

# ASTRONOMIJA U PODRUČJU TeV

---

Čatić, Filip

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Physics / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:160:141290>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-04**

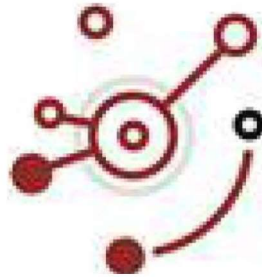


Repository / Repozitorij:

[Repository of Department of Physics in Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
ODJEL ZA FIZIKU**



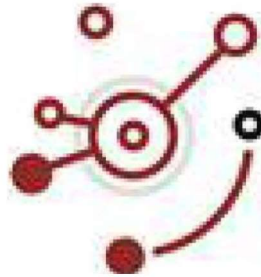
**FILIP ČATIĆ**

**ASTRONOMIJA U PODRUČJU TeV**

**Završni rad**

**Osijek, 2022.**

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
ODJEL ZA FIZIKU**



**FILIP ČATIĆ**

**ASTRONOMIJA U PODRUČJU TeV**

**Završni rad**

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku radi stjecanja  
zvanja prvostupnika fizike

**Osijek, 2022.**

Ovaj završni rad je izrađen u Osijeku pod vodstvom mentora doc. dr. sc. Darija Hrupec u sklopu sveučilišnog preddiplomskog studija fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera.



## Astronomija u području TeV

Filip Čatić

### Sažetak

U ovom je radu vizualiziran katalog izvora visokoenergijskog gama-zračenja (više od 200 izvora koji su zadnjih 30 godina detektirani i popisani na mrežnoj stranici Sveučilišta u Chicagu). Podaci su preuzeti s mrežne stranice <http://tevcat.uchicago.edu/> a originalni program za vizualizaciju napisan je Pythonu, programskom jeziku koji je trenutačno najpopularniji u astronomiji i fizici visokih energija. U radu su dani moji izvorni kodovi i opisana njihova primjena te, u uvodnom dijelu, kratka povijest gama-astronomije u području visokih (od 100 MeV do 100 GeV) i vrlo visokih (od 100 GeV do 100 TeV) energija.

**Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku**

**Ključne riječi:** gama-zračenje/gama-astronomija /vrlo visoka energija (VHE)  
/Čerenkovljevo zračenje

**Mentor:** doc. dr. sc. Dario Hrupec

**Ocjenjivači:**

**Rad prihvaćen:**

## TeV Astronomy

Filip Čatić

### Abstract

This thesis shows a visualization of a catalog of high-energy gamma-ray sources (more than 200 sources that have been detected and listed on the website of the University of Chicago in the last 30 years). The data was provided from the website <http://tevcat.uchicago.edu/> and an original visualization program was written in Python, currently the most popular programming language in astronomy and high energy physics. The thesis shows original codes and describes their application, while the introduction describes a brief history of gamma-astronomy in the area of high energy (from 100 MeV to 100 GeV) and very high energy (from 100 GeV to 100 TeV).

### Thesis deposited in Department of Physics library

**Key words:** gamma-radiation/gamma-astronomy /very high energy (VHE)/Cherenkov radiation

**Assistent professor:** Dario Hrupec, Ph. D.

**Reviewers:**

**Thesis accepted:**

## Sadržaj

Sažetak.....	4
Abstract.....	5
Gama-astronomija .....	7
Teleskopi .....	9
Gama-sateliti.....	9
FERMI.....	9
Čerenkovljevi teleskopi .....	9
Izvori gama-zračenja .....	11
Ostaci supernove.....	11
Pulsari .....	11
Maglica pulsarnog vjetra .....	11
Dvojni sustavi u području TeV .....	12
Središte galaksije .....	12
Blazari.....	12
Radiogalaksije.....	12
Zvezdorodne galaksije .....	13
Kandidati.....	13
Python.....	14
Vizualni prikaz VHE-izvora pomoću Python koda .....	14
Literatura .....	23

## Gama-astronomija

Elektromagnetski spektar (lat. *spectrum*: pojava, priviđenje) prikazuje raspodjelu intenziteta određene mjerene veličine, koja se obično daje karakterizirajući fotone frekvencijama  $f$  ili valnim duljinama  $\lambda$ , ali ovdje se fotoni opisuju njihovom energijom  $E = hf = \frac{hc}{\lambda}$  izraženom u elektrovoltima (Tablica 1).

Područje	Valna duljina	Energija
Radiovalovi	1 m – 100 km	< 10 $\mu$ eV
Mikrovalovi	1 mm – 1 m	10 $\mu$ eV – 1 meV
Infracrveno zračenje	750 nm – 1 mm	10 meV – 1 eV
Vidljiva svjetlost	400 nm – 790 nm	1 eV – 10 eV
Ultraljubičasto zračenje	10 nm – 400 nm	10 eV – 100 eV
Rendgensko zračenje	0.01 nm – 10 nm	100 eV – 100 keV
Gama-zračenje	< 0.02 nm	> 100 keV

Tablica 1: Raspodjela područja elektromagnetskog spektra

Prema podacima u Tablici 1, možemo zaključiti da gama-zračenje obuhvaća veći dio spektra od svih ostalih zračenja zajedno tj. od  $10^4$  do  $10^{20}$  eV. Zbog toga postoji podjela spektra gama-zračenja na podpodručja (prikazano na Tablici 2).

Područja	Energija
LE Niske energije	100 keV – 100 MeV
HE Visoke energije	100 MeV – 100 GeV
VHE Vrlo visoke energije	100 GeV – 100 TeV
UHE Ultra visoke energije	100 TeV – 100 PeV
EHE Ekstremno visoke energije	> 100 PeV

Tablica 2: Podjela spektra gama-zračenja

Istraživanje svemira najvećim se dijelom ljudske povijesti temeljilo na opažanjima u vidljivom spektru te je ta grana astronomije je poznata kao optička astronomija, u pravom smjeru razvijena kada je Galileo Galilei prvi put usmjerio teleskop prema nebu. Nekoliko stoljeća kasnije, 1932. godine, Karl Guthe Jansky je prvi opazio galaktičke radiovalove, a to je označilo početak astronomije proširene na cijeli elektromagnetski spektar. Zahvaljujući atmosferskom propuštanju uglavnom vidljive svjetlosti i radiovalova, shvaćeno je da proučavanje ostalih područja elektromagnetskog spektra može biti izvedivo samo iz svemira. Pojavom umjetnih satelita čovječanstvo je označilo važan iskorak u astronomiji. U ljeto 1962. godine detektor rendgenskih zraka na raketi Aerobee 150 slučajno je detektirao izvor rendgenskog zračenja te je tako u zviježđu Škorpion otkriven prvi izvor X-zraka, pristigao iz područja izvan našeg Sunčevog sustava i nazvan Škorpion X-1.

