



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET



Detekcija kosmičkog zračenja mobilnim telefonom

- Master rad -

Mentor:

Prof. dr Maja Stojanović

Kandidat:

Kenan Tmušić 349m/20

Novi Sad 2021.

Predgovor

Veliku zahvalnost za izradu master rada dugujem profesorici Tijani Prodanović na nesebičnim savetima, idejama koje su mi pomogle tokom izrade ovog rada.

Takođe želim da se zahvalim članovima komisije, profesorima, Maji Stojanović, Miodragu Krmaru i Nikoli Jovančeviću.

Zahvalnost ide i mojoj porodici na pruženoj podršci i razumevanju tokom izrade master rada.

*Mi smo deo ovog univerzuma, mi smo ovaj univerzum,
ali najvažnije od obe ove činjenice je da je univerzum u nama.*

Nil de Gras Tajson

Sadržaj

1.	Uvod.....	5
2.	Kosmičko zračenje.....	7
2.1.	Sastav kosmičkog zračenja	8
2.2.	Primarno kosmičko zračenje	9
2.2.1.	Galaktički model	9
2.2.1.1.	Pulsari.....	9
2.2.1.2.	Supernova.....	10
2.2.2.	Vangalaktički model	11
2.2.2.1.	Aktivna galaktička jezgra.....	11
2.2.2.1.1.	Radio glasna AGN	11
2.2.2.1.2.	Radio tiha AGN.....	14
2.3.	Sekundarno kosmičko zračenje.....	15
2.3.1.	Elementarne čestice.....	15
2.3.2.	Kosmičko zračenje u atmosferi i na površini Zemlje.....	16
2.3.3.	Kosmičko zračenje ispod površine Zemlje	18
3.	Mioni.....	19
3.1.	Fluks miona.....	21
4.	Detektori.....	25
4.1.	CCD kamera.....	29
5.	Eksperimentalni deo.....	32
5.1.	Apple Iphone 8 – karakteristike procesora i kamere	32
5.2.	Cosmic Ray – Detect Radiation	33
5.3.	Cosmic Ray Live.....	35
6.	Rezultati i diskusija.....	37
7.	Zaključak.....	40
	Dodatak	41
8.	Literatura.....	42
	Biografija	44

1. Uvod

Sve do 1910. godine nije bilo nikakvog dokaza niti objašnjenja o postojanju bilo kakvih čestica veće prodorne snage kao što to imaju γ -zraci. Isto tako pre 1910. godine nije bilo nikakvog traga o tome da neke čestice dolaze izvan naše galaksije. Takva ideja nikad pre toga nije bila ni predložena. Ove 2021. godine naučnici mogu da slave 109 godina istraživanja kosmičkog zračenja, koju je započeo tada mladi naučnik sa Univerziteta u Gracu, Viktor F. Hess (1883-1964) koji traži izvore ionizacije vazduha pomoću letova balona na različitim visinama. Uz to je otkrio još jedno zračenje koje je kasnije označeno kao „Kosmičko zračenje“. Viktor Hess se tada suočio sa mnogim problemima, kako bi ubedio tadašnju naučnu zajedinicu da ono što je otkrio 1912. godine jesu čestice vanzemaljskog porekla.

1926. godine, Robert Millikan ovo zračenje naziva kosmičkim zračenjem, ali on je ovo zračenje povezao sa gama zracima. Bilo je čak i rasprave početkom 1930. godine između Millikana i Artura Comptona o prirodi kosmičkog zračenja (KZ). Krajem 1930. godine, posle mnogobrojnih eksperimenata bilo je jasno da u sastav KZ spadaju nanelektrisane čestice, bilo je samo pitanje da li su pozitivno ili negativno nanelektrisane. Odgovor na ovo pitanje bi imalo vrlo važne implikacije za kosmološke teorije o poreklu univerzuma.

Kompton šalje svog studenta Luisa V. Alvarezu, budućeg dobitnika Nobelove nagrade, da sprovodi eksperimente na planinama oko Meksiko Sitija i na krovu Hotela Ženeva, gde su zajednički učitelj i student utvrdili da postoji višak od oko 10% u intenzitetu odstupanja prema zapadu, što implicira da se KZ, prema njihovim tvrđenjima tada, uglavnom sastojalo od protona.

Znači, merenja KZ vršena su nizom uređaja kao što su: elektroskopi, Wilsonove komore, Gajger – Milerovi brojači, riometri, Neutron monitori, a danas se to postiže i pametnim telefonima o čemu će biti više reči u poglavljju (5).

Jedan od problema povezanih sa poreklom KZ jesu čestice koje imaju vrlo visoke energije. Tu imamo dve hipoteze o poreklu KZ i to: galaktičku i vangalaktičku. U galaktičkom modelu moguće poreklo KZ su supernove¹ i pulsari², dok u vangalaktičkom modelu mogući izvori su aktivna galaktička jezgra (AGJ)³, supermasivne crne rupe⁴, kvazari⁵ itd.

Trenutno je dobro poznato da su čestice KZ izuzetno visokih energija koje se u interstelarnom prostoru ubrzavaju na različite načine. Čestice koje se sreću u sastavu kosmičkog zračenja su raznolike. Tu spadaju elektroni, pozitroni, nanelektrisana jezgra, protoni (nešto malo antiprotona), i alfa čestice kao i teža jezgra. U nekom širem smislu, kosmičko zračenje pored ovih prethodno pomenutih čestica može da obuhvata i visokoenergijske γ fotone, neutrine i

¹ Supernova je zvezdana eksplozija tokom koje se emituje ogromna količina energije za vrlo kratko vreme.

² Pulsari su brzo rotirajuće neutronske zvezde, koje emituju jako elektromagnetsko zračenje u pravcu ose magnetnog polja.

³ AGJ je područje u blizini supermasivne crne rupe, okruženo gasom.

⁴ Supermasivna crna rupa nastaje sudaranjem drugih crnih rupa i spajanjem galaksija.

⁵ Kvazari ili kvazi-stelarni radio izvori koji se karakterišu velikim crvenim pomakom z Supernova je zvezdana eksplozija tokom koje se emituje ogromna količina energije za vrlo kratko vreme.

⁶ Pulsari su brzo rotirajuće neutronske zvezde, koje emituju jako elektromagnetsko zračenje u pravcu ose magnetnog polja.

⁷ AGJ je područje u blizini supermasivne crne rupe, okruženo gasom.

⁸ Supermasivna crna rupa nastaje sudaranjem drugih crnih rupa i spajanjem galaksija.

⁹ Kvazari ili kvazi-stelarni radio izvori koji se karakterišu velikim crvenim pomakom.

antineutrine. [3] Za čestice kosmičkog zračenja koje imaju energije do 10^{15} eV delimično može da se objasni poreklo i način nastajanja, dok za čestice na većim energijama preko 10^{20} eV još uvek nije detaljno objašnjeno. Shodno tome, odgovor na ovo pitanje energija i ubrzanja čestica KZ zahteva velike opservatorijume i različite metode ispitivanja i osmatranja.

Naše znanje o kosmičkom zračenju u potpunosti se promenilo usled stvaranja novih teleskopa na osnovu modela Cherenkov-ovog teleskopa, kao što su : HESS, MAGIC, VERITAS, IceCube, kao i satelita AGILE i Fermi i mnogi drugi. Ovi objekti su nam pomogli da nađemo veliki broj izvora zračenja u poslednjih nekoliko godina. Otkrivanje sve više izvora KZ pripada najznačajnijim dostignućima poslednje decenije u astrofizici.

Izučavanje KZ uopšte, danas, je i dalje vrlo aktuelna tema iako je prošlo više od jednog veka. Sve bolje razumevanje i otkrivanje ove oblasti nam umngome pomaže da razumemo procese u kojima nastaju čestice enormnih energija, kao i same fizičke procese koje dovode do toga da energije čestica KZ nekoliko desetina pa i nekoliko stotina puta prelaze energije koje možemo da proizvedemo na Zemlji.

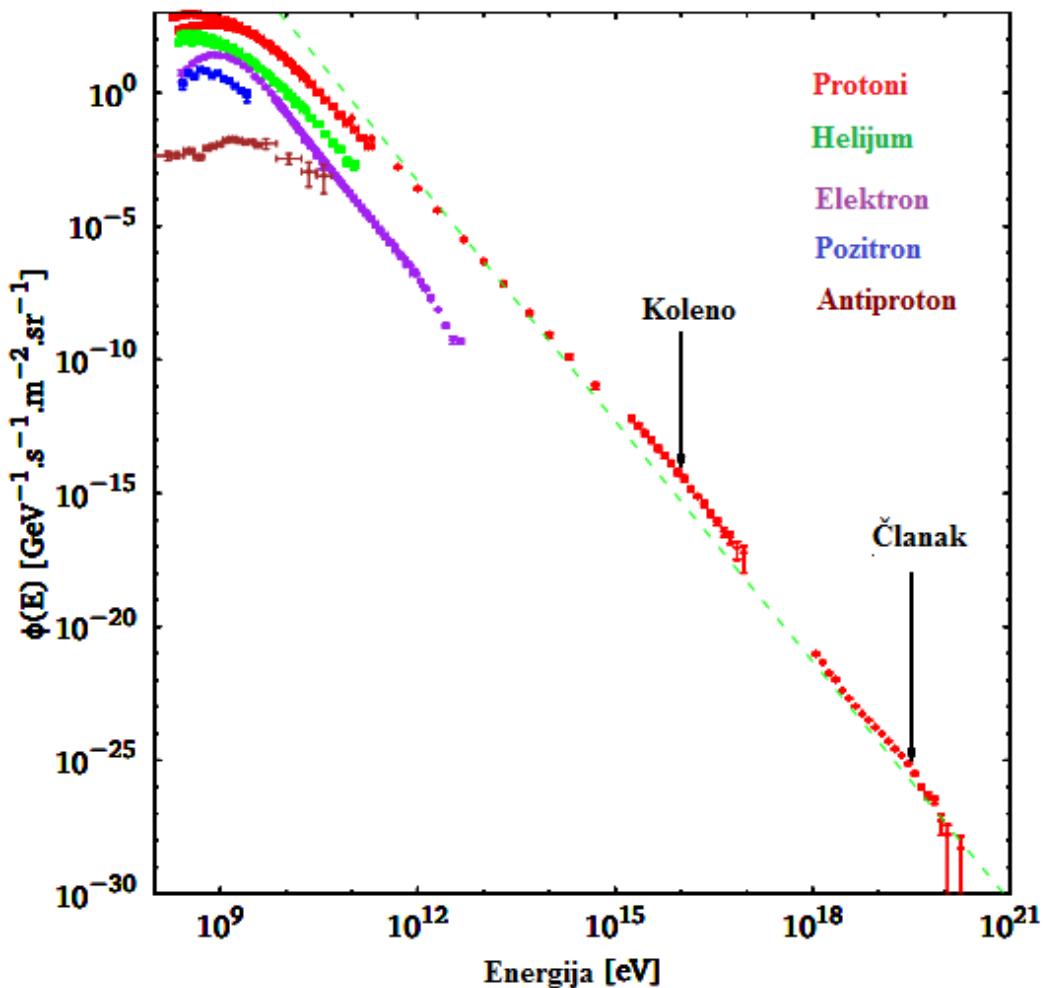
Rad se sastoji iz 8 poglavlja uključujući uvod i zaključak. Prva četiri poglavlja se tiču kosmičkog zračenja uopšte, tj. kreće se od elementarnih pojmoveva preko izvora i tipova kosmičkog zračenja pa sve do detektora. Posle toga u poglavlju (5) se opisuje način na koji funkcionišu dve aplikacije kojima smo detektovali pomenute čestice i zračenje direktno ili indirektno. Da bi u poglavlju (6) napravili određenu analizu rezultata i razliku do kojih se došlo tokom merenja. Na kraju tu je i neizostavni zaključak, poglavlje u kojem treba da se dodatno prokomentarišu rezultati, da se kaže još nešto dodatno što nije u prethodnim poglavljima rečeno i naravno da se teži daljem istraživanju i napredovanju u ovoj oblasti.

2. Kosmičko zračenje

Postoje dve osnovne vrste kosmičkog zračenja i to :

- Primarno kosmičko zračenje
- Sekundarno kosmičko zračenje

Energetski spektar KZ je možda njihova naupečatljivija karakteristika kao što se može videti na slici (1). Prostor je bogat česticama koje mogu da dostignu energije čak i do 10^{21} eV koja je milijardu puta veća od energije protona koje ubrzavaju u akceleratorima na Zemlji.



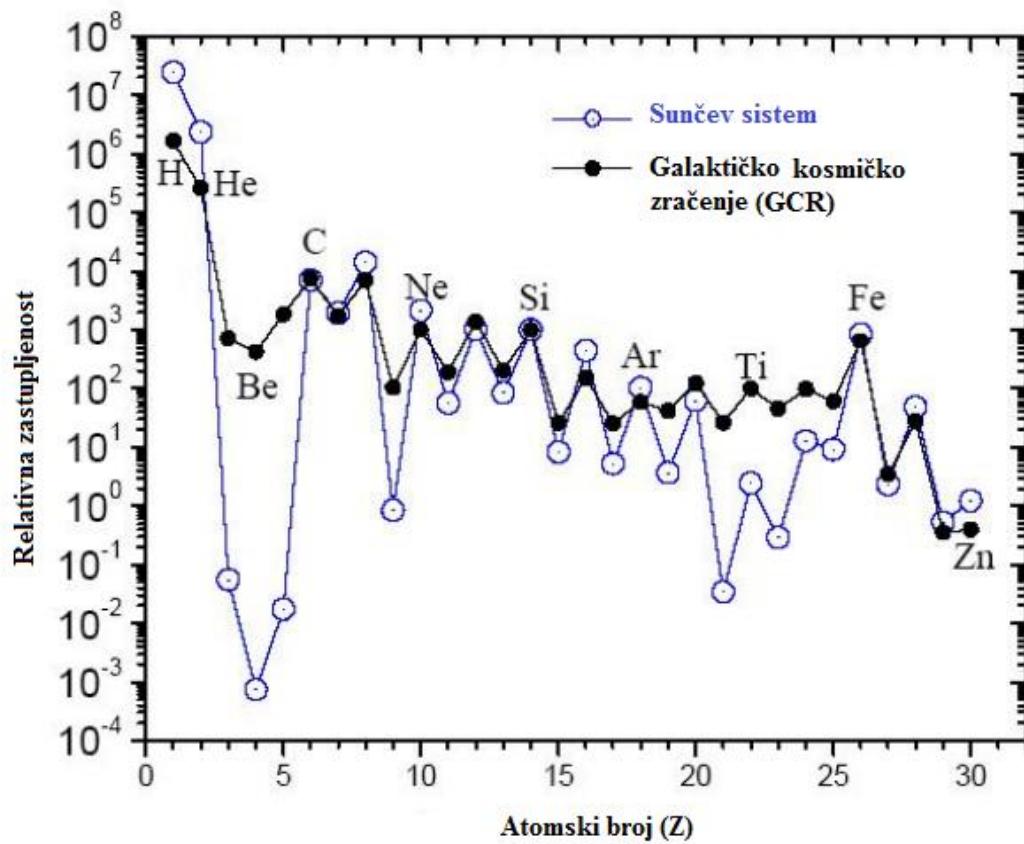
Slika 1. Spektar kosmičkog zračenja posmatran sa Zemlje. (izvor: BESS, IMAX)

Na prvi pogled ovaj spektar izgleda kao stepeni zakon. Međutim kada se bolje pogleda primećuje se nekoliko karakteristika i to „koleno“ na 10^{16} eV , drugo koleno na 10^{17} eV , članak na $10^{18.5} \text{ eV}$ i rez na $10^{19.5} \text{ eV}$ [4]. Članak se može razumeti kao slab, ali sa mekšim spektrom populacije kosmičkog zračenja koji u ovom domenu energije postaje jako bitan. Čestice koje se nalaze iznad $10^{18.5} \text{ eV}$ ne mogu se zamisliti da dolaze iz naše Galaksije, već su

vangalaktičkog porekla. Ova dva kolena su najviše problematična, i tu je spektar mekši. To je problem jer nema objašnjenja kako se prelazi sa jedne populacije na drugu osim ako se ne uvede neka iznenađujuća slučajnost.

