

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO - MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Marko Husar

**Mjerenje utjecaja atmosferskih uvjeta na tok
miona samoizrađenim koincencijskim
detektorom kozmičkih zraka**

Zagreb, 2023.

Ovaj rad izrađen je na Fizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Nikole Poljaka te je predan na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2022./2023.

Sadržaj

1	Uvod	1
1.1	Kozmičke zrake i atmosferski mioni	1
1.2	Scintilator	4
1.3	Fotomultiplikator	5
1.4	Bethe-Bloch formula	6
2	Detektor kozmičkih zraka	8
2.1	Sustav za detekciju	8
2.2	Sustav za obradu podataka i koincidencijska logika	10
2.3	Kalibracija uređaja	13
3	Teorijska predviđanja utjecaja atmosferskih uvjeta na tok miona	14
3.1	Zakočno zračenje u atmosferi	15
3.2	Broj miona nastalih u atmosferi	16
3.3	Tlak zraka	17
3.4	Temperatura zraka	17
4	Rezultati i mjerenja	20
4.1	Obrada mjerenja	20
4.2	Rezultati i diskusija	21
5	Zaključak	24
6	Zahvale	24
	Popis literature	25
7	Sažetak	27
8	Summary	28

1 Uvod

U ovom radu izlažem mjerenja atmosferskih utjecaja na tok miona. Mjerenja su vršena samoizrađenim detektorom kozmičkih zraka. Podatci o atmosferskim uvjetima preuzeti su s Meteorološkog opservatorija Horvatovac Geofizičkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. U uvodnom poglavlju opisat ćemo fenomen koji se u ovom radu proučavao, kao i potrebne materijale i teoriju dostatnu za vršenje mjerenja.

1.1 Kozmičke zrake i atmosferski mioni

Era proučavanja kozmičkih zraka započinje 1912. godine kada je austrijski fizičar Victor Hess položio balonom i u fotoemulzijama uhvatio prve znakove kozmičkih čestica [1]. Za ovo je otkriće Hess dobio Nobelovu nagradu za fiziku 1936. Do ranih 1950-ih daljnjim eksperimentima s kozmičkim zrakama došlo je do revolucije u fizici čestica otkrićem čestica: e^+ , μ , π , K i Λ [2]. Naglim razvojem visokoenergijskih akceleratora dolazi do sljedećeg velikog skoka u spoznajama u fizici čestica.

Kozmičke zrake možemo podijeliti u nekoliko razreda po njihovim energijama koje su usko povezane s mjestom njihovog nastanka. Kozmičke zrake najviših energija su ekstragalaktičke kozmičke zrake (energije iznad 10^{16} eV), a nastaju u radiogalaksijama i kvazarima. Galaktičke kozmičke zrake imaju nešto niže energije ($10^{15} - 10^{16}$ eV) te su većinom emitirane tijekom eksplozija supernovi. Solarne kozmičke zrake imaju značajno niže energije (u prosjeku $5 - 30$ GeV), a nastaju u solarnim bakljama. Naposljetku, postoje i interplanetarne (u prosjeku $10 - 100$ MeV) te magnetosferne ili planetarne kozmičke zrake (do oko 10 MeV) [3]. Prema ovoj energetskej skali razvidno je kako su procesi u kojima su uključene kozmičke zrake bili glavni izvor proučavanja fizike čestice više od pola stoljeća [4].