Otkrivanje više od 200 izvora vrlo visoke energije (VHE  $\geq$  100 GeV) ili TeV gama-zračenje, među najistaknutijim je uspjesima zadnjih nekoliko desetljeća u astrofizici. Snažan utjecaj



ovih otkrića na nekoliko aktualnih područja moderne astrofizike i kozmologije prepoznat je i visoko cijenjena od strane različitih astronomskih zajednica.

Gama-zrake u području TeV obilno se proizvode u okruženjima učinkovitog ubrzanja čestica (elektrona, protona i jezgri), popraćeno njihovim intenzivnim interakcijama s okolnim plinskim i radijacijskim poljima.

Brzi razvoj gama-astronomije iz nerazvijene grane u istinski astronomsku disciplinu objašnjava se uspješnom realizacijom velikog potencijala stereoskopskih IACT teleskopa (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes - IACTs) koji djeluju kao učinkoviti multifunkcionalni alati za duboka istraživanja kozmičkog gama-zračenja.

Konkretno, neizravna potraga za tamnom materijom i testovi kvantne gravitacije korištenjem ovih energetske gama-zraka među visoko su prioritarnim ciljevima sadašnjih i budućih projekata, uz uključivanje zemaljskih detektora gama-zraka. Prema tome, TeV gama-astronomija smatra se ključnom komponentom novog interdisciplinarnog istraživačkog područja pod nazivom fizika astročestica (također nazivan astrofizika čestica).

Atmosfera Zemlje nije prozirna za gama-zrake te su za njihovu izravnu registraciju potrebne platforme u svemiru. Trenutno operativni Fermijev teleskop velikog područja (*Fermi-LAT*; ranije poznata kao GLAST) moćan je satelitski instrument dizajniran za duboka istraživanja, sa sveobuhvatnim pogledom na nebu.

*Fermi-LAT* proučavanje neba u gama-zrakama MeV i GeV nadopunjeno teleskopom nešto manjeg razmjera na talijanskom rendgenskom i gama-satelitu AGILE (Astro-rivelatore Gamma a Immagini LEggero). Kutna razlučivost ovih instrumenata ispod 1 GeV prilično je skromna (veća od  $1^\circ$ ), ali postaje znatno bolja pri višim energijama, približavajući se  $0,1^\circ$  iznad 10 GeV.

Ne postoje konkretne informacije koje potvrđuju da bi svemirske platforme u bilo kojem trenutku u bliskoj budućnosti mogle ponuditi instrumente s površinama detekcije koje prelaze  $1 \text{ m}^2$ , što bi dramatično povećalo potencijal proučavanja VHE gama-zraka iz svemira.

Srećom, koristeći se spomenutim energijama, može se iskoristiti alternativna metoda temeljena na opažanju atmosferskih pljuskova, bilo izravno ili putem njihovog Čerenkovljevog zračenja. Slab i kratak Čerenkovljev signal relativističkih elektrona, nastao u atmosferi, traje samo nekoliko nanosekundi, što je dovoljno za detekciju, zahvaljujući velikim optičkim reflektorima, opremljenim brzim optičkim prijemnicima.

Stereoskopska opažanja zračnih pljuskova s dva ili više teleskopa smještenih na udaljenosti od oko 100 m jedan od drugog, osiguravaju učinkovito odbacivanje hadronskih pljuskova (faktorom 100) kao i dobru kutnu razlučivost (bolju od 0,1 ) te energiju visoke razlučivosti (bolja od 15%).

U kombinaciji s dobrim energijskim i kutnim razlučivostima, statistika fotona gama-zraka čini se prikladnom za duboke morfološke, spektroskopske i vremenske studije, što također IACT-sustave čini moćnim višenamjenskim alatima za istraživanje širokog spektra ne-toplinskih objekata i fenomena. IACT nizovi sposobni su proučavati ne samo točkaste, već i proširene izvore s kutnom veličinom do 1 stupnja ili nešto većom.

## Teleskopi

### Gama-sateliti

Gama-zračenja niskih i visokih energija (znači od 100 keV do 100 GeV) detektira se instrumentima smještenim na satelite. U zadnja dva desetljeća, možemo izdvojiti teleskope INTEGRAL (lansiran 2002.), SWIFT (lansiran 2004.), AGILE (lansiran 2007.) te *Fermi-LAT* (lansiran 2008.) najistaknutiji u današnjici.

Osnovni elementi gama-detektora na satelitima su:

- a) komora na iskre u kojoj se opažaju tragovi elektron-pozitron para, stvorenih primarnim gama-fotonom
- b) kristal natrij-jodida koji služi kao kalorimetar u kojem se apsorbira energija elektron-pozitron para
- c) tzv. veto-detektor koji detektira prolaz nabijene čestice i omogućava da se takvi događaji odbace

Osnovna karakteristika satelitskih gama-detektora relativno je mala detekcijska površina (do 1 m<sup>2</sup>). Uzevši u obzir da tok kozmičkog zračenja (broj fotona po jedinici površine u jedinici vremena) naglo opada s energijom, sateliti imaju gornji energijski prag od približno 20 GeV, dok je *Fermi-LAT* povisio prag na 300 GeV.

### FERMI

Fermi Gamma-ray Space Telescope (FGST), poznat i pod prijašnjim nazivom Gamma-ray Large Area Space Telescope (GLAST), svoj je naziv dobio u čast poznatom talijanskom fizičaru Enricu Fermiju. Fermi uz sebe uključuje dva znanstvena instrumenta posvećena gama-astronomiji:

- a) Large Area Telescope (LAT) je detektor gama-zraka koji pokriva vrlo široko energetske područje u rasponu od 20 MeV do 300 GeV, ali iznad 10 GeV, tokovi gama-zraka općenito su vrlo slabi, zbog čega efektivno područje detekcije *Fermi-LAT*-a ne može pružiti adekvatnu statistiku za sveobuhvatne spektralne i vremenske studije u VHE domeni. Umjesto komorom za iskre, opremljen je segmentiranim silicijskim detektorom, što ga čini prikladnim nasljednikom EGRET-a.
- b) Gamma-ray Burst Monitor (GBM) koji se sastoji od 14 scintilacijska detektora (12 NaI kristala u rasponu od 8 keV do 1 MeV te 2 BGO kristala s osjetljivosti od 150 keV do 300 MeV).