2.1. Sastav kosmičkog zračenja

Sasvim je iznenađujuće da je sastav kosmičkog zračenja toliko bogat iako je uglavnom sastavljen od protona. U sastav ulaze i joni koji mogu biti teški poput gvožđa ili nikla. Proučavanjem hemijskog sastava kosmičkog zračenja pokazalo se da je prilično sličan onome sa Sunca a samim tim i sastavu međuzvezdane sredine. To znači da većina kosmičkog zračenja su čestice galaktičkog porekla tj. zvezdanog porekla koje su ubrzane na udarnim talasima oko galaktičkih supernovih. Međutim kako se vidi na slici (2). neki elementi su u suprotnosti sa prethodnom tvrdnjom.



Slika 2. Sastav kosmičkog zračenja

Naime, bor ($Z = 5$) se može naći prilično obilno u KZ, ali ne i u zvezdama. Istina, nuklearni procesi pri velikim gustinama ne preferiraju stvaranje bora u velikim količinama već se on odmah pretvara u teže i stabilnije elemente. Najrazumnoje objašnjenje za ovo jeste da se bor u kosmičkom zračenju stvara u interakciji snažnih kosmičkih zraka (uglavnom ugljenik i kiseonik) sa međuzvezdanom materijom (vodonik i helijum). Otuda imamo dve populacije kosmičkog zračenja: ono zračenje koje ćemo mi da nazovemo primarno kosmičko zračenje i koje je nastalo od ubrzane galaktičke materije nekim astrofizičkim pojavama i usput ubrizgano

u međuzvezdanu sredinu, i ovo drugo koje nastaje nuklearnim reakcijama primarnog kosmičkog zračenja sa međuzvezdanim gasom ili u zemljinoj atmosferi i zovemo ga sekundarno kosmičko zračenje.

Štaviše, postoji i trećestepeno zračenje koje nastaje u interakciji sekundarnog kosmičkog zračenja i međuzvezdanog gasa. Ali ova treća populacija može u većini slučajeva da bude odbačena jer je izuzetno slaba i možda bi jedino imala smisla za (antiprotone). Zbog prostiranja i nuklearnih procesa, ove tri populacije zračenja nemaju isti fluks i zbog toga je važno da ih razmatramo odvojeno prilikom nekih predviđanja, iako eskeperimenti to ne rade.

Još jedna zanimljiva vrsta koju možemo pronaći u kosmičkom zračenju su antičestice poput pozitrona i antiprotona. To su naravno deo sekundarnog kosmičkog zračenja, jer regularne zvezde ne proizvode takve čestice u velikoj meri. Prilično je malo verovatno ali opet moguće, da su anti-zvezde⁶ u potpunosti sastavljene od anti-materije i kao takve postoje u Univerzumu i proizvode primarne anti-kosmičke zrake. Međutim, ako mogu da proizvedu anti-protone i pozitrone, trebalo bi da mogu da proizvedu i anti-jezgra koja još uvek nisu otkrivena u kosmičkom zračenju. Tražeći anti-helijum (AMS-02) bi trebalo da nam odgonetne ovo pitanje i zatvori hipotezu o anti-zvezdama.

Konačno, poslednja zanimljiva pojava koja se uočava na slici (2) su radioizotopi. Prisustvo nekih od njih (poput ^{10}Be , ^{36}Al ...) i odustvo kratkotrajnih radioelemenata, daje nam ideju kako se KZ širi u svemiru jako dugo, milionima godina. To znači jedno, KZ nije epizodni fenomen, već je zaista neizostavna komponenta naše Galaksije.

2.2. Primarno kosmičko zračenje

2.2.1. Galaktički model

2.2.1.1. Pulsari

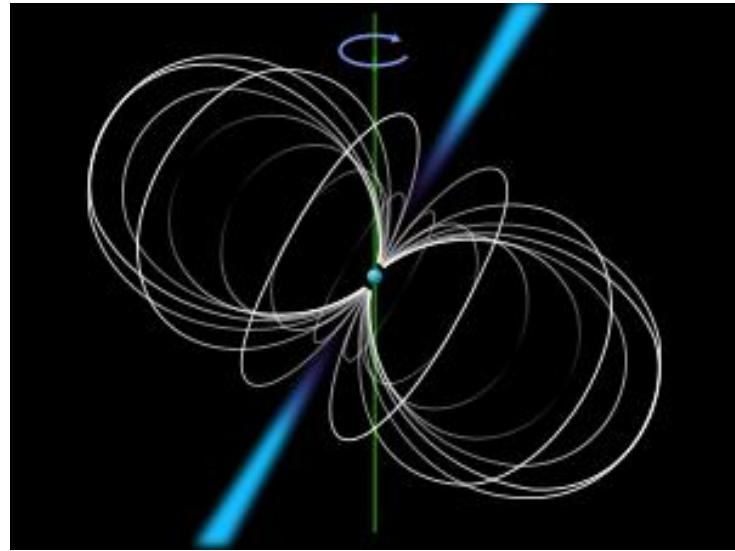
1934. godine W.Baade i Zwicky F. su sugerisali da bi zvezde mogle da završe svoj život kao neutronske zvezde (Izvor: <https://doi.org/10.1073/pnas.20.5.254>). Ova hipoteza je uvedena u nastojanju da se objasni oslobođanje ogromne količine energije eksplozijama supernove. Oni su predložili postojanje zvezda i jezgara sa prosečnom gustinom nuklearne materije. Bilo je potrebno više od 30 godina da se potvrди postojanje ovih objekata u Univerzumu. Prvi objekat (za koji se kasnije ispostavilo da je brzo rotirajuća visoko magnetizovana neutronska zvezda) – CP 1919 otkrili su Jocelyn Bell i Antony Hewish na Kembriđu 1976. godine. Period pulsa od 1.3373 s bio je mnogo kraći od vremenske skale na kojoj normalne zvezde mogu da variraju, uz to je i impuls bio izuzetno redovan. Ovaj objekat je sada poznat kao PSR B1919+21

Dakle, pulsari predstavljaju brzo rotirajuće neutronske zvezde sa jakim magnetnim poljima i nalaze se u početnim fazama svoje evolucije kao neutronske zvezde. Što se tiče zračenja pulsara, imamo proces koji se objašnjava kao snop zračenja koji zrači pri svakoj rotaciji, kada je usmerena prema Sunčevom sistemu. Takođe je važno napomenuti da postoje mnoge neutronske zvezde koje mi ne vidimo kao pulsare, jer se njihova osa rotacije ni u jednom trenutku se ne nadje u našem pravcu.

Izvor energije ovog zračenja je rotaciona energija pulsara, gde se elektroni usled jakog magnetnog polja kreću spiralno u odnosu na linije sile polja i dobijaju enormne brzine, brzine

⁶ Antizvezde su zvezde koje proizvode pozitrone i antiprotonе.

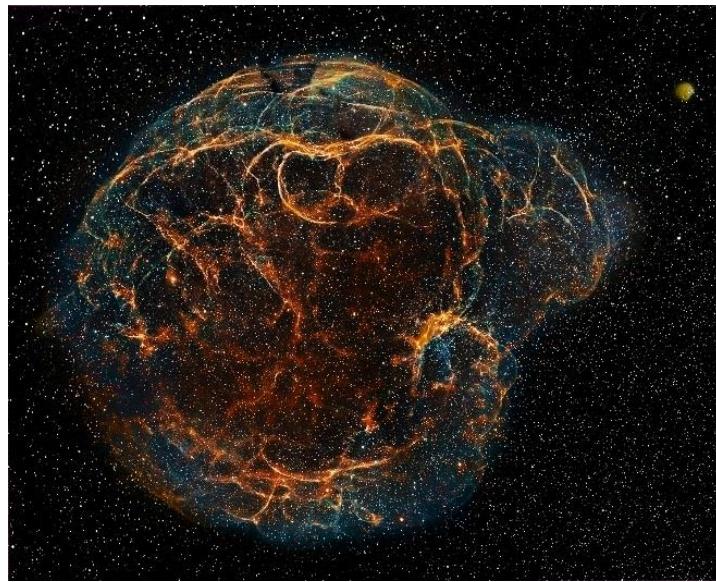
koje su slične brzini svetlosti. Usled tako velikih brzina, elektron oslobodi foton X ili γ zraka na osnovu svoje kinetičke energije, i ovo zračenje je poznatije kao sinhrotronsko zračenje.



Slika 3. Ilustracija pulsara

2.2.1.2. Supernova

Pojam supernova, je jedna složena pojava koja nastaje eksplozijom zvezde. U određenim procesima fuzije, u kojima nastaju slojevi goriva okružuju jezgro, i to gorivo je proizvod određenih faza evolucije zvezde. U nekom trenutku dolazi do intezivnog i ubrzanih sagorevanja tog goriva kao posledica sažimanja, čime se povećava pritisak u samoj zvezdi, i samim tim dolazi i do odbacivanje spoljašnjih slojeva u prostor izvan zvezde. Usled jake eksplozije supernove, dolazi do odbacivanja omotača pri velikim brzinama, i ono sto možemo da vidimo nakon eksplozije jeste velika količina gasa i ostatak jezgra zvezde, koji je obično ili crna rupa ili neutronska zvezda .



Slika 4. Ostaci supernove Simeis 147

Odbačeni omotač, koji se sastoji od gasa, prašine i ostataka zvezde koji je eksplodirao, sad može da se vidi nekoliko desetina hiljada godina. Dok se stariji ostaci supernovih vide kao vlakna koja obrazuju svetle prstenove. Naravno, ovi stariji ostaci su uglavnom izvori više vrsta zračenja a samim tim i gama zračenja.

2.2.2. Vangalaktički model

2.2.2.1. Aktivna galaktička jezgra

Aktivna galaktička jezgra (AGJ) predstavljaju područje u blizini supermasivne crne rupe, okruženo gasom. Centralna oblast galaksije u kojoj se stvara značajna količina energije u procesima koji nisu karakteristični za normalne zvezde. To je mali region u centru galaksije koji emituje ogromnu količinu energije i može imati i kontinualni i linijski spektar emisije u optičkom i ultraljubičastom delu, može biti i infracrveni, radio izvor ili izvor X ili gama zračenja kao i izvor akreacionih udarnih talasa. U optičkom i ultraljubičastom delu spektra prisutne su emisione i nekad apsorpcione linije čiji ukupan fluks i širine linija ukuazuju na to da su procesi u tim oblastima izrazito dinamični.

Posmatranjem AGJ u svim frekventnim domenima, u većini slučajeva vidimo kao tačkasti izvor, dok u radio talasa pokazalo se da AGJ imaju promenljivu strukturu, tj. tzv. mlazevi materije, koji izlaze iz jezgra i dostižu rastojanja od nekoliko megaparseka imajući uz to brzine i do 10 brzina svetlosti.

Astrofizičari su mišljenja da ova posmatrana energija kojom zrači AGJ dolazi iz akrecije materije u super masivnu crnu rupu koja ima masu nekoliko miliona ili pak milijardu puta veću od mase Sunca. Da bismo saznali osnovne osobine ovih objekata moramo da razumemo fiziku i zakone u blizini crne rupe tj. fiziku u jakom gravitacionom polju.

U galaksije sa aktivnim jezgrima spadaju, dakle:

- ❖ Radio glasna AGN
 - ❖ Radio galaksije;
 - ❖ Kvazari;
 - ❖ Blazari;
- ❖ Radio tiha AGN
 - ❖ Sejfert galaksije;
 - ❖ Slabojonizovanu emisonu oblast jezgra (LINERs);
 - ❖ Kvazizvezdani objekat (QSOs);

2.2.2.1.1. Radio glasna AGN

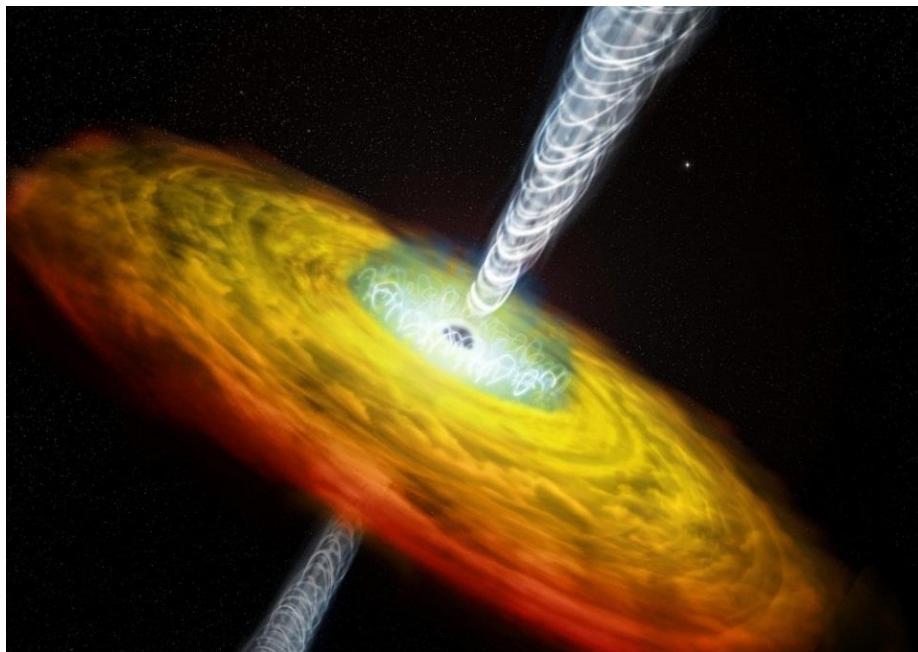
Radio galaksije su neobično moćni emiteri radio talasa. Izlazni signal radio galaksije može biti do $10^{38} W$, tj. nalazi se na intervalu između 10 MHz i 100 GHz što je milion puta više od normalne galaksije kao što je ova naša. Za sve ovo prethodno navedeno je zahvalno sinhrotronno kretanje čestica u džetovima. Često ove galaksije nisu toliko ni svetle u vidljivom delu spektra. Radio galaksije imaju kompaktno radio jezgro koje se poklapa sa (jezgrom) središnjim delom vidljive galaksije, par međusobno suprotnih mlazeva koji dolaze iz jezgra i par krila daleko izvan vidljivih granica galaksije.

Ovakva galaksija je skoro uvek džinovska eliptična i koja može biti rezultat sudara ili spajanja dve ili više manjih galaksija. Postoji nekoliko razloga zbog čega se radio džetovi javljaju najčešće kod eliptičkih galaksija. Smatra se da je jedan od bitnijih razloga to što radio galaksije imaju najveće crne rupe u središtu pa mogu da proizvode najluminozniye džetove i tako prenose energiju prema krilima. Neke od poznatijih radio galaksija su Kentaur (Centaurus) A, Labud (Cygnus) A, Devica (Virgo) A.



Slika 5. Radio galaksija Kentaur (Centaurus) A

Kvazari kao najpoznatija vrsta AGJ, obično su 1000 puta sjajniji od naše galaksije, koji emituju netermalno zračenje i imaju izrazito široke emisione linije. Otkrio ih je 1963. godine holandsko-američki astronomom Marten Šmit (Maarten Schmidt 1929-). Kvazari su objekti sa jakim crvenim pomakom koji liči na zvezdu, ali je to u stvari veoma sjajno aktivno jezgro veoma udaljene galaksije. Ime je skraćenica od *kvazizvezdani*, zbog toga što imaju izgled koji podseća na zvezdu. Prvi otkriveni kvazari bili su veoma jaki radio izvori (QSSs), ali su sada poznati i mnogi koji su relativno mirni u radio domenu (QSOs)



Slika 6. Ilustracija Kvazara

Na rastojanju koje je dobijeno iz crvenog pomaka, jezgro mora da bude bar 100 puta svetlijeg nego cela normalna galaksija. Ipak, neki kvazari menjaju sjaj na vremenskoj skali nedelja. Prema tome, izvor može biti akrecioni disk oko crne rupe veličine 10^7 ili 10^8 mase Sunca. Prvi kvazar koji je kao takav otkriven bio je radio izvor 3C 273 sa crvenim pomakom od $z = 0.158$, i on ostaje kao optički najsjajniji kvazar koji je uočen sa Zemlje. Od 1963. godine, kada je pronađen 3C 273, pronađeno je na hiljade kvazara. Mnogi od njih su sa velikim crvenim pomakom, što znači da ih vidimo gde su bili kada je svemir bio samo deseti deo svoje starosti.

