** (1966), 748 – 750.
- [25] E. Fermi, *On the origin of cosmic radiation*, Phys. Rev. **75** (1949), 1169 – 1174.
- [26] R. Beck, W.A. Sherwood, *Atlas of magnetic fields in nearby galaxies: Messier Galaxies*,  
<http://www.mpifr-bonn.mpg.de/staff/wsherwood/tst.messier.html>  
(3.8.2011).
- [27] NASA Spitzer space telescope,  
<http://www.spitzer.caltech.edu/images/1489-ssc2005-20a-Three-Faces-of-Andromeda> (3.8.2011).
- [28] M. Hussain, *Ultra-high energy cosmic rays and galactic magnetic fields*, Ph.D. Dissertation, University of Nova Gorica (2009).
- [29] R. Wielebinski, R. Beck, *Cosmic magnetic fields*, Springer, Berlin 2005,  
<http://www.mpifr-bonn.mpg.de/staff/rbeck/springer.pdf> (30.7.2011).
- [30] P. Duffet-Smith, *Practical astronomy with your calculator, 3ed*, Cambridge University press, (1988).
- [31] F. Vincent, *Positional astronomy*,  
<http://star-www.st-and.ac.uk/~fv/webnotes> (8.8.2011).
- [32] [http://sl.wikipedia.org/wiki/Galaktični\\_koordinatni\\_sistem](http://sl.wikipedia.org/wiki/Galaktični_koordinatni_sistem)  
(8.8.2011).

- [33] V. Lindberg, *Uncertainties and error propagation*,  
[http://www.rit.edu/cos/uphysics/uncertainties/  
Uncertaintiespart2.html](http://www.rit.edu/cos/uphysics/uncertainties/Uncertaintiespart2.html), (28.7.2011).
- [34] Hubble space telescope,  
<http://hubblesite.org/gallery/album/pr2008030f> (10.8.2011).
- [35] Pierre Auger Collaboration (J. Abraham *et al.*), *Correlation of the  
highest-energy cosmic rays with nearby extragalactic objects*, *Science*, **318**  
(2007), 938 – 943.
- [36] M.P. Veron-Cetty, P. Veron, *Quasars and active galactic nuclei (13th Ed.)*,  
*Astron. Astrophys. A* **10** (2010), 518.