### Čerenkovljevi teleskopi

Gama-zračenje vrlo visokih energija (od 100 GeV do 100 TeV) detektira se indirektnim metodama pomoću instrumenata smještenih na površini Zemlje. U tom energijskom području gama-fotoni imaju dovoljno energije da pri ulasku u atmosferu izazovu elektromagnetski pljusak sekundarnih čestica: elektrona, pozitrona i fotona. Takvi pljuskovi najčešće započinju na visinama od 20 km i mogu se protezati nekoliko kilometara pa sve do površine Zemlje (slika 2). Slične pljuskove izaziva i kozmičko zračenje (nabijene atomske jezgre od protona do željeza) čija je učestalost veća 10000 puta. Takve pljuskove zovemo hadronskim pljuskovima i oni osim elektrona i fotona sadrže još i pione, mione, protone, neutrone i druge čestice.



Problem je u nabijenim primarnim česticama (kozmičkom zračenju), koje u galaktičkom i međugalaktičkom magnetskom polju skreću na svojem putu od izvora do Zemlje, zbog čega se ne mogu povezati s izvorom, dok gama-zračenje putuje bez otklona u magnetskom polju i može se povezati s izvorom.

Hadronski pljuskovi i gama-pljuskovi u atmosferi sadrže mnoštvo nabijenih čestica koje se kroz zrak gibaju brzinom većom od brzine svjetlosti u zraku. Takve čestice stvaraju Čerenkovljevo zračenje što rezultira elektromagnetskom analogijom zvučnog udara koji nastaje kada, primjerice, supersonični avion probija zvučni zid. Čerenkovljevo zračenje pojedinog pljuska u atmosferi ima pogodne karakteristike za indirektnu detekciju kozmičkog gama-zračenja – vrlo je kratkotrajno i precizno usmjereno.

Čerenkovljevo zračenje nosi naziv po ruskom fizičaru Pavelu Aleksejeviču Čerenkovu koji ga je otkrio i za to dobio Nobelovu nagradu 1958. godine. Početkom 60-ih godina javila se ideja da se Čerenkovljevo zračenje, koje stvaraju pljuskovi u atmosferi izazvani upadom kozmičkog zračenja, iskoristi za indirektnu detekciju gama-fotona iz svemira. Sve do devedesetih godina bilo je potrebno da se usavrši detekcijska tehnika te teleskopi budu dovoljno pouzdani da detektiraju prvi visokoenergijski gama-izvor. Čerenkovljev teleskop sastoji se od segmentiranog zrcala koje reflektira Čerenkovljevu svjetlost u kameru sastavljenu od fotomultiplikatora. Elektronika kojom se digitalizira signal mora biti vrlo brza jer Čerenkovljeva svjetlost iz jednog pljuska dolazi u vrlo kratkom pulsu trajanja svega par nanosekundi.

Tehnika detekcije koja je omogućila lociranje prvog visokoenergijskog gama-izvora i nagli razvoj visokoenergijske gama-astronomije temelji se na analizi slika (engl. *imaging*) stvorena iz pljuskova stvara u kameri teleskopa, uz pomoć Čerenkovljeve svjetlosti. Spomenutu tehniku također možemo susresti kao skraćenicu IACT (engl. *Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope „or Technique“*), s rasponom između 50 GeV i 50 TeV. Temelji se na izravnoj registraciji čestica (leptona, hadrona i fotona) ekstenzivnih zračnih pljuskova (Extensive Air Shower - EAS), te je komplementaran pristup tehnici IACT. Tradicionalna EAS tehnika, temeljena na scintilatorima ili vodenim Čerenkovljevim detektorima raširenim na velikim površinama, izvorno je dizajnirana za detekciju kozmičkih zraka pri PeV i EeV energijama. Kako bi se ova tehnika usvojila u gama-astronomiji, energijski prag treba smanjiti za dva ili tri reda veličine.

To se može postići korištenjem gustih nizova čestica smještenih na vrlo velikim visinama. Izvedivost oba pristupa dokazana je u suradnji ARGO i Milagro. Konkretno, grupa Milagro izvijestila je o nekoliko vrlo proširenih izvora.

Danas postoje četiri aktivna IACT sustava tj. Čerenkovljevih teleskopa treće generacije:

- H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System) u Namibiji
- MAGIC (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov) u Kanarskim otocima
- VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System) u Arizoni
- FACT (First G-APD Cherenkov Telescope) u Kanarskim otocima

Vezano uz gama-astronomiju koja se proteže do 1 PeV, možemo napomenuti opservatorij LHAASO (Large High Altitude Air Shower Observatory) u Sichuanu u Kini. Znanstvenici u LHAASO-u koriste se bazenima velike površine koji uz 12 teleskopa omogućuju opažanje VHE fotona uz svoju prilagodljivu geografsku poziciju.



## Izvori gama-zračenja

Elektroni mogu doseći energije i do 100 TeV (masa mirovanja im je samo 0.5 MeV) pa ih zovemo ultrarelativističkim elektronima. Takvi elektroni koji na svom putu nalete na niskoenergijske fotone (npr. mikrovalno pozadinsko zračenje koje je sveprisutno), fotonima mogu predati velik dio svoje energije, tako stvarajući gama-zračenje visokih i vrlo visokih energija. Spomenuti se proces zove inverzno Comptonovo raspršenje i glavni je izvor visokoenergijskog gama-zračenja, emitiranih ostacima supernova.

## Ostaci supernove

Opće je poznato da će velike zvijezde završiti svoj život eksplozijom supernove. Takva eksplozija otpuhuje zvijezdine slojeve u ostatak supernove (supernova remnant - SNR), koji zagrijava okolni medij i ubrzava kozmičke zrake (elektrone i protone) do ekstremno visokih energija. Zračenje iz SNR-ova, nalik školjkama, sastoji se od toplinske emisije iz šokom zagrijanog plina i ne-toplinske emisije iz čestica ubrzanih udarom. Količina relativističkih čestica raste s vremenom kako SNR prolazi kroz fazu slobodne ekspanzije i doseže maksimum u ranim fazama. Sukladno tome, vrhunac intenziteta gama-zraka obično se pojavljuje nekih  $10^3$  -  $10^4$  godine nakon eksplozije supernove.

Prvi pouzdano detektirani visokoenergetski gama-izvor bila je Maglica Rakovica 1989. godine, otkrivena Čerenkovljevim teleskopom Whipple smještenim u Arizoni. Najpoznatiju eksploziju supernove, kineski astronomi još 1054. godine zabilježili su kao iznenadnu pojavu nove sjajne zvijezde, a danas predstavlja SNR koji je udaljen oko 6500 svjetlosnih godina (slika). Maglica Rakovica trenutačno je najsjajniji izvor gama-zračenja na nebu, s energijom izmjerenom iznad 10 TeV.