Blazari. Većina otkrivenih vangalaktičkih izvora zračenja pripadaju klasi blazara. Blazari su jako aktivna galaktička jezgra čiji je pravac džetova usmeren prema posmatraču. Danas AGN su podjeljena prema šemi Urry & Padovani-ja. Naime njihova šema se sastoji iz tri glavna faktora selekcije aktivnih galaktičkih jezgara i to: *ugao gledanja, optički spektar i radio emisija*. Oni su takođe predložili i četvrti faktor, tzv. *rotaciju crne rupe*, gde bi ta rotacija bila veća sa jačim udarnim talasom džetova.



Slika 7. Ilustracija Blazara

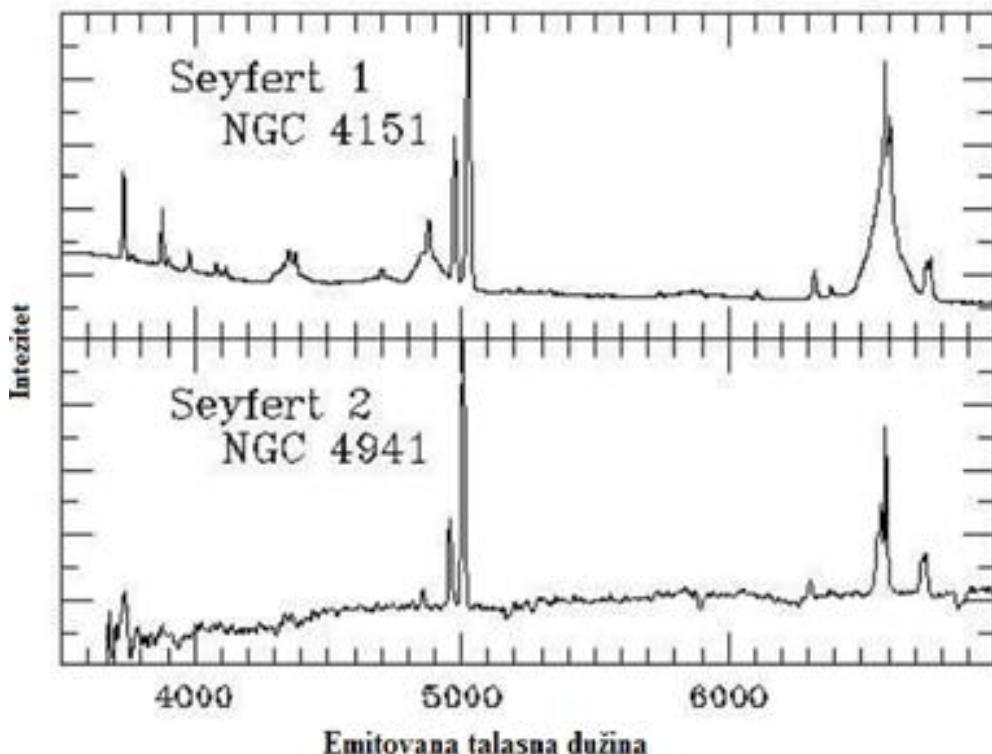
Blazari se dele

- ⊕ Radio kvazari ravnog spektra – koji pokazuju jake, široke emisione linije u svom optičkom spektru, slično kao radio kvazari (optički naglo promenljivi).
- ⊕ Objekti BL Lacertae – koji se karakterišu optičkim spektrom koji ponekad pokazuje slabe emisione linije, a u nekim slučajevima te linije mogu biti beskrajne.

Radio kvazari ravnog spektra zrače energijama između MeV - GeV , dok Objekti BL Lacertae zrače energijama i do TeV.

2.2.2.1.2. Radio tiha AGN

Sejfert galaksije predstavljaju jedan od posebnih tipova AGN. Otkrio ih je Karl Sejfert (Carl K. Seyfert) 1943. godine. On je otkrio da postoje neke spiralne galaksije koje imaju ekstremno sjajno jezgro i izuzetno jake emisione linije. Ove galaksije se dele u dve kategorije i to galaksije tipa *Sejfert 1* i *Sejfert 2*. Kod galaksija tipa Sejfert 1, spektar sadrži široke i uske linije. Kod širokih linija imamo dozvoljene prelaze kao što su linije vodonika i helijuma, dok kod uskih linija imamo kombinaciju zabranjenih (npr. [O III]) i dozvoljenih prelaza linija vodoinika. Kod galaksija tipa Sejfert 2, spektar sadrži samo uske linije zabranjenih i dizvoljenih prelaza. Razlika između ova dva tipa galaksija je verovatno u tome po kojim se uglom posmatraju. Ako se posmatraju pod malim uglom uočava se Sejfert 1 a ako je ugao veći uočava se Sejfert 2. Osim toga, razlikuju se i kod zračenja u X-domenu. Galaksije tipa Sejfert 1 mnogo više zrači u X-domenu za razliku od galaksija tipa Sejfert 2.



Slika 8. Optički deo spektra galaksije tipa Sejfert 1 NGC 4151 i Sejfert 2 NGC 4941

Današnjim detektovanjem Sejfertovih galaksija, uočeno je da su slabi radio izvori i obično se nalaze u društvu drugih galaksija sa kojima su najverovatnije u gravitacionoj interakciji. Pored prethodne podele, javila se potreba da se uspostavi nekoliko podgrupa i to njih 6. Sejfert 1.0, Sejfert 1.2, Sejfert 1.5, Sejfert 1.8, Sejfert 1.9 i Sejfert 2.0. Razlog za to je što postoje male razlike u udelu uske i široke komponente vodonikovih linija.

Slabojonizovana emisona oblast jezgra (LINERs): Jezgro galaksije koje pokazuje karakterističan emisioni-linijski spektar. Linearnim spektrom dominiraju emisione linije niskojonizujućeg stanja kao što je to slučaj sa OII, NII SII ili linije viših jonizujućih stanja kao npr. OIII, NeIII, HeIII. Spektar ocrtava neobičnu aktivnost jezgra, što verovatno ne važi za normalne zvezde, i može poticati od zagrevanja međuzvezdane materije ili od zračenja iz centralnog izvora ili od udarnog talasa koji nastaje eksplozijom supernove. Poluširine su slične onima viđenim u sejfertovskim galaksijama.

2.3. Sekundarno kosmičko zračenje

2.3.1. Elementarne čestice

Pre pola veka, prikaz subatomske strukture čestica mogao se završiti sa nukleonima. Ali ipak, sada je poznat i treći sloj strukture, tj. veruje se da se protoni i neutroni sastoje od čestica bez strukture poznatiji kao kvarkovi. Do sada smo se u ovom radu upoznali sa nekoliko vrsta subatomskih čestica i to: elektroni, protoni i neutroni zajedno sa njihovim antičesticama u nekim slučajevima. Tokom poslednjih 50 godina, brojni eksperimenti su otkrili da postoje i druge subatomske čestice i da su prethodno pomenute čestice samo zajednički predstavnici dve različite klase poznatije kao leptoni⁷ i kvarkovi⁸

Veruje se da elektroni (e^-) i elektronski neutrino (ν_e) zajedno sa svojim antičesticama predstavljaju tzv. osnovne čestice. Pod osnovnim se podrazumeva da ne postoji dokaz da se sastoje od manjih ili jednostavnijih elemenata. 1936. i 1975. pojavljuju se još dve čestice mion⁹ (μ^-) i tau¹⁰ (τ^-) redom. Mioni i tau su nestabilne čestice i brzo se raspadaju u svoje manje masivne elektrone, u deliću sekunde. Poput elektrona, mion i tau imaju pridruženi neutrino i to: mion ima *mion neutrino* (ν_μ), tau ima *tau neutrino* (ν_τ).

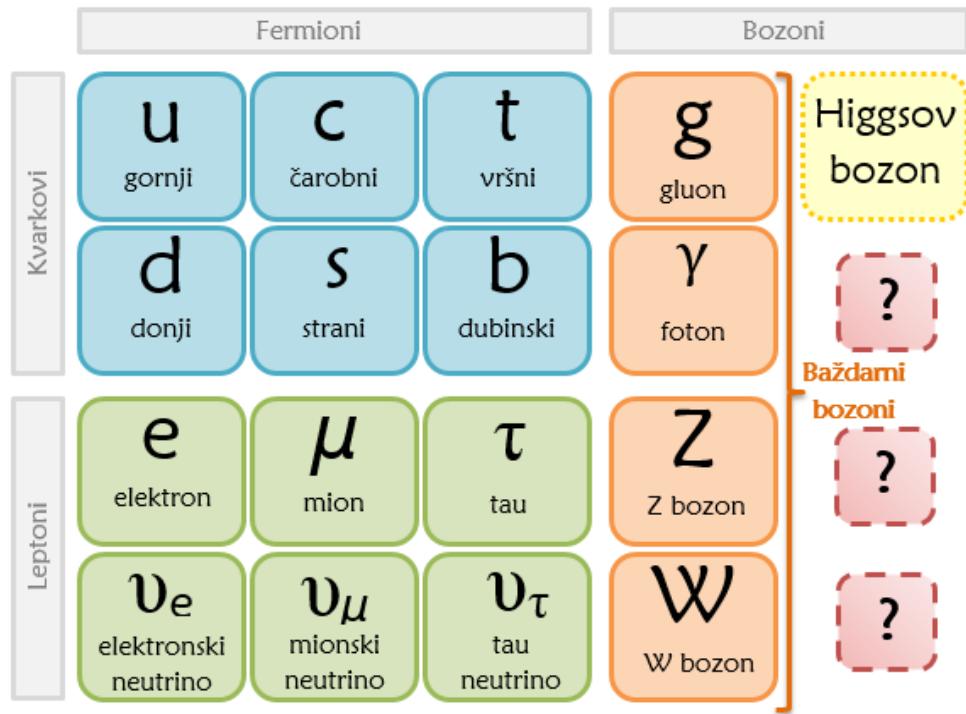
Teorija elementarnih čestica koja je nastala u drugoj polovini XX veka naziva se *standardni model*. Možemo slobodno da kažemo da je ovaj model u stvari precizna matematička teorija elementarnih čestica, gde se matematička predviđanja uglavnom poklapaju sa rezultatima mnogobrojnih eksperimenata.

⁷ Leptoni su elementarne čestice koje ne prave druge složene čestice ali učestvuju u važnim fizičkim procesima.

⁸ Kvarkovi su fundamentalne čestice. Imaju nanelektrisanje ko je ili +2/3 ili -1/3 nanelektrisanje elektrona i kombinuju se da bi napravili elementarnu česticu.

⁹ Mion je još jedna elementarna čestica koja ima isto nanelektrisanje i spin kao elektron samo mu je masa 207 puta veća. Nastaju raspadom piona.

¹⁰ Tau je takođe elementarna čestica koja je negativno nanelektrisana. Tau je vrsta leptona i masa mu je oko 3500 puta veća od mase elektrona.



Slika 9. Podela elementarnih čestica prema standardnom modelu

Dakle, standardni model fizike čestica je teorija koja opisuje delovanje tri od četiri poznate fundamentalne sile : elektromagnetnu, slabu nuklearnu i jaku nuklearnu, dok izostavlja gravitaciju. Model uspesno objašnjava način na koji se ovih 16 elementarnih čestica (slika 9.) vezuju zajedno u atome i molekule i tako formiraju materiju. Kao što se vidi na slici (9), skup od 16 čestica se klasificuju u dve grupe i to fermione (činioce materije) i bozone (prenosioci interakcije među česticama materije).

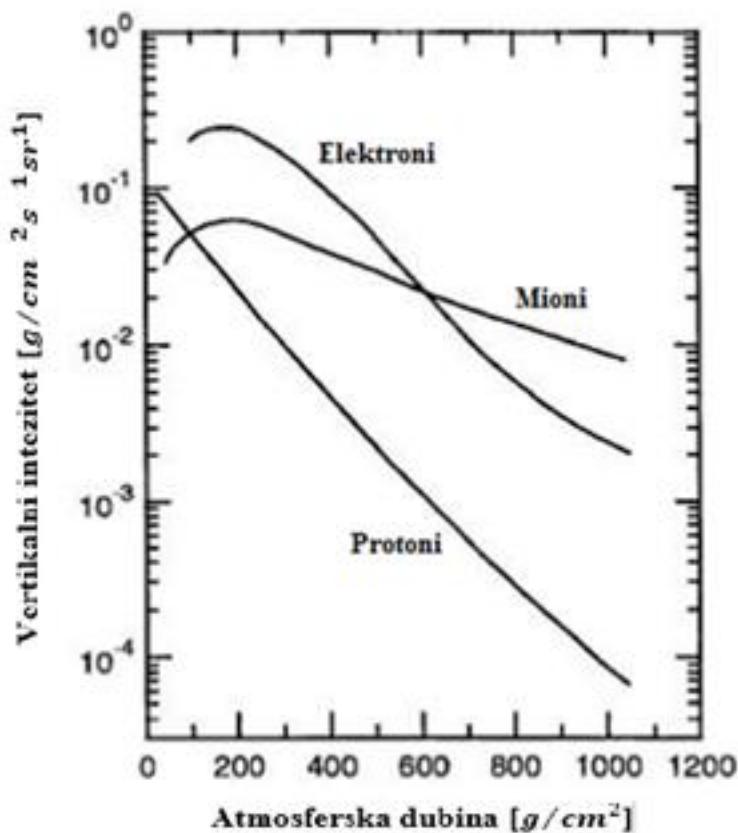
2.3.2. Kosmičko zračenje u atmosferi i na površini Zemlje.

Zračenje koje nastaje interakcijom primarnog kosmičkog zračenja sa međuzvezdanim gasom ili u zemljinoj atmosferi zovemo sekundarnim kosmičkim zračenjem. Kada primarno kosmičko zračenje prođe kroz Zemljinu atmosferu ono interaguje sa jezgrima atoma vazduha u gornjim slojevima atmosfere i dolazi do veoma burnih nuklearnih reakcija pri čemu se stvaraju čestice kao što su pioni¹¹, kaoni, mezoni¹², hadroni i slični. Kao što sam ranije pomenuo novonastalo sekundarno kosmičko zračenje i dalje stupa u reakcije i samim tim se stvaraju nove generacije čestica. Čestice sekundarnog kosmičkog zračenja se mogu podeliti u tri kategorije (kao što se vidi na slici (14) u zavisnosti od načina interakcije i to:

¹¹ Pioni su nestabilne elementarne čestice koje postoje u tri oblika: neutralna, pozitivno i negativno nanelektrisani, Nanelektrisanje im je jednako nanelektrisanju elektrona. Poznatiji je kao π mezon.

¹² Mezoni su takođe elementarne čestice i uključeni su u procese koji održavaju atomska jezgra na okupu.