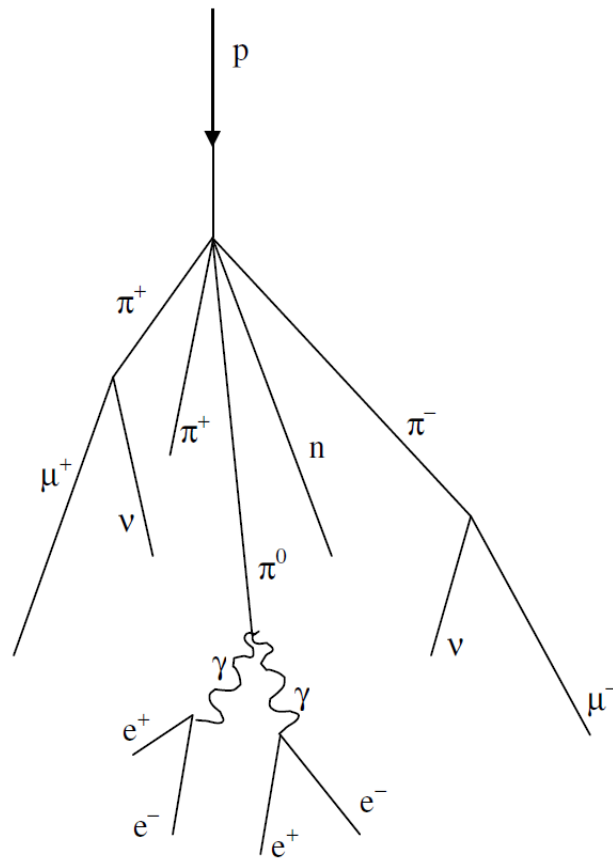
Većina kozmičkih čestica (oko 90%) koje dolaze do Zemljine atmosfere su visokoenergetski protoni. Sudarom protona s atmosferskim atomima nastaje pljusak sekundarnih kozmičkih čestica, odnosno čestica koje nastaju interakcijom primarnih kozmičkih zraka s atomima u visokoj atmosferi. Najznačajniji produkt ovakvog sudara je pion (π^+ , π^- , π^0). Pioni su najlakši mezoni čija su vremena poluraspada [5]

$$\begin{aligned}\tau(\pi^\pm) &= (2.6033 \pm 0.0005) \cdot 10^{-8} \text{ s}, \\ \tau(\pi^0) &= (8.43 \pm 0.13) \cdot 10^{-17} \text{ s}.\end{aligned}$$

Promotrimo sada proces raspada π^- i π^+ mezona, $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$, odnosno $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ [6]. Glavni produkt ovih reakcija je mion, odnosno antimion. Mion (μ^-) je elementarna čestica iz porodice leptona. Njegov električni naboj jednak je naboju elektrona, a masa mu je oko 207 puta veća od mase elektrona. Mion je čestica spina 1/2 čije vrijeme poluživota iznosi [5]

$$\tau(\mu) = (2.1969811 \pm 0.0000022) \cdot 10^{-6} \text{ s.}$$

Prikaz nastanka pljuska čestica u atmosferi čije porijeklo je kozmička zraka (u ovom slučaju proton) dana je na slici 1.



Slika 1: Ilustracija pljuska sekundarnih kozmičkih čestica nastalih upadom kozmičke zrake u atmosferu. [7]

Spektar kozmičkih zraka opisan je veličinom koja se naziva diferencijalni intenzitet I . Ta je veličina mjerena u $[\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}\varepsilon^{-1}]$, pri čemu je ε varijabla dimenzije energije, što pokazuje da se radi o veličini koja mjeri koliko čestica upada po nekoj jedinici površine u jedinici vremena i prostornog kuta za neku vrijednost raspona energija čestica.