## Pulsari

Brzo rotirajuće i snažno magnetizirane neutronske zvijezde okružene rotirajućom magnetosferom i praćene relativističkim izbačajima – emitiraju zračenje na svim valnim duljinama. Smatra se da se nabijene čestice (elektroni i pozitroni) proizvodeći zračenje učinkovito ubrzavaju u elektromagnetskim poljima pulsara. Iako su pulsari tradicionalno bili predmet radioastronomije, s oko 1800 pulsara otkrivenih kako zrače radiovalove, većina njihovog zračenja emitira se pri visokim energijama. Doista, u posljednjih nekoliko godina, broj pulsara gama-zračenja eksponencijalno se udvostručio, te na više od 150 zahvaljujući novim osjetljivim instrumentima *Fermi*-LAT i AGILE.

## Maglica pulsarnog vjetra

Maglica pulsarnog vjetra (Pulsar Wind Nebula - PWN), također poznati pod nazivom plerioni, vrste su maglica koje se nalaze unutar školjke SNR-a i pokretane su vjetrom iz središta pulsara. Relativistički vjetrovi iz energetskih pulsara prenose većinu rotacijske snage u okolni medij, ubrzavajući čestice do visokih energija, bilo tijekom njihovog širenja ili kod udaraca koji nastaju u sudarima vjetrova.

Opažanja u VHE-području maglica pulsarnog vjetra otkrila su da se radi o najučinkovitijim galaktičkim objektima za proizvodnju VHE gama-zraka, omogućujući detekciju takvih sustava čak i izvan Mliječne staze. Do 2004. godine detektiran je samo Crab PWN sa stalnim tokom gama-zraka iznad 1 TeV (zbog čega je imao status „standardna svijeća“). Jedinica za



tok VHE gama-zračenja dobila je naziv upravo po Maglici Rakovica - crab. Maglica Rakovica sukladno je tome definirana kao PWN i SNR.

Razvoj novih osjetljivih IACT-ova posljednjih godina povećao je broj vjerojatnih otkrivenih PWNe na najmanje 27 izvora, dok se za mnoge neidentificirane izvore gama-zraka vjeruje da su PWNe (ili stari reliktni PWNe). Dugi niz godina, Maglica Rakovica smatrala se standardnom svijećom za VHE detektore, kao najsvjetliji postojani točkasti TeV izvor gama-zraka koji se učinkovito vidi s obje hemisfere.

### Dvojni sustavi u području TeV

Broj dvojnih sustava u području TeV (izvora) koji emitiraju promjenjivu, moduliranu VHE emisiju sastavljenu od masivne zvijezde i kompaktnog objekta - stalno se povećavao posljednjih godina, zahvaljujući velikoj vremenskoj pokrivenosti i dubokoj i ujednačenoj ekspoziciji galaktičke ravnine od strane MAGIC, VERITAS i H.E.S.S. Emisija zračenja u TeV području proizlazi iz interakcije dvaju objekata, bilo u mlazu s akrecijskim pogonom (scenarij mikrokvazara), ili udarom pulsarnog vjetra sa zvjezdanog vjetra (scenarij vjetra).

U scenariju mikrokvazara, ubrzanje čestica odvija se u mlazu koji potječe iz akrecijskog diska. Takva smanjena verzija aktivne galaktičke jezgre otvara mogućnost značajnih uvida u mehanizam proizvodnje mlaza. U scenariju vjetra, ubrzanje čestica događa se u području interakcije između ultrarelativističkog pulsarnog vjetra i gustog polja zračenja koje osigurava zvijezda pratilja.

### Središte galaksije

Središte galaksije (Galaxy Centar – GC) skriva mnoge izvanredne objekte, uključujući nekoliko potencijalnih mjesta za ubrzanje čestica i proizvodnju gama-zraka. Važno je naglasiti kompaktni radioizvor Strijelac A\*, za koji se zna da je supermasivna crna rupa smještena u dinamičkom središtu Galaksije. GC sadrži jak izvor gama-zraka (slike 11 i 12) sa širokopojasnim spektrom koji se proteže od 100 MeV do 30 TeV.

### Blazari

Većina otkrivenih izvangalaktičkih izvora gama-zraka pripada klasi blazara, koja uključuje BL Lac objekte (vrsta aktivne galaktičke jezgre koja je specifična po brznoj i velikoj amplitudi varijabilnosti toka) i radiokvazare ravnog spektra (FSRQ).

Smatra se da središnji motor u ovim aktivnim galaksijama (Active Galaxy Nucleus - AGNs), supermasivna crna rupa (black hole - BH) mase  $\geq 10^7 M_{\odot}$  okružena akrecijskim diskom, izbacuje relativistički mlaz, gotovo izravno usmjeren promatraču. Pojačanja Dopplerovih efekata rezultiraju snažnim pojačanjem toka, što prirodno pogoduje detekciji blazara na izvangalaktičkom nebu. Detekcija velikog broja blazara koji emitiraju gama-zrake otvorila je novo područje istraživanja - "gama-kozmozologiju".

### Radiogalaksije

Neusklađeni (ne-blazar) AGN, karakteriziran mlazovima znatno nagnutim u odnosu na promatrača, predstavljaju posebno zanimljivu klasu VHE izvora. Obližnje radiogalaksije (RG) posebno su zanimljive jer nam njihova blizina može omogućiti da razrješenje radiomlazeva do subparsečnih ljestvica i da proučavanje moguće korelacije više valnih duljina.

Odsutnost snažnog Dopplerovog pojačanja mogla bi učiniti VHE detekciju izazovnom, ali i omogućiti stjecanje jedinstvenih uvida u područja emisije koja su inače skrivena. Od 1000 visokoenergijskih (HE) izvora, *Fermi-LAT* je izvijestio o detekciji samo oko deset neusklađenih radiogalaksija pri energijama u području GeV, uz prevlast Fanaroff-Rileyjevog tipa I (FR I). Na TeV energijama, samo četiri radiogalaksija identificirana su od strane trenutnih IACT-ova: najbliži AGN Cen A, divovski RG M87 i skup Perseus, RGs NGC 1275 i IC 310.

### Zvjezdorodne galaksije

Zvjezdorodne galaksije (Starburst Galaxies - SGs) galaksije su koje pokazuju vrlo visoku stopu stvaranja zvijezda (engl. *starburst*) u lokaliziranom području, a stvaranje zvijezda se ponekad pokreće bliskim susretom s drugom galaksijom. Značajno povećana stopa eksplozije supernove (SN) i očekivanje da su ostaci (SNR) od njih učinkoviti akceleratori protona kozmičkih zraka (CR), sugeriraju da zvjezdorodna područja mogu posjedovati visoku gustoću kozmičkih zraka.