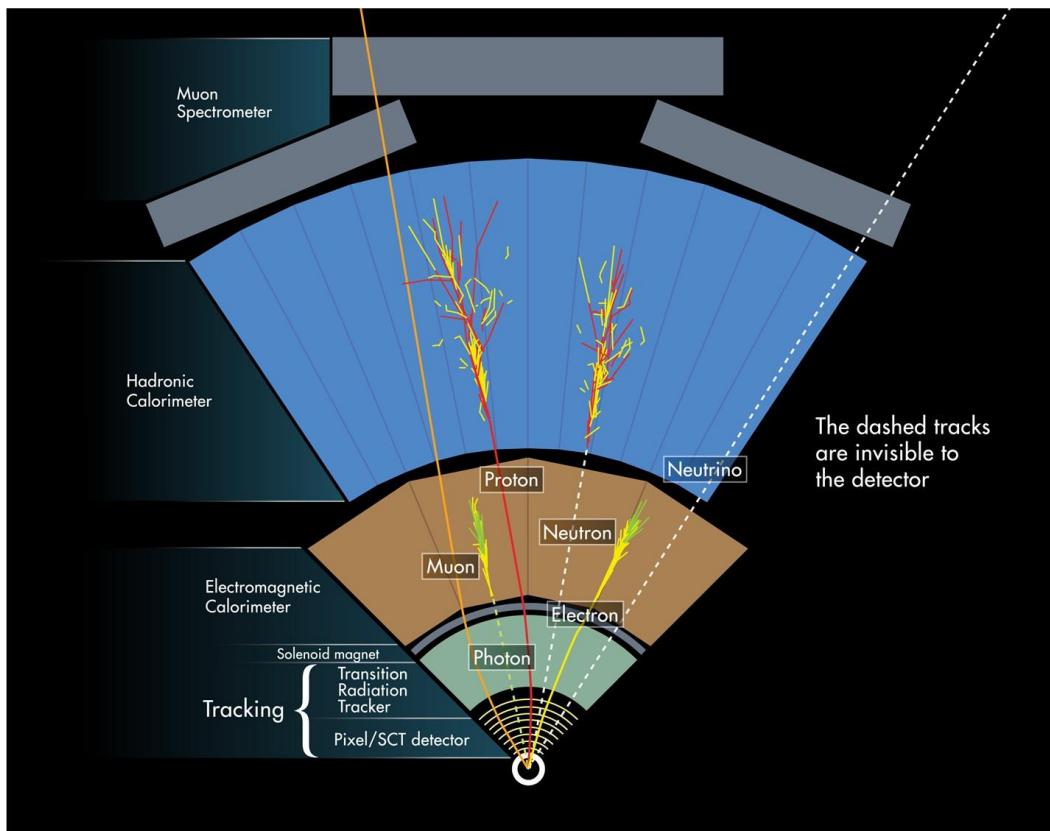
- Nuklearno aktivna;
- Tvrda (mionska) komponenta;
- Meka (elektromagnetna) komponenta;



Slika 10. Vertikalni intezitet komponenti sekundarnog kosmičkog zračenja u funkciji od atmosferske dubine

Nuklearno aktivnu kategoriju sačinjavaju hadroni. Proton je taj koji najčešće incira kaskade novih čestica putem jake interakcije sa jezgrima atmosfere pri čemu se intezivno stvaraju π mezoni kao i kaoni ali u izuzetno malom udelu, i to manje od 20% od ukupnog broja stvorenih čestica. Interakcijom protona sa jezgrima atmosfere, proton gubi jedan deo svoje energije, sve dok ne dodje do nivoa od 100MeV posle kojeg proton više ne interaguje već svoju energiju gubi postepeno u procesu jonizacije. Takođe je bitno napomenuti da nanelektrisani π mezoni mogu da stvaraju nove hadrone pre raspada na mione i neutrine što karakteriše ceo ovaj proces nuklearno aktivnom komponentom sekundarnog kosmičkog zračenja.

Tvrda (mionska) komponenta je nastala na osnovu karakteristične prodornosti sekundarnog kosmičkog zračenja. Ovu kategoriju sačinjavaju visokoenergetski mioni nastali raspadom nanelektrisanih piona. Mioni uglavnom gube energiju putem jonizacije dok se ne raspadnu na elektron ili pozitron. Slaba interakcija miona je uslovljena velikom brzinom, tj. brzina kretanja miona je približna brzini svetlosti što karakteriše prethodno pomenutu prodornost sekundarnog kosmičkog zračenja.



Slika 11. Simulacija nastajanja i detekcije elementarnih čestica sekundarnog kosmičkog zračenja. Na dnu slike je tačka interakcije. Čestice nastale pri sudaru kreću se prema gore od tačke interakcije. S' leva na desno vidimo mione koji prodiru u ceo detektor, zatim foton, koji ne pravi trag, ali je vidljiv u elektromagnetnom kalorimetru. Vidljivi su i protoni i neutroni u hadronskom kalorimetru. Na kraju vidimo i elektrone. Konačno, vidimo i trag neutrina, koji uopšte ne daju nikakav signal.

Meka (elektromagnetska) komponenta je sastavljena od elektrona, pozitrona i fotona. Većina čestica koje čine ovu kategoriju nastale su i njihov broj je rastao u visokim slojevima atmosfere gde je došlo do prve interakcije pa sve do nivoa zemlje. Niskoenergetski elektroni se nalaze na niskim nadmorskim visinama i uglavnom nastaju raspadom miona. Mioni su čestice od kojih dobijamo najviše informacija o visokoenergetskim procesima u atmosferi, kao i informacije o spektru i komponentama primarnog kosmičkog zračenja.

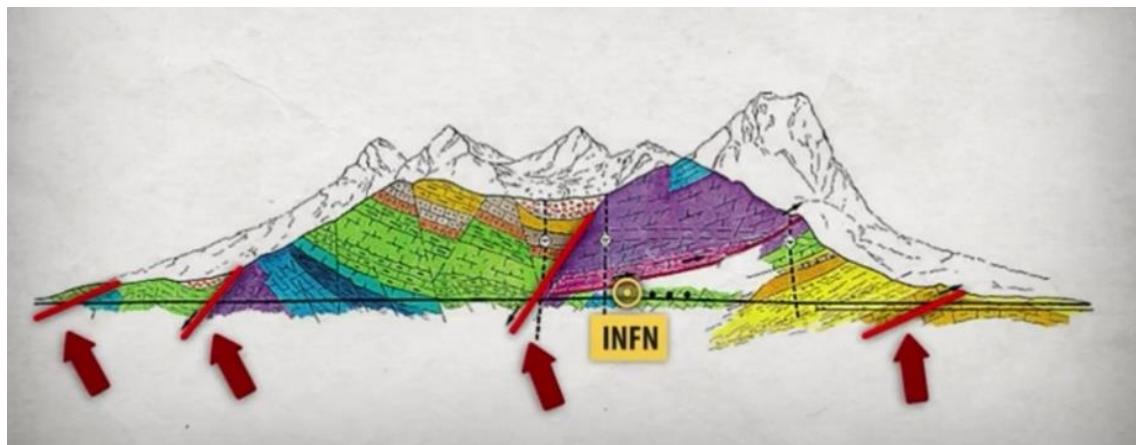
2.3.3. Kosmičko zračenje ispod površine Zemlje

Za razliku od čestica primarnog kosmičkog zračenja koje skoro nikad ne dospeju ispod površine Zemlje, čestice sekundarnog kosmičkog zračenja to uspešno rade. U tu grupu čestica posebno se izdvajaju mioni i neutrini. Zbog malog efikasnog preseka za interakciju neutrini prodiru duboko ispod površine Zemlje. Takođe i mioni to rade, ali zbog toga što imaju velike energije koje se kreću iznad 500 GeV. Interesantno je da neutrini sa manjim energijama prolaze bez problema kroz celu Zemlju i bez ikakve interakcije, dok neutrini sa većom energijom pri prolasku kroz Zemlju interaguju sa materijom. Zbog ovakvih karakteristika detekcija neutrina je veoma zahtevna i teška.

Sa druge strane, mioni pri prolasku kroz Zemlju interaguju na malo drugačiji način nego kao pri prolasku kroz atmosferu. Kretanjem kroz slojeve Zemlje mioni pored jonizacije gube energiju i procesima kao što su: zakočno zračenje, fotonuklearne interakcije kao i stvaranje parova nanelektrisanih čestica. Stvaranje parova nanelektrisanih čestica je proces gde mion emituje virtualni foton koji proizvede par elektron-pozitron. Visokoenergetski mioni nastaju raspadom visokoenergetskih mezona. Spektar ovih miona sadrži informacije o veličini i obliku fluksa primarnog kosmičkog zračenja.

Broj inovacija, informacija i novih otkrića se uvećao od kako su počeli da se vrše eksperimenti u podzemnim rudnicima sada već posebne izgrađene laboratorije. Naime, za mnoge eksperimente mioni predstavljaju tzv. šum koji nam kvari rezultate. Zato su se pojavile podzemne laboratorije kako bi se taj šum što više neutralisao, ili u idealnom slučaju u potpunostio zaustavio. U ovom radu će biti reči i obrade podataka merenja jedne takve laboratorije a reč je o **LNGS (INFN) Nacionalna laboratorijska Gran Sasso**.

Na kraju, postoji još jedna komplikacija koja se tiče merenja fluksa miona a to je da moramo odlično da znamo gubitke energije miona kroz slojeve stena kao i debljinu i sastav stena koje se nalaze iznad detektora.



Slika 12. Pozicija LNGS (INFN) – Nacionalna laboratorijska Gran Sasso

3. Mioni

Jedan od proizvoda prolaska primarnog kosmičkog zračenja kroz atmosferu jeste kaskadni pljusak prikazan na slici (14). U tim pljuskovima mioni se obilno proizvode i time doprinose sa oko 10% ukupnog fluksa svih čestica koje detektujemo na Zemlji.. Mioni su proizvodi raspadanja raznih nestabilnih sekundarnih čestica poput piona, kaona, mezona i drugih. Kada je u pitanju pion, on se raspada na pozitivan ili negativan mion i neutrino na sledeći način

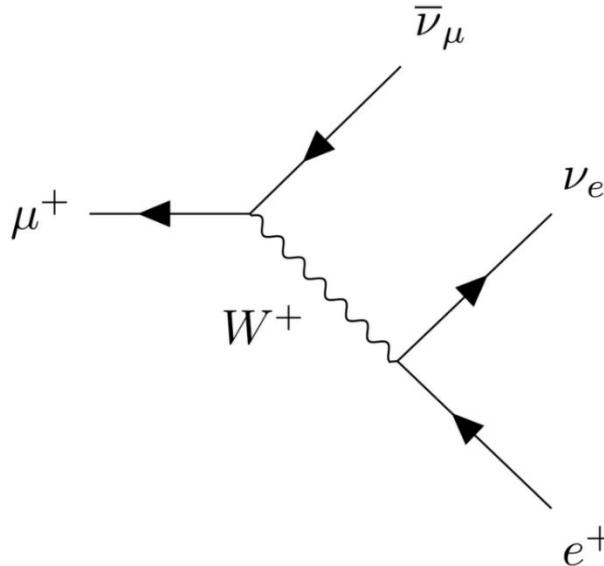
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (2)$$

Kako su mioni takođe nestabilne čestice, raspadaju se na pozitrone (elektrone), neutrine i antineutrine što se može videti na slici (13). Raspadi miona su najprostiji mogući i nazivaju se Michel-ovi raspadi. Raspad miona spada u grupu leptonskih slabih raspada tj. sve čestice koje učestvuju u tom procesu su leptoni.

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (3)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (4)$$

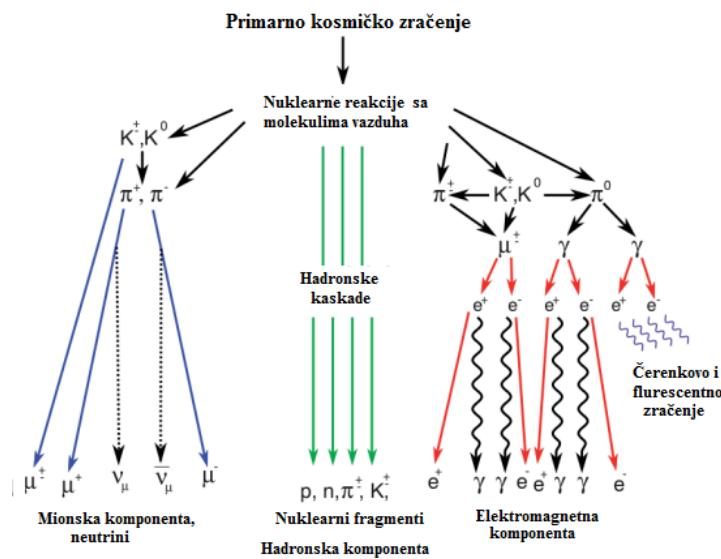


Slika 13. Fejnmanov dijagram najverovatnijeg raspada miona

Dalje, elektroni ulaze u sastav elektromagnetne komponente a neutrini prolaze uglavnom bez ikakve interakcije kroz atmosferu i na kraju kroz celu Zemlju. Dalje, neutrini i antineutrini u elastičnim sudarima stvaraju druge čestice:

$$\nu_\mu + n \rightarrow p + \mu^- ; \bar{\nu}_\mu + p \rightarrow n + \mu^+ \quad (5)$$

$$\nu_e + n \rightarrow p + e^- ; \bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+ \quad (6)$$



Slika 14. Komponente kosmičkog zračenja

Kada su u pitanju kaoni, tu je situacija malo drugačija od raspada piona. Naime, nanelektrisani i neutralni kaoni imaju nekoliko kanala raspada i to:

$$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu ; K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (7)$$

$$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0; K^- \rightarrow \pi^- + \pi^0 \quad (8)$$

$$K_s^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- ; K_s^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^0 \quad (9)$$

Osnovne karakteristike miona date su u sledećoj tabeli:

Tabela 1. Osnovne karakteristike miona

Oznaka	μ
Masa	$105.658367(4) \text{ MeV}/c^2$
Nanelektrisanje	$-e$
Spin	$1/2$
Vreme života	$2.197034(21) \times 10^{-6} \text{ s}$

Na kraju, mioni mogu da formiraju tzv. *mionski atom*, to je slučaj kada se jedan od elektrona zameni mionom u atomu. Zbog mnogo veće mase miona u odnosu na elektron imamo situaciju da je recimo mionski vodonik mnogo manji. Takođe, antimioni sa elektronom formiraju tzv. *mionium*. To je atom u kojem ulogu jezgra igra antimion. Taj kratkoživeći atom se ponaša kao vodonik, i uglavnom se koristi za proučavanje elektromagnetne interakcije.

3.1. Fluks miona

Merjenje fluksa miona jedna je od prvih stvari koje bi svaki profesor fizike u srednjoj školi trebalo da eksperimentalno prikaže učenicima. Kada govorimo o fluksu, treba da znamo da se fluks definiše kao protok objekata, u našem slučaju miona, kroz jedinicu površine u određenom vremenskom intervalu. Određivanje fluksa miona bi u prevodu značilo da treba da znamo u svakom trenutku koliko miona prođe pored nas. Određivanje fluksa miona je od posebnog značaja kada smo u potrazi za nekim ekstremno visokoenergetskim mionima ili ekstremno niskoenergetskim mionima, jer nam oni često govore da se neki poseban događaj desio.

Raspodela čestica kosmičkog zračenja po energijama prati stepeni zakon E^{-n} . Raspodela piona i miona takođe prate isti zakon koji je malo izmenjen u regijama niskih energija. Vertikalni fluks kao funkcija energije može da se predstavi na sledeći način:

$$I(E, \theta = 0) = \Phi_0 N (E_0 + E)^{-n} \quad (10)$$

Gde je Φ_0 vertikalni fluks miona za $\theta = 0$, integralni fluks preko svih energija, što daje normalizaciju $N = (n - 1)(E_0 + E_c)^{(n-1)}$, gde je E_c donja granična vrednost. Ovde smo dodali parametar E_0 koji objašnjava gubitak energije kako zbog hadronske tako i zbog elektromagnetne interakcije sa jezgrima atoma vazduha u gornjim slojevima atmosfere. Mi možemo da uvedemo još jedan parametar ϵ koji menja snagu u oblasti visokih energija i to bi trebalo da uzme u obzir konačno vreme života piona i kaona. Sa parametrom ϵ , jednačina (9) bi izgledala ovako:

$$I(E, \theta = 0) = \Phi_0 N (E_0 + E)^{-n} \left(1 + \frac{E}{\epsilon}\right)^{-1} \quad (11)$$

Obe jednačine (10) i (11) prepostavljaju da je gubitak energije E_0 nezavisan od energije čestice. Pri niskim energijama, gubitak energije varira kao $1/E$ pa je dobro da se doda još jedan parametar E_1 , i sad imamo:

$$I(E) = \Phi_0 N (E_0 + E_1/E + E)^{-n} \left(1 + \frac{E}{\epsilon}\right)^{-1} \quad (12)$$

U jednačini (12) normalaciona konstanta N može da se dobije numerički. Međutim, nećemo koristiti ovu jednačinu za analizu predstavljenu u ovom radu.