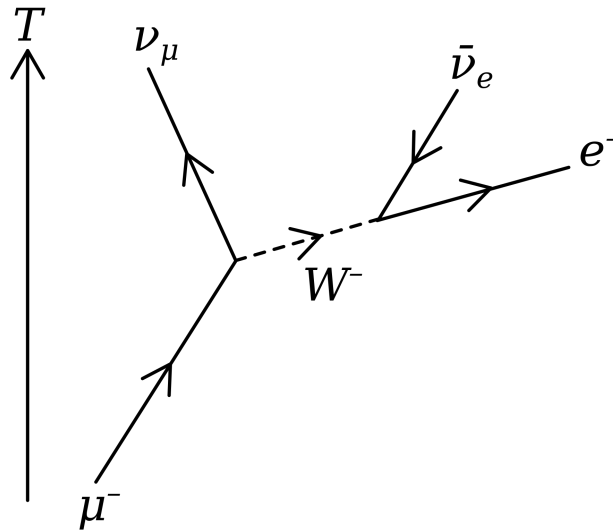
Većina kozmičkih čestica na razini mora su mioni nastali sudarima primarnih protona s atomima u visokoj atmosferi. Integralni intenzitet vertikalnih miona momenta većeg od $1 \text{ GeV}/c$ na razini mora iznosi $\approx 70 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$. Kutna distribucija miona je funkcija zenitnog kuta θ proporcionalna s $\propto \cos^2 \theta$. Uračunavajući oba doprinosa dobivamo očekivani broj miona na razini mora od $1 \text{ cm}^2\text{min}^{-1}$ za tanki horizontalni detektor [5].

Mioni imaju povijesni značaj u dokazivanju Einsteinove specijalne teorije relativnosti [8]. Naime, mioni nastaju u atmosferi na visinama od oko 10 km te se gibaju brzinama bliskima brzini svjetlosti ($\approx 0.99c$). Nerelativističkim računom, prije raspada mioni bi prevalili svega oko $\Delta l = \tau(\mu) \cdot v(\mu) \approx 650 \text{ m}$. Međutim, eksperimenti pokazuju kako se atmosferske mione može naći na površini Zemlje, pa čak i ispod površine Zemlje. Poučeni specijalnom teorijom relativnosti, znamo da su vremenski intervali mjereni u sustavu objekta koji putuje brzinama usporedivima s brzinom svjetlosti ($c = 299792458 \text{ ms}^{-1}$ [5]) u odnosu na promatrača na Zemlji različiti zbog dilatacije vremena. Kako je vrijeme života miona mjereno u sustavu u kojem mion miruje, za promatrača na Zemlji to je vrijeme povećano za relativistički faktor γ , tj.

$$\Delta t' = \gamma \Delta t = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (1)$$

pri čemu $\Delta t'$ označava vrijeme u sustavu Zemlje, a Δt vlastito vrijeme života miona. Izračunamo li sada relativistički parametar γ za tipični mion, dobivamo: $\gamma \approx 7$, što znači da se u relativističkom računu vrijeme poluživota miona u sustavu Zemlje produljuje za faktor $\gamma \approx 7$, odnosno $\tau' \approx 15.4 \mu\text{s}$. Daljnjim računom, za put koji mioni prijeđu prije nego što se raspadnu, dobivamo $\Delta l' \approx 4.5 \text{ km}$. Uzmemo li u obzir da je riječ o prosječnom vremenu života miona, statistički gledano, postoje mioni koji će prijeći i nekoliko puta veći put od srednjeg izračunatog puta. Također, zbog atmosferskih čimbenika te intenziteta dolaznog zračenja visina nastanka miona se može znatno promijeniti, što nam omogućuje detekciju miona na površini Zemlje.

Napomenimo da ukoliko se mion raspadne, u njegovu najčešćem kanalu raspada, prikazanom na slici 2, nastaju elektron i dva neutrina. Elektroni relativno niskih energija brzo gube energiju u atmosferi i ne detektiraju se lako Zemaljskim uređajima.



Slika 2: Feynmanov dijagram najčešćeg raspada miona [9]

1.2 Scintilator

Scintilator je materijal koji ima svojstvo scintilacije (lat. *scintillatio*: svjetlucaње [10]). Scintilacija je svojstvo fluorescirajućih tvari da prilikom prolaska ionizirajućeg zračenja emitiraju elektromagnetske valove u području vidljivog i ultraljubičastog (UV) spektra. Sudarom miona s atomima u scintilatoru predaje se energija materijalu, odnosno inducira se prijelaz elektrona materijala u pobuđena energetska stanja. Nakon određenog vremenskog perioda elektroni teže vraćanju u osnovno stanje te pri prijelazu emitiraju foton, česticu svjetlosti, odnosno kvant elektromagnetskog zračenja.