#### Kandidati

- Bljesak gama-zračenja (engl. *Gamma-Ray Burst* – GRB) emitira intenzivne gama-zrake energija do nekoliko desetaka GeV, a njihovi intrinzični fotonski spektri vjerojatno će se protezati do TeV energije zbog inverznih Comptonovih procesa u leptonskim modelima ili elektromagnetskim kaskadama (pokrenutim  $p\gamma$  - i  $pp$  interakcijama protona ubrzanih kozmičkih zraka) u hadronskim modelima.
- Masivni skup galaksija (engl. *Massive Cluster of Galaxies*), koji sadrži moćne AGN-ove i okružen je snažnim akrecijskim udarima, predstavlja još jednu potencijalnu klasu izvora VHE. Emisija gama-zraka mogla bi se proizvesti u nekoliko procesa, kao što je IC raspršenje CMB-a i drugih mekih fotonskih polja od strane elektrona koji se ubrizgavaju u medij među klasterima te nadalje ubrzavaju turbulentnim procesima.
- Obližnje mirne ili pasivne supermasivne crne rupe (Passive supermassive Black Holes - PBHs) su vrlo masivne crne rupe smještene u jezgrama galaksije bez svijetlih znakova širokopojasne emisije i s vrlo niskim sjajem na nižoj frekvenciji, potencijalno bi također mogle proizvesti kozmičke zrake ultra visoke energije (UHECR) i VHE gama-zrake nizom magnetosferskih procesa.

Svi navedeni VHE-izvori se mogu kroz kategorizaciju prikazati na nebeskoj karti u galaktičkim koordinatama. Postupak kako da se dođe do toga najbolje se može prikazati preko programskog jezika Python.



## Python

Python jest programski jezik opće namjene i visoke razine koji programerima dopušta korištenje nekoliko različitih stilova programiranja. Nastao je 1990. godine te naziv dobio po popularnoj britanskoj seriji Monty Python's Flying Circus. Python se najčešće koristi na Linuxu te je u zadnjih nekoliko godina jedan od najpopularnijih programskih jezika.

Za rad su nam nužni nekolicina različitih Python paketa, među kojima možemo navesti:

- Astropy – temeljni paket koji sadrži funkcionalnosti namijenjene profesionalnim astronomima i astrofizičarima
- Matplotlib – sveobuhvatni sveobuhvatna biblioteka za stvaranje statičnih, animiranih i interaktivnih vizualizacija u Pythonu
- Numpy – biblioteka s velikom zbirkom matematičkih funkcija visoke razine za rad s nizovima (engl. *arrays*)
- Csv – modul za čitanje i pisanje tabličnih podataka u CSV formatu

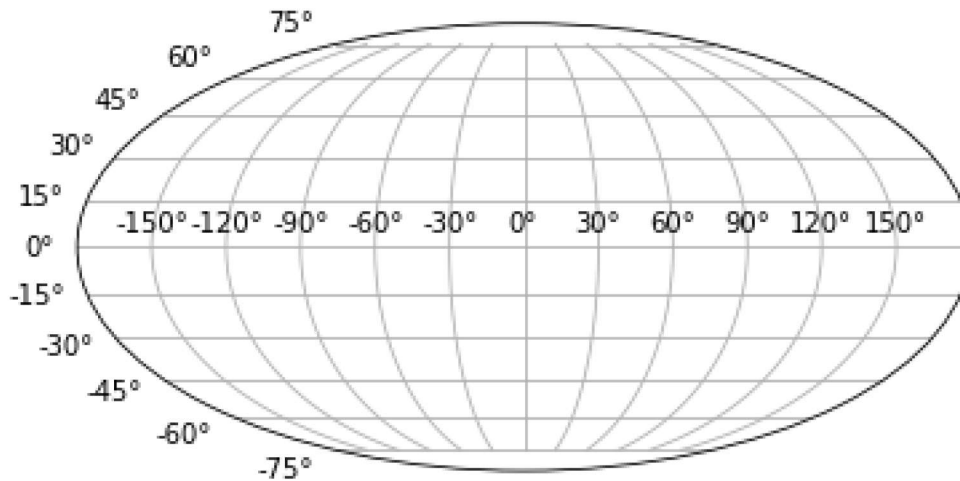
## Vizualni prikaz VHE-izvora pomoću Python koda

Pri stvaranju Python koda fokusiramo se na potrebne pakete koje moramo unijeti kako bi olakšali mnoštvo funkcija.

```
from astropy.coordinates import (SkyCoord, Galactic)
import astropy.coordinates as coord
import astropy.units as u
import matplotlib.pyplot as plt
from astropy.table import QTable
import numpy as np
import csv
```

Zatim se bavimo vizualnim prikazom nebeske karte u sfernim koordinatama. Prikaz nebeske karte omogućen je korištenjem Mollweideove projekcije, iako se također mogla koristiti Aitoff projekcija.

```
fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(111, projection='mollweide')
plt.grid(True)
```



Slika 1: Mollweideova projekcija

Koristeći se podacima iz <http://tevcac.uchicago.edu> stranice, stvara se u csv (engl. *comma-separated values*) obliku tablica podataka koja se mora manipulirati unutar koda. Uporabom `csv.reader()` očitava se tablica te se za svaki stupac stvara lista uz pretpostavku da će biti potrebna ubuduće.

*#pravi podaci*

```
podaci=open('podaci.csv')
csvreader=csv.reader(podaci)
naslovi=[next(podaci)]
```

```
rows=[i for i in csvreader]
```

```
imena=[i[0] for i in rows]
ra1=[i[1] for i in rows]
dec1=[i[2] for i in rows]
types=[i[3] for i in rows]
datumi=[i[4] for i in rows]
udaljenosti=[i[5] for i in rows]
```

U ovom su trenutku najnužniji podatci za rektascenziju (eng. right ascension) i deklinaciju. Provjeravajući te podatke uočavaju se mnogobrojni problemi koje je potrebno popraviti. Navedeni brojevi kod rektascenzije predstavljaju sate, minute i sekunde, a kod deklinacije stupnjeve, minute i sekunde. Oni su odvojeni razmakom te su svi zajedno predstavljeni u tekstualnom obliku (eng. string).

```
print(type(ra1[0]))
print(type(dec1[0]))
print(ra1[:10])
print(dec1[:10])
```

```
<class 'str'>
<class 'str'>
['00 02 07.6', '00 06 26', '00 13 52.0', '00 25 21.6', '00 33 36', '00
35 16.8', '00 47 32.54', '01 05 28.88', '01 12 05.8', '01 36 32.5']
['-02 56 06', '+72 59 01.0', '-18 53 29', '+64 07 48', '-19 21 00', '+59
47 24.0', '-25 17 25.4', '+16 30 58.0', '+22 44 39', '+39 06 00']
```