Što se fluksa miona tiče, možemo da kažemo da vrlo malo zavisi od azimutnog¹³ ugla, ali zato jako puno zavisi od zenitnog¹⁴ ugla koji je određen kao ugao koji stvara upadni zrak sa vertikalnim pravcem u toj tački. Kao što se vidi na slici (15), možemo dobiti nagnuto rastojanje S preko vertikalnog rastojanja d, zenitnog ugla θ i zemljinog poluprečnika R i to (sinusna teorema za ΔOBC):

$$\frac{\sin \phi}{R} = \frac{\sin(\theta-\phi)}{S} = \frac{\sin(180-\theta)}{R+d} \quad (13)$$

Odnos između uglova ϕ i θ je dat sledećom formulom:

$$\sin \phi = \frac{R}{R+d} \sin \theta \quad (14)$$

A dužina puta S u nagnutom pravcu je:

$$S = \frac{\sin(\phi-\theta)}{\sin \theta} (R + d) \quad (15)$$

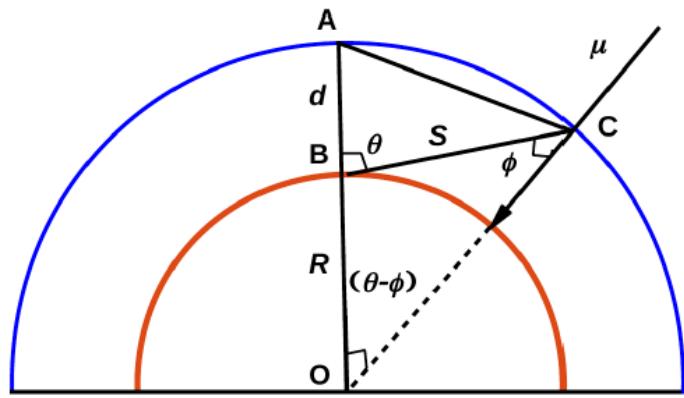
Koristeći jednačine (14) i (15) odnos pređenog puta miona kad dolaze iz nekog pravca u odnosu na vertikalni pravac dobija se na sledeći način:

$$D(\theta) = \frac{S}{d} = \sqrt{\left(\frac{R^2}{d^2} \cos^2 \theta + 2 \frac{R}{d} + 1\right)} - \frac{R}{d} \cos \theta \quad (16)$$

Jednačina (16) predstavlja odnos dužine puta S u nagnutom pravcu i vertikalnog rastojanja d u zakrivenoj zemljinoj atmosferi i zamena je za *Chapman-ovu* funkciju (Chapman, 1931.) data u prvom poglavlju knjige Peter K.F. Grieder [15].

¹³ Azimut je pravac ka nebeskom telu izražen u stepenima, u pravcu kazaljke na satu od severa oko horizontal posmatrača. Primera radi ako je telo usmereno prema severu, azimut iznosi 0° , prema istoku 90° .

¹⁴ Zenit je tačka na nebeskoj sferi direktno iznad posmatrača. Linija ka zenitu je normalna na ravan horizonta.



Slika 15. Odnos između vertikalne putanje „d“ i putanje nagnute prema zenitnom uglu θ . R je radius Zemlje.

Diferencijalni fluks u zavisnosti od pravca se dobija na sledeći način:

$$I = \frac{dN}{dEdSd\Omega dt} \quad (17)$$

gde je dN broj čestica po energiji dE , po površini dS , po uglu $d\Omega$ i po vremenu dt . Odnosno, možemo da definišemo i fluks iz vertikalnog pravca ($\theta = 0$) i fluks iz bilo kog drugog pravca:

Iz jednačine (11) imamo:

$$\frac{\Phi(\theta)}{\Phi(\theta=0)} = \frac{N \int_0^\infty (E_0 + E_\theta + E)^{-n} dE}{N \int_0^\infty (E_0 + E)^{-n} dE} = \left(\frac{E_0 + E_\theta}{E_0} \right)^{-(n-1)} \quad (18)$$

gde je E_0 minimalna energija miona koji stižu do površine Zemlje kada padaju vertikalno tj. iz pravca zenita, a E_θ je dodatna koercija energije i sada imamo da je $E_0 + E_\theta$ veća energija koja je potrebna mionima da dođu do površine Zemlje jer samim tim prelaze duži put iz nagnutnog pravca. Možemo takođe da kažemo da se razlika u energiji praga za mione koji dolaze iz zenita i za mione koji dolaze iz nagnutog pravca u sastini se ponaša isto kao odnos predenog puta S i puta d, pa sledi jednačina:

$$D(\theta) = \frac{S}{d} = \frac{E_0 + E_\theta}{E_0} \quad (19)$$

$$\Phi(\theta) = \Phi_0 D(\theta)^{-(n-1)} \quad (20)$$

Jednačina (20) se koristi za simulacije raspodele miona u proračunima koji su trenutno prihvatljeni u merenjima koja dobijamo našim mionskim detektorima o kojima će biti više reči u sledećem poglavljju. Za to vreme bitno je pomenuti da ako se detektor nalazi na određenoj dubini, dolazi do apsorpcije mionskog fluksa (atenuacije) koja se izražava:

$$I = I_0 e^{-h\mu} \quad (21)$$

gde je μ koeficijent apsorpcije miona, i za Nacionalnu laboratoriju u Gran Sasso (LNGS) iznosi 3.2×10^{-3} .

Rezultat merenja fluksa miona su prikazani u sledećoj tabeli u zavisnosti od zenitnog ugla, nadmorske visine kao i energije.

Tabela 2. Parametri jednačine (10) dobijeni merenjem distribucije miona.

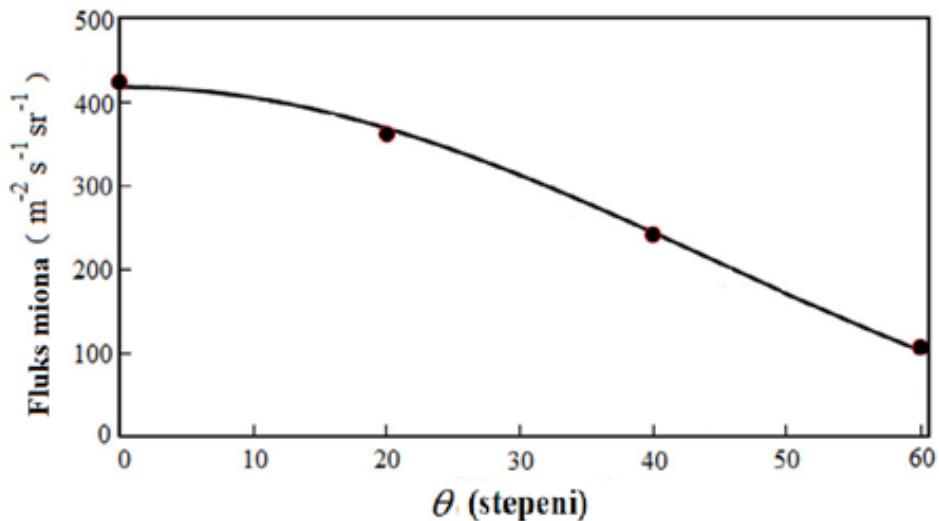
	$I_0(\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1})$	n	$E_0(\text{GeV})$	$1/\epsilon$ (GeV) $^{-1}$	χ^2/ndf	Reference podataka
μ na 0° nivo mora	70.7 ± 0.2	3.01 ± 0.01	4.29 ± 0.04	$1/854$	$128/63$	Tsukuba, Japan $(36.2^\circ N, 140.1^\circ W)$
$E > 0.5 \text{ GeV}$						
μ na 0° nivo mora	72.5 ± 0.2	3.06 ± 0.03	3.87 ± 0.07	$1/854$	$60.8/63$	Durham, UK $(54.76^\circ N, 1.57^\circ W)$
$E > 0.5 \text{ GeV}$						
μ na 0° na 600 m	98.8 ± 0.5	3.00 ± 0.08	3.6 ± 0.1	$1/854$	$60.4/18$	Prince Albert, Canada $(53.2^\circ N,$ $105.75^\circ W)$
$E > 0.5 \text{ GeV}$						
μ na 75° nivo mora	65.2 ± 1.5	3.00 ± 0.02	23.78 ± 0.3	$1/2000$	$48.3/25$	Hamburg, Germany $(53.56^\circ N, 10^\circ W)$
$E > 0.5 \text{ GeV}$						
Protoni	5000 ± 52	2.93 ± 0.01	1.42 ± 0.04	0.0	$96.3/86$	Antartik
$E > 0.5 \text{ GeV}$						
Helijum	863 ± 15	2.75 ± 0.02	0.28 ± 0.03	0.0	$20.7/67$	Antartik
$E > 0.5 \text{ GeV}$						

Mionski fluks na nivou mora je prilično poznata vrednost i iznosi približno $\Phi \approx 0.0167 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$, odnosno $\Phi \approx 167 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$. Ova vrednost se može koristiti kao brzi rezultat za pregled naših mionskih detektora. Neki od konkretnih rezultata dobijenih na raznim delovima naše Zemlje prikazani su u sledećoj tabeli

Tabela 3. Zavisnost fluksa u zavisnosti od upadnog ugla.

Ugao ($^\circ$)	Fluks miona ($\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$)
0	176 ± 1
15	168 ± 1
35	149 ± 2

Konačno, fluks miona ćemo predstaviti grafički u zavisnosti od zenitnog ugla.



Slika 16. Fluks miona u zavisnosti od zenitnog ugla

4. Detektori

Detektori o kojima ćemo mi ovde pričati su detektori koji detektuju ionizujuće zračenje. Jedna od bitnijih komponenti svakog detektora jeste radna zapremina gde se odigravaju interakcije zračenja sa materijom. Kada dođe do interakcije i odgovarajućeg signala mi možemo da dobijemo povratnu informaciju o tome koji je tip zračenja u pitanju, intezitet, fluks i dr. Svi detektori se mogu podeliti u nekoliko kategorija, jedna od podela je prema režimu rada, tj načinu detekcije, i to:

- Integralni – Mere ukupno zračenje;
- Diferencijalni – Specijalizovani za pojedinačne čestice;

Sa druge strane, detektori mogu da se dele prema tome kakav signal proizvode i to:

- Električni;
- Optički;

Takođe, detektore možemo da podelimo po mestu gde se nalaze i to:

- Detektori u orbiti.
- Detektori na Zemlji;
- Detektori pod ispod nivoa Zemlje;

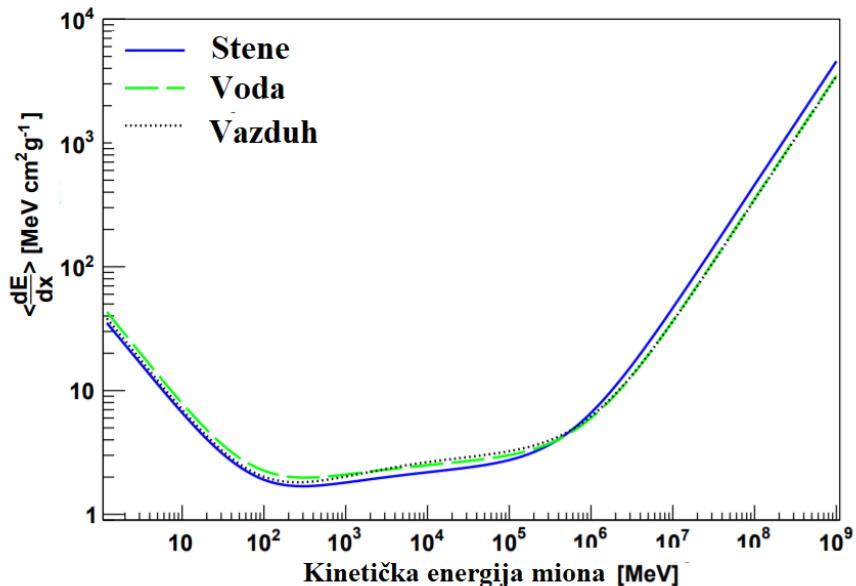
Na kraju, u zavisnosti od vrste čestice koju detektujemo i informacije koja je potrebna o tim česticama koristimo različite detektore:

- ⊕ **Naelektrisane čestice** : Gasni detektori, Scintilacioni detektori, poluprovodnički detektori, Čerenkovljevi detektori;
- ⊕ **Neutralne čestice**:
 - Fotoni : Scintilacioni detektori, Germanijumski poluprovodnički detektor;
 - Neutroni : Tečni scintilatori;
 - Neutrini : Čerenkovljev detektor;

Interakcija zračenja sa materijalom detektora proizvodi električni signal u detektoru koji se dalje registruje elektronikom. Scintilacioni detektori pripadaju grupi električnog tipa detektora gde se signal transformiše iz svetlosnog u električni signal. Detektori koji proizvode optičke signale su vizuelnog tipa. To su detektori koji nam daju informacije kao što su; pravac kretanja čestice, interakcije, raspad...

Kod bilo god od ovih detektora najbitnije karakteristike su mu: efikasnost, energetska rezolucija, vremenska rezolucija, osetljivost, masena ili električna rezolucija.

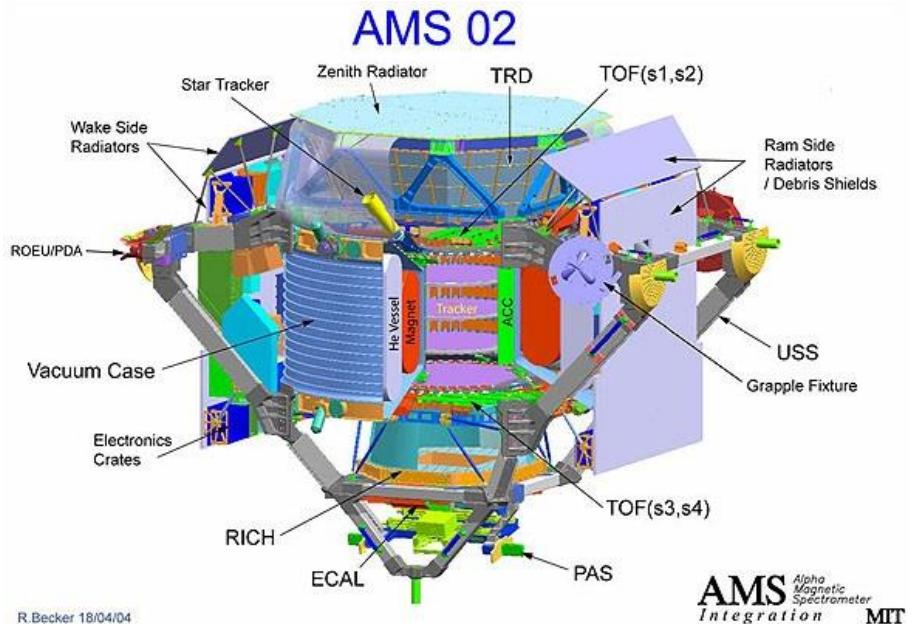
Duboko pod zemljom, detektori nemaju vremenska ograničenja detekcije kao što je to slučaj sa detektorima u orbiti. Oni mogu meriti tok miona veoma dugo i pružiti pouzdanu informaciju o spektru sekundarnog kosmičkog zračenja pri proizvoljno visokoj energiji. Doduše postoje neka ograničenja kao što je recimo reč o fluksu miona (energije oko 1 TeV) koji se za 1000 puta više umanji od fluksa primarnog kosmičkog zračenja prilikom prolaska kroz Zemlju kao što se vidi na slici (17). To znači da detektori moraju biti veći. Tradicionalne metode merenja energije takođe nisu funkcionalne za energije iznad TeV, jer je mione teško skrenuti s' puta, a za tako nešto je potreban superprovodljivi magnet i detektor enormnih rezolucija. Kalorimetri nisu korisni u ovoj situaciji takođe, zbog malog efikasnog preseka za interakciju.