Ukoliko na scintilator upada zračenje intenziteta I_0 , ukupan intenzitet nakon vremena t od trenutka pobuđenja elektrona u scintilatoru općenito možemo jednostavno izračunati po formuli [11]:

$$I(t) = I_0 e^{-t/\tau}, \quad (2)$$

pri čemu parametar τ označava signifikantno scintilacijsko vrijeme zadanog materijala. Plastični

scintilatori imaju vrlo kratko scintilacijsko vrijeme (1-3 ns [12]). Zbog toga je nešto bolji matematički opis odaziva scintilatora dan konvolucijom Gaussijana i eksponencijalne funkcije:

$$N(t) = N_0 f(\sigma, t) e^{-t/\tau}. \quad (3)$$

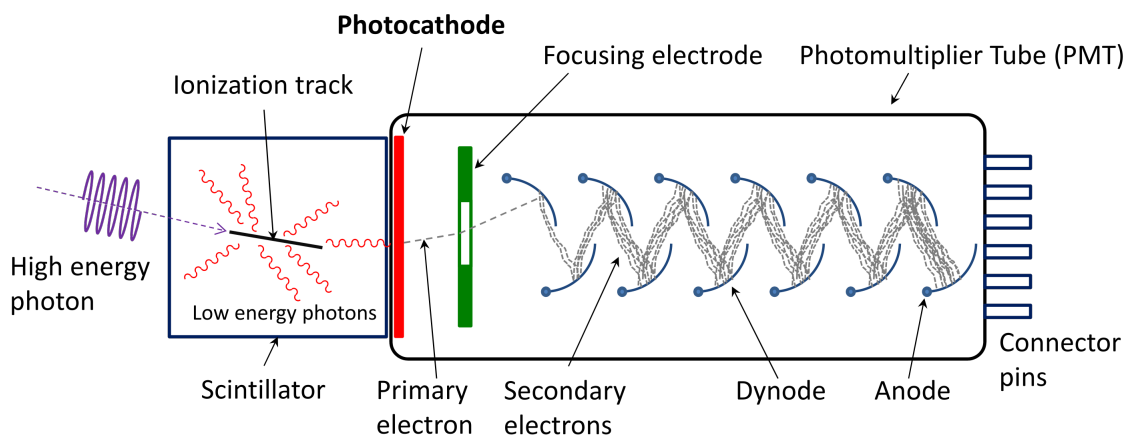
Pri tome N označava broj emitiranih fotona nakon vremena t , N_0 ukupan broj emitiranih fotona, a $f(\sigma, t)$ Gaussijan standardne devijacije σ [12].

Plastični scintilator nastaje otapanjem scintilacijskog materijala najčešće organskog podrijetla u otopini koju se može polimerizirati. U praksi se najčešće za takvu otopinu koristi stiren (sustavnog imena etenilbenzen), ali i druge plastike poput PVT, PMMA itd. U pokusima se često koriste plastični scintilatori zbog niske cijene i lakoće oblikovanja u različite geometrijske konfiguracije.

1.3 Fotomultiplikator

Kako bi se svjetlost malog intenziteta koja se emitira u scintilatoru mogla detektirati i obraditi, mora se pretvoriti u električni signal. Uređaj koji to omogućuje, bez prevelikog dodavanja pozadinskih šumova, naziva se fotomultiplikator (eng. *photomultiplier tube (PMT)*). Radi se o visokoosjetljivom detektoru koji od fotona svjetlosti putem fotoelektričnog efekta iz fotoosjetljive diode izbacuje elektrone.

Između katode i anode u uređaju nalazi se niz elektroda koje se nazivaju dinode. Proces počinje udaranjem fotona u fotoosjetljivi element koji izbija primarni elektron. Dinode su spojene na razliku potencijala kroz koju se elektroni ubrzavaju. Ubrzani elektron udara u sljedeću dinodu te se izbija nekoliko sekundarnih elektrona, a ponavljanjem procesa ulazni se signal višestruko pojačava. Prikaz navedenog procesa dan je na slici 3.