Problem tekstualnog oblika podataka rješava se tako da se podatci pretvore u decimalni oblik pomoću navedenog koda:

```
#RA
iznosi_ra=[]
for i in ra1:
    ra2=i.split(' ')
    iznos=float(ra2[0])*15 +float(ra2[1])/60 + float(ra2[2])/3600
    iznos=iznos*15
    iznosi_ra.append(iznos)

ra=np.array(iznosi_ra)
```

```
#DEC
iznosi_dec=[]

for i in dec1:
    dec2=i.split(' ')
    if float(dec2[0])>0:
        iznos2=float(dec2[0]) + float(dec2[1])/60 +
float(dec2[2])/3600
    else:
        iznos2=float(dec2[0]) - float(dec2[1])/60 -
float(dec2[2])/3600
    iznosi_dec.append(iznos2)

dec=np.array(iznosi_dec)
```

Može se uočiti kako su podatci uspješno pretvoreni iz “string” u “float” oblik. Za primjer prikazujemo podatke deklinacija prvih 10 izvora.

```
print(type(dec[0]))

for i in range(10):
    print("{} = {}".format(dec1[i],dec[i]))

<class 'str'>
<class 'numpy.float64'>
-02 56 06 = -2.935
+72 59 01.0 = 72.983611111111112
-18 53 29 = -18.891388888888887
+64 07 48 = 64.13
-19 21 00 = -19.35
+59 47 24.0 = 59.79
-25 17 25.4 = -25.290388888888889
+16 30 58.0 = 16.516111111111112
+22 44 39 = 22.744166666666667
+39 06 00 = 39.1
```

Slijedeći korak jest kreiranje nove csv tablice pomoću koje se stvara kartu. To se može uraditi uporabom `csv.writer()` preko se dobiva tablica s prepoznatljivim oblikom podataka.



```

with open('podaci_novo.csv','w',newline='') as file:
    writer=csv.writer(file)
    writer.writerow([naslovi[0][i] for i in range(6)])
    for i in range(len(rows)):

        writer.writerow([imena[i],iznosi_ra[i],iznosi_dec[i],types[i],datu
mi[i],udaljenosti[i]])

```

Koristeći se QTable-om i SkyCoord-om iz astropy paketa stvorena je nova tablica unutar koda koja olakšava korištenje mjernih jedinica unutar Pythona.

```

tbl=QTable.read('podaci_novo.csv')
qtbl=SkyCoord(ra=tbl['RA']*u.deg,dec=tbl['Dec']*u.deg)

```

```
print(tbl[:10])
```

Name	RA	...	Date	Dist
GRB 180720B	0.5316666666666667	...	2019.05	z = 0.654
CTA 1	1.6083333333333334	...	2011.1	1.4 kpc
SHBL J001355.9-185406	3.4666666666666667	...	2010.11	z = 0.095
Tycho	6.340000000000001	...	2010.05	3.5 kpc
KUV 00311-1938	8.4	...	2012.07	--
1ES 0033+595	8.82	...	2011.1	z = 0.467
NGC 253	11.885583333333333	...	2009.07	2500 kpc
GRB 201216C	16.370333333333333	...	2020.12	z = 1.1
S2 0109+22	18.024166666666666	...	2015.07	--
RGB J0136+391	24.135416666666668	...	2012.07	--

Zatim se koristi Galactic naredba koja kroz podatke za rektascenziju (RA) i deklinaciju (DEC) prikazuje galaktičke koordinate za svaki VHE-izvor.

```
qtbl_g=qtbl.galactic
```

```
print(qtbl[:10])
```

```

<SkyCoord (ICRS): (ra, dec) in deg
  [( 0.53166667, -2.935      ), ( 1.60833333, 72.98361111),
   ( 3.46666667, -18.89138889), ( 6.34      , 64.13      ),
   ( 8.4      , -19.35      ), ( 8.82      , 59.79      ),
   (11.88558333, -25.29038889), (16.37033333, 16.51611111),
   (18.02416667, 22.74416667), (24.13541667, 39.1      )]>

```

Kako bi se prepoznali različiti VHE-izvori mora ih se podjeliti po bojama. To je moguće uz pomoć stvaranja mnogo različitih lista. Svaka navedena lista prikazuje boju u koju se određene vrste izvora svrstavaju. Pošto postoji previše različitih VHE-izvora, najlakše ih je grupirati po sličnosti.

```

types_n=[]
types_purple=['PWN' , 'PWN/TeV Halo','TeV Halo']
types_blue=['Globular Cluster','BL Lac (class unclear)','Massive Star
Cluster']

```

```

types_red=['AGN (unknown type)',
'HBL', 'LBL', 'Blazar', 'FRI', 'IBL', 'GRB', 'FSRQ']
types_green=['Shell', 'Giant Molecular Cloud', 'SNR/Molec.
Cloud', 'Superbubble', 'Composite SNR', 'SNR']
types_grey=['UNID', 'DARK']
types_yellow=['Nova', 'Binary', 'PSR']
for i in types:
    if i=='Starburst':
        types_n.append('orange')
    elif i in types_purple:
        types_n.append('purple')
    elif i in types_blue:
        types_n.append('blue')
    elif i in types_red:
        types_n.append('red')
    elif i in types_green:
        types_n.append('green')
    elif i in types_grey:
        types_n.append('grey')
    elif i in types_yellow:
        types_n.append('yellow')
    else:
        types_n.append(i)