Slika 17. Gubitak energije miona kroz različite materijale

Kao što je prikazano na slici (1), energetski opseg KZ može da dostiže vrednosti i do 10^{21} eV . Kosmos možemo istraživati i satelitskim i zemaljskim detektorima unutar ovog ekstremnog energetskog opsega.

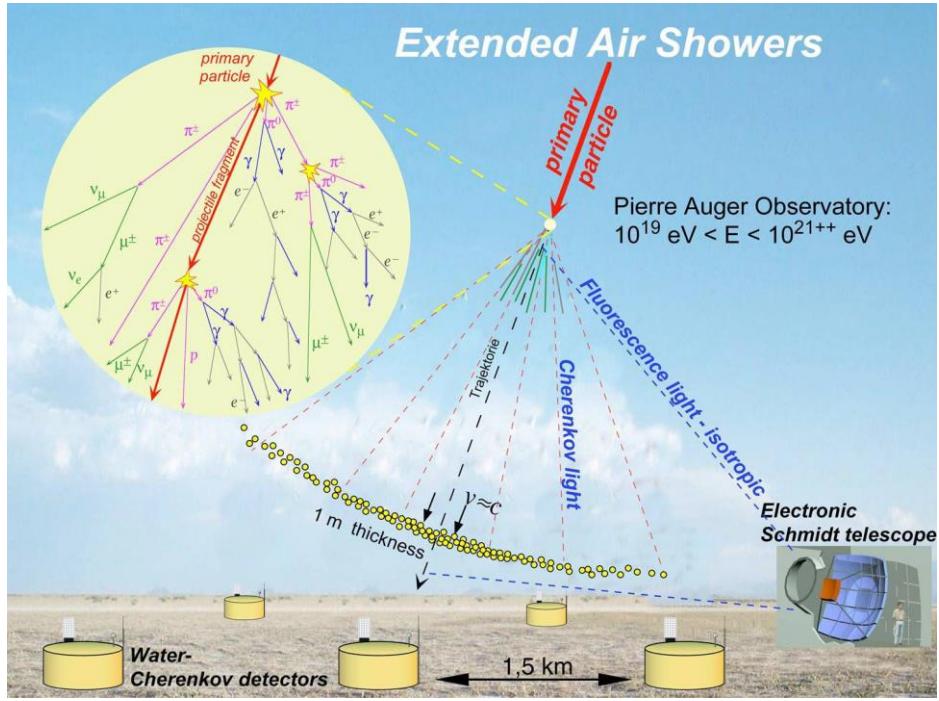
Najnapredniji sistem detektora KZ u orbiti nalazi se na satelitu **Alpha Magnetic Spectrometar (AMS-02)**. Od 2011 godine funkcioniše kao spoljni element Internacionalnoj Svemirskoj Stanici (ISS) koja kruži oko Zemlje na nadmorskoj visini od 300 km. AMS-02 je u potrazi za barionskom antimaterijom merenjem odnosa anti-helijuma i helijuma sa preciznošću od 10^{-9} . Takođe je dizajniran za traženje kandidata za tamnu materiju kao što je neutralino¹⁵ merenjem energetskog spektra pozitrona, antiprotona i gama zračenja. Takođe je u potrazi za posebnim oblikom materije sačinjene od gore i dole kvarkova za koje se očekuje da će stići sa izuzetno velikim energijama. Štaviše velika količina podataka pomaže u merenju fluksa i sastava KZ, kao i njihovu varijaciju. Devet silikonskih ploča osjetljive površine 6.2 m^2 , može da izmeri putanju čestica i da rekonstruiše naelektrisanje i spin u magnetnom polju do 0.15 T . Za identifikaciju elektrona zadužen je *Transition Radiation Detector* (TRD) koji se nalazi u vakumu iznad magneta. TOF detektor je zadužen da razlikuje čestice koje idu prema gore ili prema dole. *Ring Imaging Cherenkov* (RICH) detektor je tu da meri naelektrisanje i brzinu čestica.



Slika 18. Alpha Magnetic Spectrometar (AMS-02)

KZ ekstremnih energija (EECR, $E > 5 \times 10^{19} \text{ eV}$) detektovani su sa energijama većim od teorijski predviđenih tzv. GZK granica. Imamo da GZK granica prigušuje čestice interakcijom sa kosmičkim pozadinskim zračenjem od 2.7 K . Jedna od opservatorijuma koji je u stanju da meri ovako ekstremno energične čestice jeste *Pierre Auger Observatory* i nalazi se na Zemlji.

¹⁵ Neutralino je hipotetička čestica popularan model u rešavanju problema supersimetrije na niskim energijama.



Slika 19. Alpha Magnetic Spectrometar (AMS-02)

Opservatorija Pierre Auger pokriva površinu od 3000 km^2 na argentinskim Pampasima pomoću 1660 rezervoara za vodu i predstavljuju vodo-Čerenkove detektore (VCD) raspoređenih u trougastoj mreži. Uopšteno, ovaj opservatorijum se sastoji iz nekoliko sistema. To je tzv. hibridni detektor koji kombinuje površinske i fluorescentne detektore na istom mestu. Pored VCD detektora tu je i 61 (SD) detektor i oni su tu da detektuju pljuskove čestica nižih energija. Pored njih tu je i 24 fluorescentna detektora (FD), grupisani u jedinice od šest širokougaonih detektora na četiri zgrade na periferiji opservatorijuma.

Da bi obezbedili direktno merenje količine miona u pljuskovima čestica potreban nam je neki podzemni detektor kao što će to biti npr. *Underground Measurement of Muons* (UMD) koji se nalazi na istom području Pierre Auger Observatorijuma. UMD će se sastojati od 219 scintilatorskih elemenata koji će se nalaziti na 73 položaja. Ovaj sistem detektora će se nalaziti na dubini od 2.3 m . Pomenuta dubina, koja ima linijsku gustinu od 540 g/cm^2 , osiguraće da se elektromagnetska komponenta velikih pljuskova čestica eliminiše, pa samim tim detekcija vertikalnih miona, koji imaju energije veće od 1 GeV , biće jednostavnija jer će „sami“ dolaziti do zakopanih detektora.

INFN Nacionalna laboratorijska Grand Sasso (LNGS) najveća je podzemna laboratorijska na svetu posvećena fizici neutrina i astročestica. Ovo je svetski istraživački objekat za naučnike koji rade u oblasti istraživanja kao što su kosmologija, astrofizika, fizika čestica i slično. Trenutno je neprikosnoven jer nudi najnapredniju infrastrukturu u pogledu dimenzija složenosti i kompletnosti. LNGS finansira Nacionalni institut za nuklearnu fiziku (INFN), to je italijanska institucija zadužena za koordinaciju i podršku istraživanja fizike elementarnih čestica, nuklearne i podnuklearne fizike. Laboratorijska je smeštena između gradova L'Aquila i Teramo, tj. na oko 120 km od Rima. Ova podzemna laboratorijska je uz autoput dužine 10 km koji prolazi kroz masiv Grand Sasso (prema Rimu). LNGS se sastoji od tri ogromne eksperimentalne hale. Svaka je duga 100 m , široka 20 m i visoka 18 m zajedno sa tunelima koji ih spajaju ima ukupnu zapreminu oko $180\,000 \text{ m}^3$.



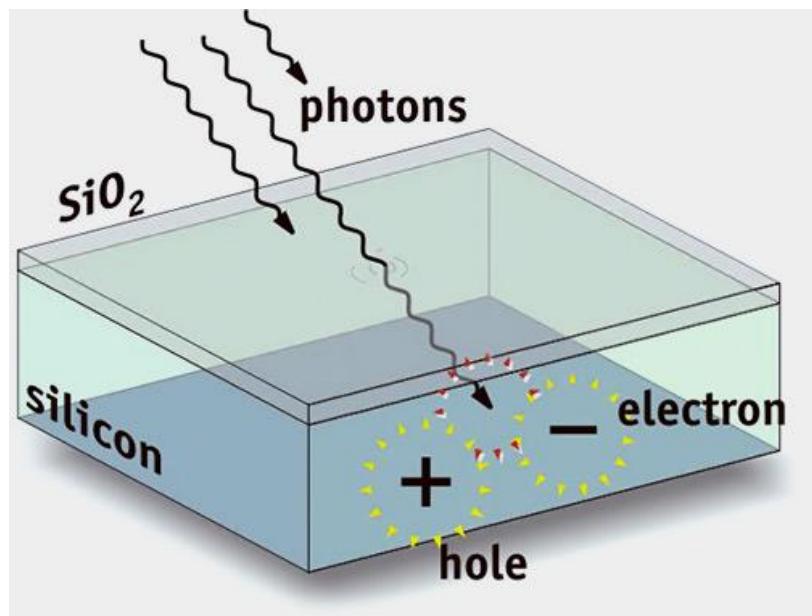
Slika 20. Grafički prikaz Nacionalne laboratorije Gran Sasso (LNGS)

Pristup eksperimentalnim halama je horizontalan i olakšan tunelom na autoputu. Hale su opremljene svom tehničkom i sigurnosnom opremom i postrojenjima nephodnim za eksperimentalne aktivnosti i za obezbeđivanja odgovarajućih uslova za rad.

Debljina stena od 1400 m iznad laboratorije predstavlja prirodnu pokrivenost koja obezbeđuje smanjenje toka KZ za milion puta. Štaviše, protok neutrona u podzemnim halama je oko hiljadu puta manji nego na površini zbog vema male količine uranijuma i torijuma ove dolomitske krečnjačke planine. Propustljivost KZ koju pokriva stena, zajedno sa ogromnim dimenzijama i impresivnom osnovnom infrastrukturom, čini ovu laboratoriju bez premca u otkrivanju slabih i retkih signala, koji su relevantni za astročestičnu, podnuklearnu i nuklearnu fiziku. Trenutno 1100 naučnika iz 29 različitih zemalja učestvuje u aktivnostima LNGS. Istraživačke aktivnosti LNGS-a kreću se od fizike neutrina, preko detekcije miona do pretraživanja tamne materije, čak ide i to fizike Zemlje, biologije i fundamentalne fizike.

4.1. CCD kamera

Charge Coupled Device (CCD) predstavlja tzv. integrisano kolo koje sadrži niz povezanih ili spregnutih kondenzatora. Svaki kondenzator uz spoljno kontrolisanje može da prenese svoje nanelektrisanje u susedni kondenzator. Po definiciji, CCD je poluprovodnički memoriski element gde imamo da se nanelektrisanje kreće po površini. Nanelektrisanje nastalo „udarom“ fotona sadržano je ili u MIS (eng. Metal Insulated Semiconductor) ili u MOS (engl. Metal Oxide Semiconductor). MIS i MOS su kondenzatori proizvedeni na posebnim pločicama kristala. Kada fotoni prođu kroz sočiva uređaja na CCD-u imamo da energija koja je sadržana u tom fotonu se konvertuje pomoću CCD kola u par elektron-šupljina. Nakon toga CCD se koristi za očitavanje ovih nanelektrisanja.



Slika 21. Stvaranje para elektron-šupljina u CCD kolu

Pomenuti kondenzatori čine osnovne i gradivne elemente CCD kola. Pored pomenutih CCD-ova postoji veliki broj tehnologija za detekciju svetlosti, ali se CCD senzori itekako koriste u profesionalnim, medicinskim pa i naučnim aplikacijama gde su potrebni visokokvalitetni podaci o slici. U aplikacijama koje su manje zahtevne, kao što su potrošački ili digitalni fotoaparati, generalno se koriste senzori slabijeg kvaliteta, tj. senzori aktivnih piksela poznatiji kao CMOS senzori. Kvalitet koji su uživali CCD senzori dugi niz godina vremenom se smanjio. Naime, od kraja 2010. godine CMOS senzori su dominantna tehnologija koja je skoro u potpunosti zamenila CCD senzore. Kakva je korist ovih senzora u astronomiji?

Osetljivost CCD senzora određena je količinom nanelektrisanja koja se stvori/sakupi po jedinici primljene svetlosne energije. Sada to stvoreno nanelektrisanje se može meriti brojem generisanih elektrona, a primljena svetlosna energija se može meriti preko broja upadnih fotona, gde se ovde za meru osetljivosti uvodi kvantna osetljivost. Ova kvantna osetljivost predstavlja tzv. Verovatnoću da upadni foton stvari par elektron-supljina. U idealnim uslovima, CCD senzor bi idealan, detektor bi stvarao jedan elektron svaki put kada bi primio jedan foton, ali to se realno ne dešava kod fotodetektora. Pored kvantne efikasnosti CCD senzori su korisni u astronomiji zbog jednostavnosti upotrebe za razliku od fotografiskih ploča. Astronomi su CCD senzore brzo usvojili za gotovo sve UV i IR aplikacije. Toplotni šum i KZ mogu promeniti piksele u CCD nizu. Da bi se to izbeglo, astronomi snimaju po nekoliko ekspozicija sa zatvorenim i otvorenim CCD poklopcem.. Prosek slika snimljenih sa zatvorenim zatvaračem neophodan je za smanjenje slučajnog šuma. Kada se razvije, prosečna slika tamne sekvene se oduzima od slike otvorenog zatvarača da bi se uklonila tamna struja i drugi nedostaci kao što su: mrtvi pikseli, vrući pikseli i slično. Noviji *Skipper CCD* senzori suprostavljaju se šumu prikupljanjem podataka sa istim nanelektrisanjem više puta i imaju primene u preciznim svetlosnim pretragama tamne materije i merenjima neutrina.

Svemirski teleskop Hubble, ima visoko razvijen niz koraka (procedura za smanjenje podataka) za pretvaranje CCD podataka u korisne slike. CCD kamere koje se koriste u astrofotografiji često zahtevaju čvrste nosače da se nose sa vibracijama vatra i drugih vremenskih uslova, zajedno sa ostatkom elemenata za snimanje. Da bi vremenski dugo snimali galaksije, mnogi astronomi koriste tehnike poznate kao astronomsko navođenje. Često je prilika

da se koristi i drugi CCD čip za praćenje odstupanja tokom snimanja. Ovaj čip može brzo da otkrije greške u praćenju i poslati instrukcije motorima za navođenje da to isprave.

CMOS i CCD kamere koje se nalaze skoro u svim pametnim telefonima osetljive su na baelektrisane čestice i jone. KZ prodire u telefon i proizvodi jonizovane elektrone koji se detektuju kamerom. Pametni telefoni imaju mnogo slabiju i sporiju obradu podataka od računara. Uz to imamo da svako izračunavanje i obrađivanje podataka će da skrati trajanje baterije. Procesori na pametnim telefonima su sporiji od procesora na računarima i uz to imaju izrazito manje memorije kao što možemo videti u tabeli (4) i na slici (22)

Tabela 4. Memorije i procesori pametnih telefona i računara najnovije generacije. (Prva dva modela su pametni telefoni, dok su zadnja dva modela računari. U oba slučaja u pitanju je najnoviji model)

Model	Memorija (GB)	Procesor
Apple Iphone 12 Pro MAX	6/512	A14 Bionic 6 jezgara, MAX 3.1 GHz 4 x 1.8 GHz, Icestorm 2 x 3.1 GHz, Firestorm
Samsung Galaxy Z Fold3 5G	12/512	Snapdragon 888 (SM8350) 1 x 2.84 GHz 3 x 2.4 GHz 4 x 1.8 GHz
DCL24 Bolt RGB	64/2500	AMD Ryzen 7 5900X 8 x 4.7 GHz
Gigatron Prime Extreme Ultra	64/10 000	Inte@ Core i9 Procesor 8 x 5.2 GHz
AMD Ryzen 9 5900X #ad		13,589
Apple A14 Bionic #ad		3,853

*Slika 22. Upoređivanje performansi između dva trenutno najbolja procesora. Rezultati su dobijeni programom kao što je **Geekbench 4***

Pored svega navedenog, CCD senzori se takođe koriste u nizu analitičkih instrumenata kao što su *spektrometri* i *interferometri*. Godinama, detektori doživljavaju izuzetna poboljšanja pa samim tim postaju sposobniji da detektuju čestice većih energija. Takođe tu su se promenile i stavke kao što su performanse, prenosivost, smanjenje troškova, jednostavnost upotrebe aplikacija. Ova evolucija je otišla toliko daleko da je sada moguće imati detektor u svom džepu. Više o tome u sledećem poglavlju.

5. Eksperimentalni deo

Ovaj eksperiment je podeljen u dva dela. Prvi deo eksperimenta vršićemo pametnim telefonom marke *Iphone* na kojem je instalirana aplikacija pod nazivom **Cosmic Ray – Detect Radiation**. Drugi deo vršimo takođe pametnim telefonom ali aplikacija nije ista već je u pitanju **Cosmic Ray Live**. Sa prvoj aplikacijom merimo direktno broj događaja po centimetru kvadratnom u jedinici vremena (fluks). Dok sa drugom aplikacijom se konektujemo na server Nacionalne laboratorije Gran Sasso (LNGS) i njihovim instrumentima i njihovim programima očitavamo broj događaja. Detektor miona koji se koristi u aplikaciji Cosmic Ray Live se nalazi u Canfranc u Španiji i u Gran Sasso u Italiji. Aplikacija sa 3D prikazom razvijena je za android telefone od strane Digitalcomoedia u saradnji sa naučnicima i inžinjerima koji rade u Canfranc (LSC) i Gran Sasso (LNGS) laboratorijama. 3D prikaz prikazuje putanje miona u realnom vremenu snimljene teleskopom dizajniranom u laboratoriji LNGS. U Canfranc-u teleskop je spušten na dubinu od 850 m. U ovim uslovima je moguće baviti se vrlo retkim procesima, kao što su interakcije neutrina.

Važno je napomenuti da vrednosti fluksa dobijene ovim dvema aplikacijama ne bi trebale da budu iste, čak ni približne iz prostog razloga što se detektor LNGS nalazi duboko u Zemlji. S druge strane površina čipa telefona koji detektuje KZ je 900 puta manja od površine detektora koji se nalaze u Canfranc i Gran Sasso.

5.1. Apple Iphone 8 – karakteristike procesora i kamere

Memorija :

RAM: 3 GB

INTERNA : 64 GB -NVMe 2.1/0.4 Gbps

Kamera:

3 kamere, foto 12 Mpx, video foto 8 Mpx

Selfie kamera u okviru ekrana (Frame)

Optika: Max otvor blende F/1.8

Zoom: 1x

Vidno polje: 43.1°-77.6°

Glavna kamera: 12 Mpx, OIX, PDAF

f/1.8, 28 mm

4K UHD 3840x2160 px @ 60 fps

1080p FullHD 1920x1080 px @ 240 fps

Selfie: 7 Mpx

f/2.2, 32 mm

1080p FullHD 1920x1080 px @ 30 fps

Površina CMOS čipa 6.29 mm x 5.21 mm = 32.8 mm²

Procesor:

Čipset:

6 total cores, MAX 2.4 GHz

4 effi, core @ 1.42 GHZ, Apple Mistral

2 perf, core @ 2.39 GHz, Apple Monsoon

Površina procesora ~ 1 cm²

5.2. Cosmic Ray – Detect Radiation

Trenutno je aktuelna verzija 1.3.3 ove aplikacije. Od verzije 1.2 počela je mogućnost slanja događaja na server **Cosmic Ray Observer**. Ova aplikacija nam omogućava da učestvujemo u pravom fizičkom eksperimentu. Događaji se prikazuju u realnom vremenu na globalnom serveru cosmicrayobserver.com. Cosmic ray aplikacija nam omogućava da detektujemo KZ iz svemira samo svojim telefonom/tabletom. Aplikacija radi tako što detektuje osvetljene piksele u kameri telefona kada ne ulazi svetlo. Ovi osvetljeni pikseli su rezultat najčešće KZ, nekad i lokalnog pozadinskog zračenja ili nekad samo šuma.



Slika 23. Izgled aplikacije Cosmic Ray – Detect Radiation

Da bi aplikacija funkcionalisala korektno, moramo blokirati ulaz svetlosti na zadnju i prednju kameru, pa je preporuka da se to radi noću. Ako se ne radi noću već u toku dana, onda crna traka za izoliranje dobro funkcioniše. Postoje i namenski klizači, ali neki od njih propuštaju male količine svetlosti.

Cosmic Ray – Detect Radiation aplikacija povremeno snima slike sa dugom ekspozicijom (oko dva puta u sekundi) sa visokim ISO podešavanjima. Kada se događaj detektuje u regionu slike kamere, taj odeljak se pretvara u malu sliku a drugi podaci poput vremena i ukupne jačine događaja se beleže. Ovo će otkriti mione KZ kao i gama zračenje i

naravno elektrone. Gama zračenje i elektroni mogu doći iz kosmičkih ili lokalnih izvora, poput radioaktivnosti u pozadini.

Cosmic Ray – Detect Radiation aplikaciju je prvenstveno razvio Tom Anderson. On je doktorirao fiziku i radio je na Neutrino opservatoriji u Sudburi. Tom je takođe napisao i astronomsku softversku aplikaciju ***Starry Night astronomy software*** koja je namenjena računarima i ima verziju i za macOS i za Windows. Pored ove aplikacije postoji i projekat ***Crayfis*** koja radi isto kao i aplikacija Cosmic Ray samo je namenjena pametnim telefonima sa android sistemom.

Aplikacija Cosmic Ray– Detect Radiation je jedan odličan obrazovni resurs za nastavu fizike od 8. razreda pa do univerzitetskog nivoa. Na primer, pokrenite ga na početku časa, a zatim pokažite rezultate nakon 30 minuta. Može se koristiti za otkrivanje bilo koje vrste zračenja.

Događaji prikazani u ovom radu su rezultat korišćenja aplikacije posle 22:00h.

Tabela 5. Merenje vršeno aplikacijom *Cosmic Ray – Detect Radiation*

Merenje	Vreme merenja t (s)	Broj događaja n	Površina čipa P (cm ²)	Fluks Φ (cm ⁻² s ⁻¹)
1.	2100	90	1	42.86×10^{-3}
2.	1800	83	1	46.11×10^{-3}
3.	1500	74	1	49.33×10^{-3}
4.	1200	69	1	57.5×10^{-3}
5.	1068	66	1	61.8×10^{-3}
6.	900	62	1	68.89×10^{-3}
7.	600	58	1	96.67×10^{-3}
8.	300	49	1	153.33×10^{-3}

Fluks u ovom eksperimentalnom delu dobijamo prema formuli :

$$\Phi = \frac{n}{P \times t} \quad (22)$$

gde je Φ traženi fluks, n je broj čestica dobijen direktnim merenjem, P je površina čipa i t je vreme. Srednji fluks je:

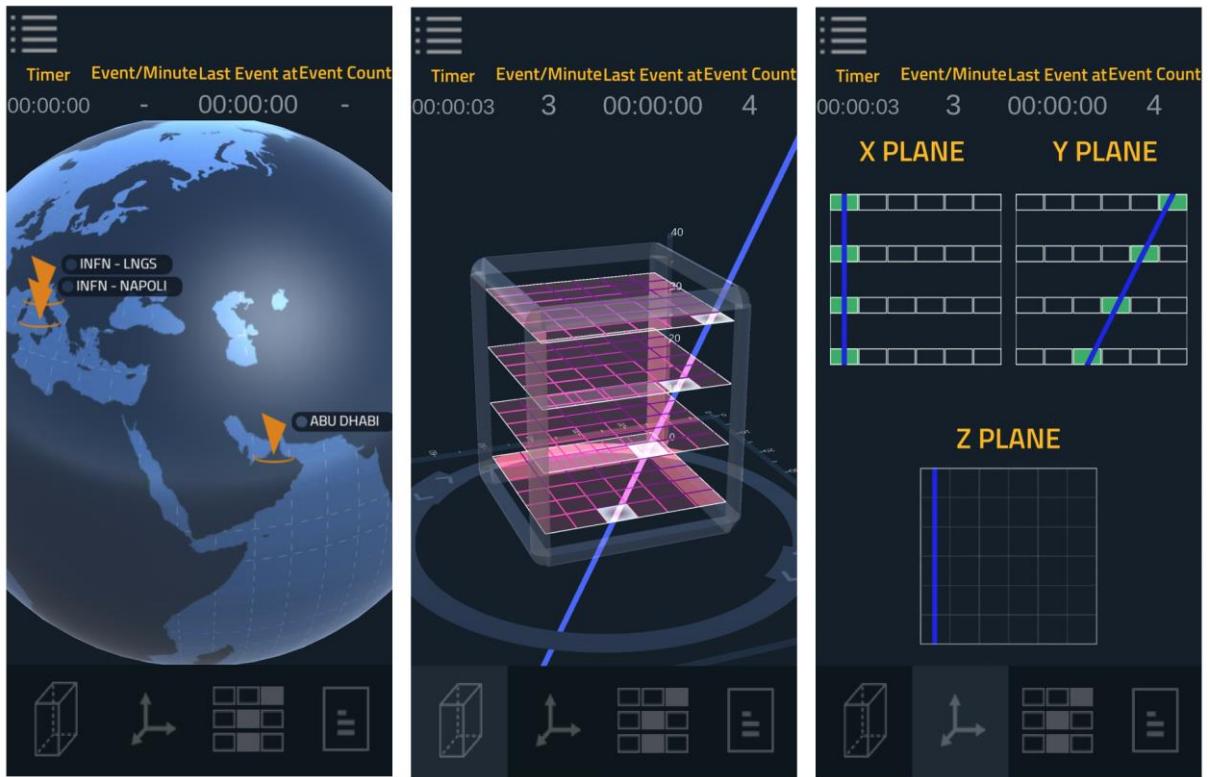
$$\Phi_{sr} = \frac{n_1 + n_2 + n_3 + \dots}{(t_1 + t_2 + t_3 + \dots) \times P} \quad (23)$$

Dakle, iz merenja koja smo vršili za različite vremenske intervale dobijamo sledeći srednji fluks:

$$\Phi_{sr} = \frac{551}{9468 \text{ s} \times 1 \text{ cm}^2} = 0.0582 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} = 582 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$$

5.3. Cosmic Ray Live

Cosmic Ray Live je digitalna aplikacija je takođe namenjena obrazovanju i edukaciji učenika, studenata, kao i naučnika. Pomoću ove aplikacije možete se povezati putem Bluetootha ili interneta, naravno posredstvom pametnog telefona. Pomoću ove aplikacije možemo posmatrati dolazno KZ u realnom vremenu. Podaci se mogu sačuvati i ponovo reproducovati kad god poželite. Površina detektor-a kojim smo posredstvom aplikacije pratili prolaz, pretežno miona, iznosi 900 cm^2 .



Slika 24. Izgled aplikacije Cosmic Ray Live

Tabela 6. Merenje vršeno aplikacijom Cosmic Ray Live

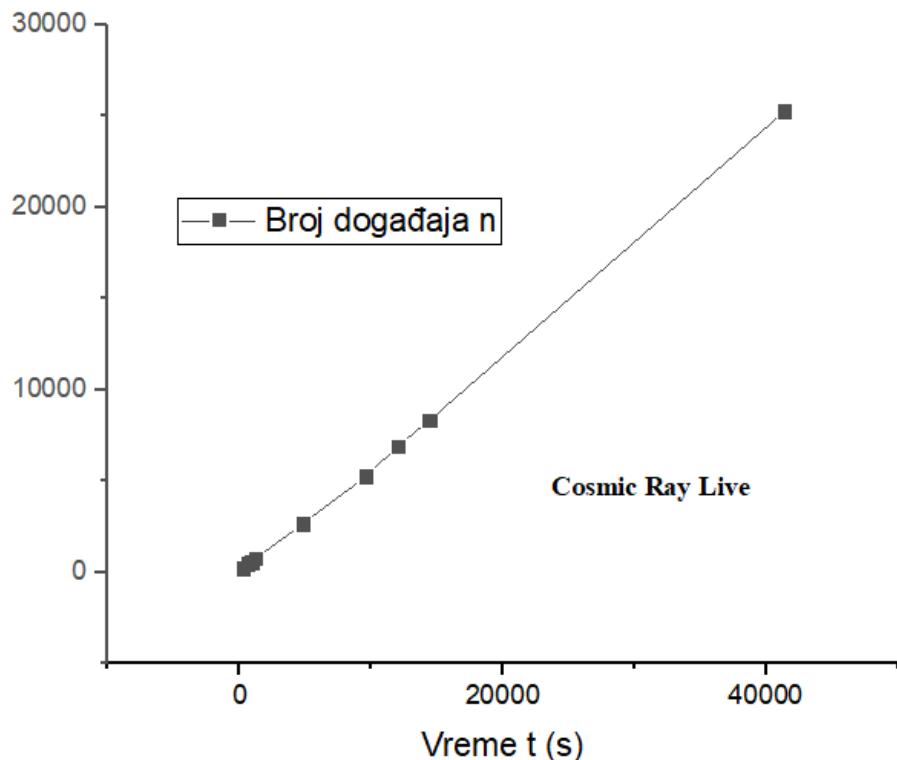
Merenje	Vreme merenja (s)	Broj dogadaja (n)	Površina detektora (cm^2)	Fluks Φ ($cm^{-2}s^{-1}$)
1.	41400	25273	900	6.78×10^{-4}
2.	14400	8300	900	6.40×10^{-4}
3.	12000	6885	900	6.375×10^{-4}
4.	9600	5241	900	6.06×10^{-4}
5.	4800	2643	900	6.12×10^{-4}
6.	1200	730	900	6.76×10^{-4}
7.	900	555	900	6.85×10^{-4}
8.	600	460	900	8.52×10^{-4}
9.	300	197	900	7.3×10^{-4}

Dakle, iz merenja koja smo vršili za različite vremenske intervale dobijamo sledeći srednji fluks:

$$\Phi_{sr} = \frac{50284}{85200 \text{ s} \times 900 \text{ cm}^2} = 6.55 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} = \mathbf{6.55 m^{-2} s^{-1}}$$

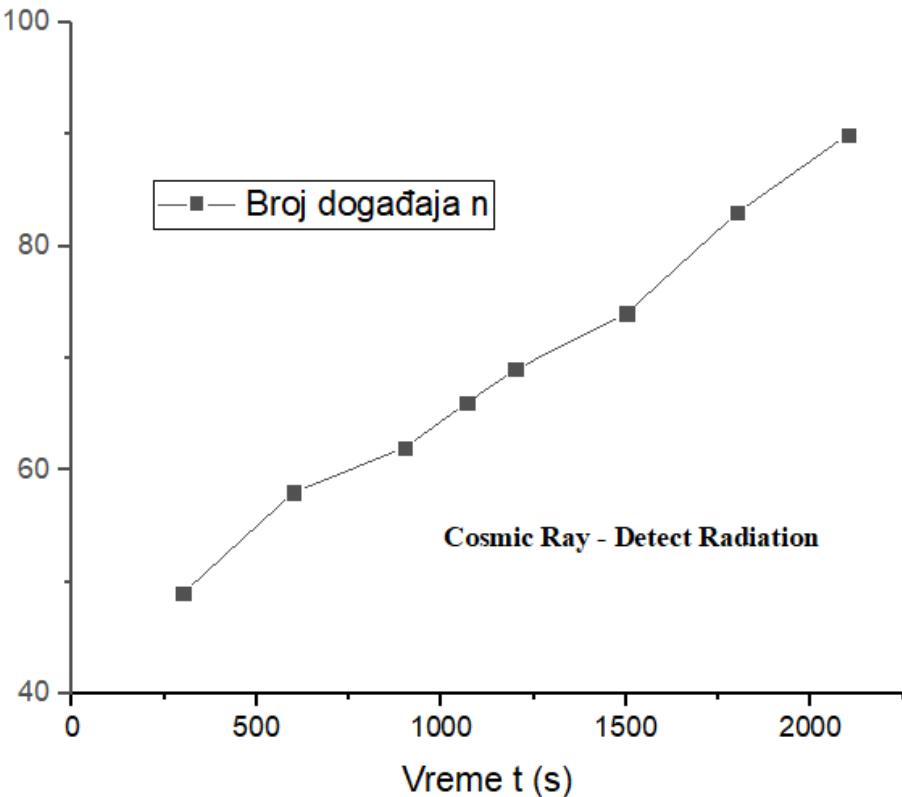
6. Rezultati i diskusija

Kao što se može videti iz priloženog, dobili smo različite vrednosti fluksa ovim dvema aplikacijama. Dakle, aplikacijom Cosmic Ray – Detect Radiation dobili smo da je vrednost srednjeg fluksa $\Phi_{sr} = 582 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Sa druge strane, aplikacijom Cosmic Ray Live dobili smo da je fluks $\Phi_{sr} = 6.55 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Kao što se može primetiti, direktnim merenjem telefona dobili smo ~ 90 puta veći rezultat.