```

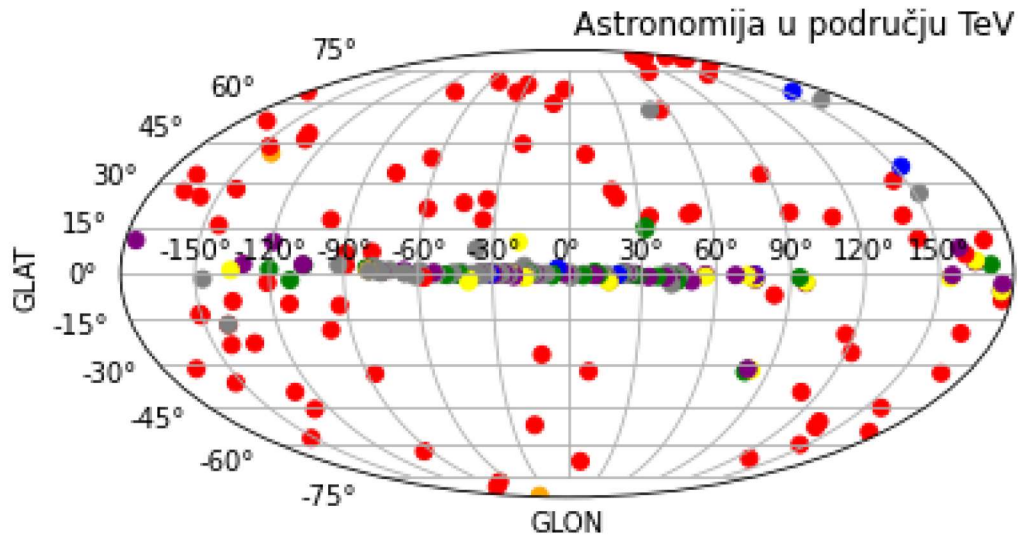
Pomoću matplotlib paketa i pretvaranja galaktičkih koordinata u radijane mogu se prikazati točke (eng. scatters) na nebeskoj karti na slijedeći način:

```

fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(111, projection='mollweide')
plt.grid(True)
plt.xlabel("GLON")
plt.ylabel("GLAT")
sph = qtbl_g.spherical
cs = ax.scatter(-
sph.lon.wrap_at(180*u.deg).radian, sph.lat.radian, c=types_n)
plt.title(label="Astronomija u području TeV", loc="right")

Text(1.0, 1.0, 'Astronomija u području TeV')

```



Slika 2: Nebeska karta VHE-izvora prema današnjim podatcima

U slučaju urednijeg prikaza određenih grupa izvora, nužno je napraviti još nekoliko novih lista pomoću koje se pravi bolja i detaljnija podjela točaka. U navedenim listama se preko “for” petlje smještaju galaktičke koordinate u radijanima za svaku grupu VHE-izvora.

```
orange_lon=[]
orange_lat=[]
purple_lon=[]
purple_lat=[]
blue_lon=[]
blue_lat=[]
red_lon=[]
red_lat=[]
green_lon=[]
green_lat=[]
grey_lon=[]
grey_lat=[]
yellow_lon=[]
yellow_lat=[]
```

```
#print(types)
```

```
broj=-1
```

```
for i in types:
    broj=broj+1
    if i=='Starburst':
        orange_lon.append(-sph.lon[broj].wrap_at(180*u.deg).radian)
        orange_lat.append(sph.lat[broj].radian)
    elif i in types_purple:
        purple_lon.append(-sph.lon[broj].wrap_at(180*u.deg).radian)
        purple_lat.append(sph.lat[broj].radian)
    elif i in types_blue:
        blue_lon.append(-sph.lon[broj].wrap_at(180*u.deg).radian)
        blue_lat.append(sph.lat[broj].radian)
    elif i in types_red:
```



```

        red_lon.append(-sph.lon[broj].wrap_at(180*u.deg).radian)
        red_lat.append(sph.lat[broj].radian)
    elif i in types_green:
        green_lon.append(-sph.lon[broj].wrap_at(180*u.deg).radian)
        green_lat.append(sph.lat[broj].radian)
    elif i in types_grey:
        grey_lon.append(-sph.lon[broj].wrap_at(180*u.deg).radian)
        grey_lat.append(sph.lat[broj].radian)
    elif i in types_yellow:
        yellow_lon.append(-sph.lon[broj].wrap_at(180*u.deg).radian)
        yellow_lat.append(sph.lat[broj].radian)
    else:
        print("error")

```

Novi podatci u listama preobražavaju se u skupine točaka koje se kategoriziraju gdje *c* (engl. *color*) predstavlja argument za boju:

```

cs1=ax.scatter(np.array(orange_lon),np.array(orange_lat),c="orange")
cs2=ax.scatter(np.array(purple_lon),np.array(purple_lat),c="purple")
cs3=ax.scatter(np.array(blue_lon),np.array(blue_lat),c="blue")
cs4=ax.scatter(np.array(red_lon),np.array(red_lat),c="red")
cs5=ax.scatter(np.array(green_lon),np.array(green_lat),c="green")
cs6=ax.scatter(np.array(grey_lon),np.array(grey_lat),c="grey")
cs7=ax.scatter(np.array(yellow_lon),np.array(yellow_lat),c="yellow")

```

Iz matplotlib paketa uzima se RadioButtons koji omogućuje prikazivanje tipki. Pomoću funkcije `set_visible` moguće je na karti razdvojiti navedene grupe točaka po želji.

```

from matplotlib.widgets import (RadioButtons)
scatters=(cs1,cs2,cs3,cs4,cs5,cs6,cs7)
labels=('Starburst','PWN','PWN/TeV HaloTeV','Halo','Globular Cluster,BL
Lac (class unclear),Massive Star Cluster','AGN (unknown type),
HBL,LBL,Blazar,FRI,IBL,GRB,FSRQ','Shell,Giant Molecular Cloud,SNR/Molec.
Cloud,Superbubble,Composite SNR,SNR','UNID,DARK','Nova,Binary,PSR')

```

```

def set_visible(label_names):
    option_index=labels.index(label_names)
    for i, val in enumerate(scatters):
        if i==option_index:
            scatters[i].set_visible(True)
        else:
            scatters[i].set_visible(False)
    plt.draw()

```

Pomoću različitih gadgeta iz matplotlib paketa može se kod urediti svojevóljno. Kad se sve to zajedno kombinira dobiva konačna slika sa gadgetima koja olakšava prikaz.

```

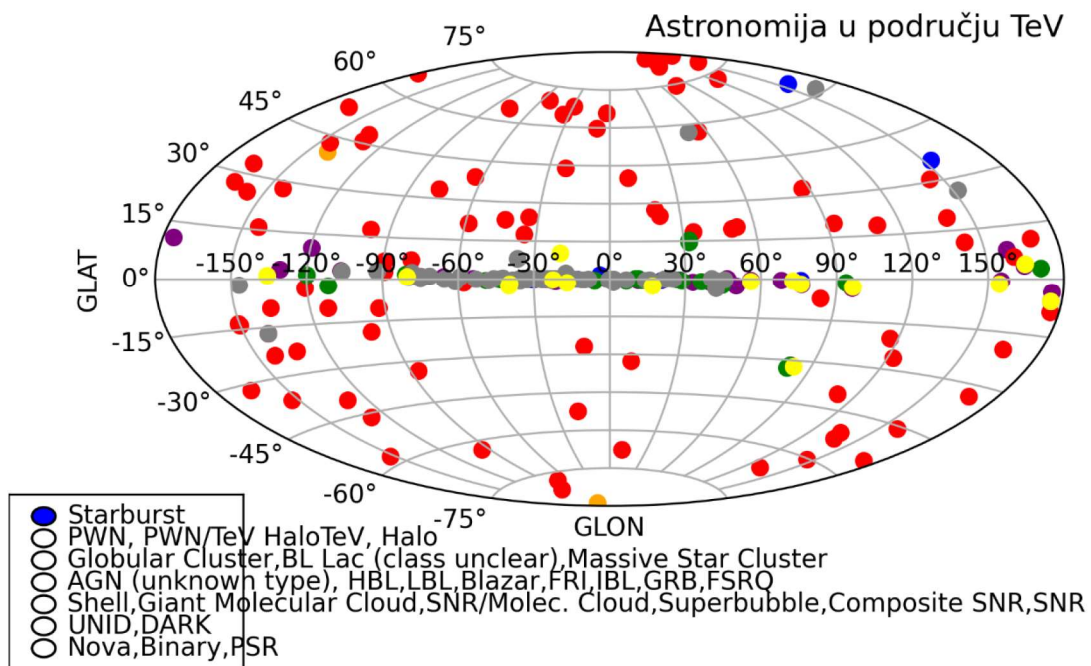
fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(111, projection='mollweide')
plt.grid(True)
plt.xlabel("GLON")
plt.ylabel("GLAT")
cs1=ax.scatter(np.array(orange_lon),np.array(orange_lat),c="orange")
cs2=ax.scatter(np.array(purple_lon),np.array(purple_lat),c="purple")