Slika 25. Grafički prikaz rezultata dobijenih aplikacijom Cosmic Ray Live

Kao što se može primetiti na slici (25), odnos vremena i broja događaja je skoro pa idealno linearan od samog početka pa do kraja. I posle 5h merenja nije bilo nikakvih većih promena. To ukazuje na činjenicu da je detektor kojeg smo posmatrali u realnom vremenu izuzetno tačan i koninualan. Sa druge strane imamo merenje koje smo vršili direktno pametnim telefonom pomoću aplikacije Cosmic Ray – Detect Radiation, a čiji grafički prikaz možemo videti na sledećoj slici.



Slika 26. Grafički prikaz rezultata dobijenih aplikacijom
Cosmic Ray – Detect Radiation

Kao što se vidi na slici (26), grafik definitivno nije linearan. Za razliku od prethodnog grafika gde je odnos vremena i broja događaja bio skoro idealno linearan ovde to nije slučaj u potpunosti. Naime, imamo manje oscilacije u merenju ali je rezultat sasvim zadovoljavajući jer to nije aparat koji košta nekoliko desetina hiljada eura, već par stotina.

S' druge strane čip je jako mali, pa je tako veliki prostor za grešku, tj. veće su šanse da ne detektuje mion nego što je to slučaj kod detektoru kojeg smo posmatrali uživo. Isto tako imamo slučaj da detektor na dubini od 1400 m u najvećoj meri detektuje mione, dok telefon na površini Zemlje detektuje sva zračenja koja dođu do njega zajedno sa mionima. Da smo imali prilike da odradimo veći broj merenja, recimo preko 100 ili 200 merenja, najverovatnije bi ovaj odnos bio linaran u većoj meri, ali sa druge strane ovako manji broj merenja je pravi način da se prikaže da merenje telefonom nije idealno.

Kao što smo mogli videti u tabli (2), fluks na nivou mora iznosi $I_0 \sim 72.5 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ a takođe je dat podatak da je na visini od 600 metara taj fluks $I_0 \sim 98.8 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$. Mi smo eksperimentalno dobili $\Phi_{sr} = 582 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1} (\div 2\pi) \sim 92.35 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$. Rezultati su zadovoljavajući, a greška je relativno mala.

Na kraju, možda bi trebalo uzet u obzir to da ja živim u zgradu sa šest spratova, i da sam ja u stanu koji se nalazi na 2. spratu. Dakle, iznad mene se nalaze četiri sprata tj. pet armirano betonskih ploča debljine najmanje 20 cm uz ostale obloge koje idu uz to.

Bilo je za očekivati da ćemo da dobijemo različite vrednosti. Iz tog razloga hajde da vidimo koliko to utiče debljina sloja stena iznad detektora, i da obrnutim redom dođemo dubine na kojoj se nalazi detektor, tako što ćemo iskoristiti podatke koje imamo i formulu (18):

Imamo da je:

$$I = 6.55 \text{ } m^{-2}s^{-1},$$

$$I_0 = 582 \text{ } m^{-2}s^{-1},$$

$$\mu = 3.2 \times 10^{-3}$$

$$I = I_0 e^{-h\mu}$$

$$\frac{I}{I_0} = e^{-h\mu}$$

$$\ln \frac{I}{I_0} = -h\mu$$

$$h = -\frac{\ln \frac{I}{I_0}}{\mu} = -\frac{-4.487}{3.2 \times 10^{-3}} = 1402 \text{ } m$$

Debljina stena iznad detektora iznosi $h = 1402 \text{ } m$.

7. Zaključak

U ovom master radu su analizirani različiti izvori KZ, od galaktičkog do vangalaktičkog modela a tiču se primarnog kosmičkog zračenja. Pominju se izvori kao što su pulsari, supernove, AGJ, kvazari, blazari i drugi. Uopšte taj deo je bio neophodan da bi se postepeno uveo pojam sekundarnog kosmičkog zračenja. Sekundarno kosmičko zračenje je kako smo to opisali u podnaslovu (2.3) *posledica* interakcije primarnog kosmičkog zračenja sa jezgrima atoma u atmosferi ili van nje.

Glavni zadatak ovog rada je da pokažemo da pametni telefon itekako može da posluži u naučne svrhe i da relativno tačno odredimo fluks, u našem slučaju fluks miona. Ideja je da se pokaže da u bilo kom trenutku, na bilo kojoj visini ili dubini možemo pametnim telefonom da detektujemo čestice koje nas neprekidno zapljuškuju.

Za korišćenje u učionici i kod kuće, aplikacije Cosmic Ray – Detect Radiation i Cosmic Ray Live omogućavaju korisnicima da na zanimljiv i istraživački način upotrebe pametne telefone. Mi ih svakodnevno koristimo u velikoj meri ali sad mogu da dobiju još jednu ulogu kao džepni detektori čestica. Sve ovo omogućava lakše korišćenje i analizu podataka u nauci o KZ. Aplikacije se mogu koristiti za kratka merenja i pregledavanje podataka ili pak za duže prikupljanje podataka i analize podataka kao što su recimo zavisnost fluksa miona od nadmorske visine u različitim gradovima.

Možda je zanimljiva ideja da u nekoj višespratnici izvršimo merenje na svakom spratu određeni vremenski interval od recimo 24h ili 48h. Onda uporediti rezultate i izračunati attenuaciju, tj apsorpciju jednog sloja armirano betonske ploče. To bi nam pomoglo da odredimo recimo sprat na kome se nalazimo, ili jednostavno debljinu armirano betonskih ploča. To bi bilo korisno recimo kada kupujemo stan, investiramo neku veću svotu novca a nemamo instrumente da proverimo debljinu tih konstruktivnih elemenata.

Definitino, aplikacije ovog tipa, najveću primenu će naći u obrazovno vaspitnim ustanovama bilo kog karaktera. Učenicima će sigurno biti zanimljivo da svoj telefon koriste u naučno – istraživačke svrhe. Da detektuju čestice, i da čitaju o njima. Da beleže događaje i o tome razgovaraju sa svojim nastavnicima.

Za neke buduće radove i istraživanja ostaje nam da razmotrimo sve mogućnosti koje nam ove aplikacije pružaju. Da modelujemo postojeće aplikacije ili pak kreiramo neke nove.

Dodatak

Tabela 7. Fizičke konstante

Veličina	Oznaka	Vrednost	Merna jedinica
Gravitaciona konstanta	G	6.67384×10^{-11}	$m^3/kg \cdot s^2$
Plankova konstanta	h	6.626×10^{-34}	Js
Bolcmanova konstanta	k	1.381×10^{-23}	JK^{-1}
Štefan-Bolcmanova konstanta	σ	5.67×10^{-8}	$Jm^{-2}K^{-4}s^{-1}$
Brzina svetlosti	c	3×10^8	ms^{-1}
Masa protona	m_p	1.673×10^{-27}	kg
Masa elektrona	m_e	9.11×10^{-31}	kg
Masa neutrona	m_n	1.675×10^{-27}	kg
Masa Sunca	M_s	1.99×10^{30}	kg
Masa Zemlje	M_z	5.98×10^{24}	kg
Elementarno naelektrisanje	e	1.6×10^{-19}	C
Avogadrovo broj	N_A	6.022×10^{23}	mol^{-1}
Atomska jedinica mase	u	1.660×10^{-27}	kg
Radius Zemlje	R_z	6.38×10^6	m
Radius Sunca	R_s	6.96×10^8	m
Luminoznost Sunca	L_s	3.86×10^{26}	W
Temperatura Sunca	T_s	5700	K
Astronomска jedinica	AU	1.5×10^{11}	m
Habrova konstanta	H_0	73	$km\ s^{-1}\ Mpc^{-1}$

8. Literatura

- [1] R. A. Miliken & G.H. Cameron, *The Origin of the Cosmic Rays*. California 1928.
- [2] Jorge A. Perez-peraza, *Hommage to the Discoveryy of Cosmic Rays, the Meson-muon and Solar Cosmic Rays*. 2013.
- [3] Todor Stanev, *High Energy Cosmic Rays* -Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2020. Dostupno na <https://doi.org/10.1007/978-3-030-71567-0>
- [4] Timur Delahaye, *Propagation of Galactic Cosmic Rays and Dark Matter indirect Detection*, Mathematical Physics [math-ph]. 2010. Dostupno na: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00530422v3>
- [5] W.Baade & Zwicky F. Proceedings of the National Academy of Science
- [6] P. Padovani – *A simplified view of blazars: Why BL Lacertae is actually a quasar in disquise*, 2012 (Dostupno na: <https://arxiv.org/abs/1205.0647v1>)
- [7] Andreda Gokus, *Broadband Emission Processes of Active Galactic Nuclei*, 2017. (Dostupno na: https://www.sternwarte.uni-erlangen.de/docs/theses/2017-09_Gokus.pdf)
- [8] Milan M. Ćirković, *Uvod u Vangalaktičku astronomiju*, 2008. Novi Sad. PMF Univerziteta u Novom Sadu.
- [9] Dragana Ilić, *Aktivna galaksija MK 817: osobine emisione oblasti*, 2006. Beograd
- [10] Guter Sigl, *Astroparticle Physics: Theory and Phenomenology, Volume 1*, 2017. (399.)
- [11] Michael E. Peskin, *Concepts of Elementary Particle Physics*, 2019.
- [12] Andrew Norton, *Understanding Universe. The Physics of the Cosmos from Quasars to Quarks*. 2021.
- [13] Peter K.F. Grieder, *Extensive Air Shower (High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects)*, Volume I, 2010.
- [14] Prashant Shukla, *Energy and angular distribution of atmospheric muons at the Earth*; 2018. (Dostupno na: <https://arxiv.org/pdf/1606.06907.pdf>)
- [15] Peter K.F. Greider, *Cosmic Rays at Earth – Researcher’s Reference Manual and Data Book*, 2001.
- [16] T. K. Gaisser, *Cosmic rays and particle physics*, Cambridge, UK, 1990.
- [17] Šejla Hadžić, *Test of High-Resolution Muon Drift-Tube Chambers for the upgrade of the ATLAS Experiment*, 2019.
- [18] The Pierre Auger Collaboration, *Calibration of the underground muon detector of the Pierre Auger Observatory*. 2020. (Dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/347300507_Calibration_of_the_underground_muon_detector_of_the_Pierre_Auger_Observatory)
- [19] <https://www.lngs.infn.it/en/lngs-overview>

[20] <https://cosmicrayapp.com/>

[21] A. Bettini, *The Gran Sasso National Laboratory of the INFN Scientific program*,

Biografija

Kenan Tmušić, rođen 24.04.1990. godine u Sjenici. Pohađao je osnovnu školu „12. decembar“ u istom gradu. Srednju školu, gimnaziju „Jezdimir Lović“ završio je 2008. godine.

Iste godine upisuje studije na Departmanu za matematičke nauke Državnog univerziteta u Novom Pazaru.

Posle uspešno završenih osnovnih studija, upisuje master akademске studije fizike – astronomija sa astrofizikom na PMF u Novom Sadu.



U Novom Sadu, 2021. godine

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

Monografska dokumentacija

TD

Tip zapisa:

Tekstualni štampani materijal

TZ

Vrsta rada:

Master rad

VR

Autor:

Kenan Tmušić

AU

Mentor:

prof. dr Maja Stojanović

MN

Naslov rada:

Detekcija kosmičkog zračenja pametnim telefonom

NR

Jezik publikacije:

srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda:

srpski/engleski

JI

Zemlja publikovanja:

Srbija

ZP

Uže geografsko područje:

Vojvodina

UGP

Godina:

2021

GO

Izdavač:

Autorski reprint

IZ

Mesto i adresa:

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

MA

Fizički opis rada:

8 poglavlja /43 strana/21 reference/7 tabela/26 slika/

FO

Naučna oblast:

Fizika

NO

Naučna disciplina:

Nuklearna fizika

ND

Predmetna odrednica/ ključne reči:

Kosmičko zračenje, mioni, detektori, primarno i sekundarno kosmičko zračenje, izvori zračenja.

PO

UDK

Čuva se:

Biblioteka Departmana za matematiku i informatiku, PMF-a u

ČU

Novom Sadu

Važna napomena:

nema

VN

Izvod:

Ovaj rad opisuje izvore kosmičkih zračenja, modele po kojima se dele i način na koji interaguju sa atmosferom. Nakon toga se opisuju tipovi elementarnih čestica gde se poseban akcenat daje mionima koje i detektujemo pametnim telefonom.

IZ

Datum prihvatanja teme od NN veća: Avgust 2021. godine

DP

Datum odrbrane:

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik: prof. dr Nikola Jovančević

Član: prof. dr. Miodrag Krmar

Član, mentor: prof. dr Maja Stojanović

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

<i>Accession number:</i>	
ANO	
<i>Identification number:</i>	
INO	
<i>Document type:</i>	Monograph publication
DT	
<i>Type of record:</i>	Textual printed material
TR	
<i>Content code:</i>	Final paper
CC	
<i>Author:</i>	Kenan Tmušić
AU	
<i>Mentor/comentor:</i>	prof. dr Maja Stojanović
MN	
<i>Title:</i>	Detecting cosmic rays with smartphones
TI	
<i>Language of text:</i>	Serbian (Latin)
LT	
<i>Language of abstract:</i>	English
LA	
<i>Country of publication:</i>	Serbia
CP	
<i>Locality of publication:</i>	Vojvodina
LP	
<i>Publication year:</i>	2021
PY	
<i>Publisher:</i>	Author's reprint
PU	
<i>Publication place:</i>	Faculty of Science, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad
PP	
<i>Physical description:</i>	8 chapters /43 pages/21 references/7 tables/26 pictures
PD	
<i>Scientific field:</i>	Physics
SF	
<i>Scientific discipline:</i>	Nuclear physics
SD	
<i>Subject/ Key words:</i>	Cosmic rays, muons, detectors, primary and secondary cosmic radiation, radiotition sourses
SKW	
<i>UC</i>	
<i>Holding data:</i>	Library of Department of Matematics and and Informatics, Trg Dositeja Obradovića 4
HD	
<i>Note:</i>	None
N	This paper describes the sources of cosmic rays, the models by which they are divided and the way they interact with the atmosphere. After that we are then described elementary particles where special emphasis is given to the muons that we detect by smartphone.
<i>Abstract:</i>	
AB	
<i>Accepted by the Scientific Board:</i>	Augst 2021.
ASB	
<i>Defended on:</i>	
DE	

Thesis defend board:

DB

President: prof. dr Nikola
Jovančević

Member: prof. dr. Miodrag Krmar
Member, mentor: prof. dr Maja
Stojanović