```

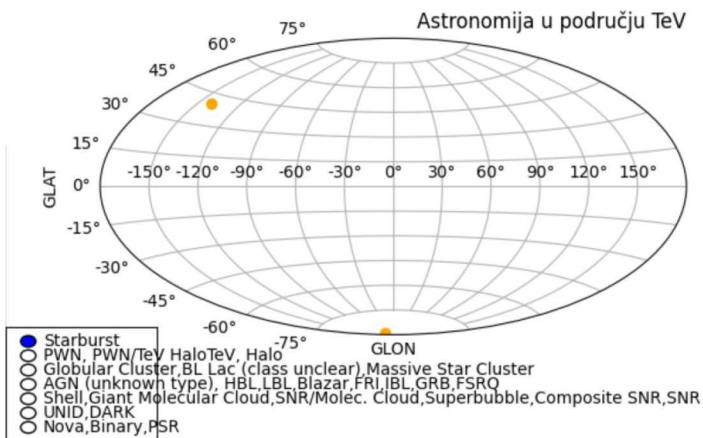
```

cs3=ax.scatter(np.array(blue_lon),np.array(blue_lat),c="blue")
cs4=ax.scatter(np.array(red_lon),np.array(red_lat),c="red")
cs5=ax.scatter(np.array(green_lon),np.array(green_lat),c="green")
cs6=ax.scatter(np.array(grey_lon),np.array(grey_lat),c="grey")
cs7=ax.scatter(np.array(yellow_lon),np.array(yellow_lat),c="yellow")
plt.title(label="Astronomija u području TeV",loc="right")
button1=plt.axes([0.0,0.05,0.2,0.2]) #Left,bottom,width,height
radio_button=RadioButtons(button1,labels)
radio_button.on_clicked(set_visible)

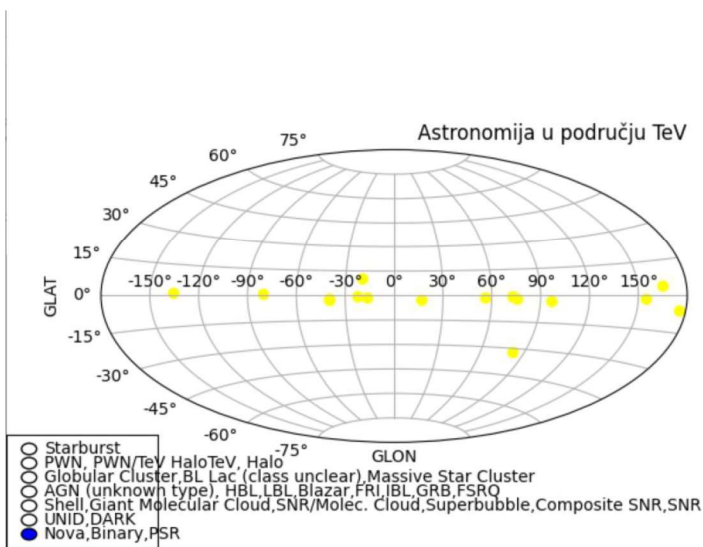
```



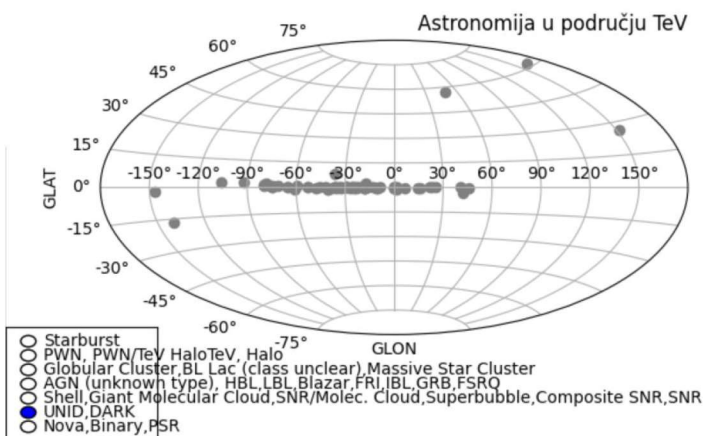
Slika 3: Nebeska karta VHE izvora prema današnjim podatcima s pomagalom odabira kategorije



Slika 4: Primjer nebeske karte koja prikazuje samo VHE izvore zvjezdanog praska (narančasta boja)



Slika 5: Primjer nebeske karte koja prikazuje samo VHE izvore nove, dvojnih sustava i pulsara (žute boje)



Slika 6: Primjer nebeske karte koja prikazuje samo VHE izvore nepoznate vrste (sive boje)

## Literatura

- 1) Giuseppe Di Sciascio 2019 J. Phys.: Conf. Ser. 1263 012003  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1263/1/012003>
- 2) Rieger, F.M., de Oña-Wilhelmi, E. & Aharonian, F.A. TeV astronomy. Front. Phys. 8, 714–747 (2013).  
<https://doi.org/10.1007/s11467-013-0344-6>
- 3) Adrian Price-Whelan Astronomical Coordinates 2: Transforming Coordinates Systems and Representations  
<https://learn.astropy.org/tutorials/2-Coordinates-Transforms.html>
- 4) TeVCat University of Chicago  
<http://tevcat.uchicago.edu>