Slika 3: Shematski prikaz fotomultiplikatora spojenog na scintilator u postavu za mjerenje zračenja [13].

Današnji se fotomultiplikatori koriste za širok raspon istraživanja u područjima optičke spektroskopije, laserskih mjerenja, astronomije itd. Sukladno tome izrađuju se fotomultiplikatori osjetljivi na zračenje u ultraljubičastom, vidljivom, pa čak i u infracrvenom dijelu elektromagnetskog spektra.

Najvažniji element svakog fotomultiplikatora je fotokatoda iz koje se izbijaju primarni elektroni po principu fotoelektričnog efekta koji je opisao Albert Einstein 1905. te je za to otkriće dobio Nobelovu nagradu za fiziku 1921. godine. Mjerodavni parametar u karakterizaciji fotokatode je njezina kvantna djelotvornost (eng. *quantum efficiency (QE)*) koja se definira kao:

$$QE = \frac{\text{broj emitiranih fotoelektrona}}{\text{broj fotona ulaznog signala}}.$$

Fotokatode u praksi pokazuju maksimalnu kvantnu djelotvornost od oko 20-30% [11].

1.4 Bethe-Bloch formula

Čestica koja prolazi kroz medij osjeća 2 efekta: gubitak energije i otklon od prvotne putanje. Ovi su efekti najčešće uzrokovani neelastičnim sudarima čestice s atomskim elektronima u mediju te elastičnim raspršenjima na potencijalu jezgre. Ovi se procesi mogu događati više puta kako čestica prolazi kroz materijal ili medij, a njihov kumulativni doprinos dovodi do dva opisana efekta. Uz ove procese događa se još i emisija Čerenkovljevog zračenja, razni nuklearni procesi te mnogi drugi.

Za opis gubitka energije masivne čestice naboja $Z \cdot e$ (e označava elementarni naboj), mase M i brzine v koja se giba kroz medij na udaljenosti b od elektrona u materijalu koristit ćemo Bohrovu formulu. Ona je dana izrazom:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{m_e v^2} N_e \ln \frac{b_{max}}{b_{min}}, \quad (4)$$

pri čemu N_e označava gustoću elektrona u materijalu. Uvrstimo li sada izraze za b_{min} i b_{max} iz Bohrovog modela, konačno dobivamo:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{m_e v^2} N_e \ln \frac{\gamma^2 m v^3}{z e^2 \bar{v}}. \quad (5)$$

Iako je u ovaj izraz uključen relativistički faktor, ova formula je klasična. Ona bi dobro funkcionirala za masivne čestice poput α -čestice ili težih jezgri. Želimo li izračunati gubitak energije za lakše čestice tijekom prolaza kroz medij, moramo koristiti izraz koji uzima u obzir kvantne efekte. Kvantno mehanički iskaz ove formule glasi:

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Zz^2}{A\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e \gamma^2 v^2 W_{max}}{I^2} - 2\beta^2 \right) \right]. \quad (6)$$

Ova jednadžba naziva se Bethe-Bloch formulom [12] te služi za račun statističkog gubitka energije lakih nabijenih čestica pri njihovom gibanju kroz neki medij. Ovdje nove oznake imaju sljedeća značenja: r_e —klasični radijus elektrona, N_A —Avogadrova konstanta, I —srednji potencijal pobude te ρ —gustoća apsorbirajućeg materijala. U svrhu konkretnog računa u navedeni izraz možemo uvrstiti numeričke vrijednosti svih konstanti: $2\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0.1535 \text{ MeVcm}^2 \text{g}^{-1}$. Nadalje, W_{max} označava najveću moguću energiju koja se prenosi u čeonom sudaru, a može se pokazati da za česticu mase M ona iznosi:

$$W_{max} = \frac{2m_e c^2 \eta^2}{1 + 2s\sqrt{1 + \eta^2 + s^2}}, \quad (7)$$

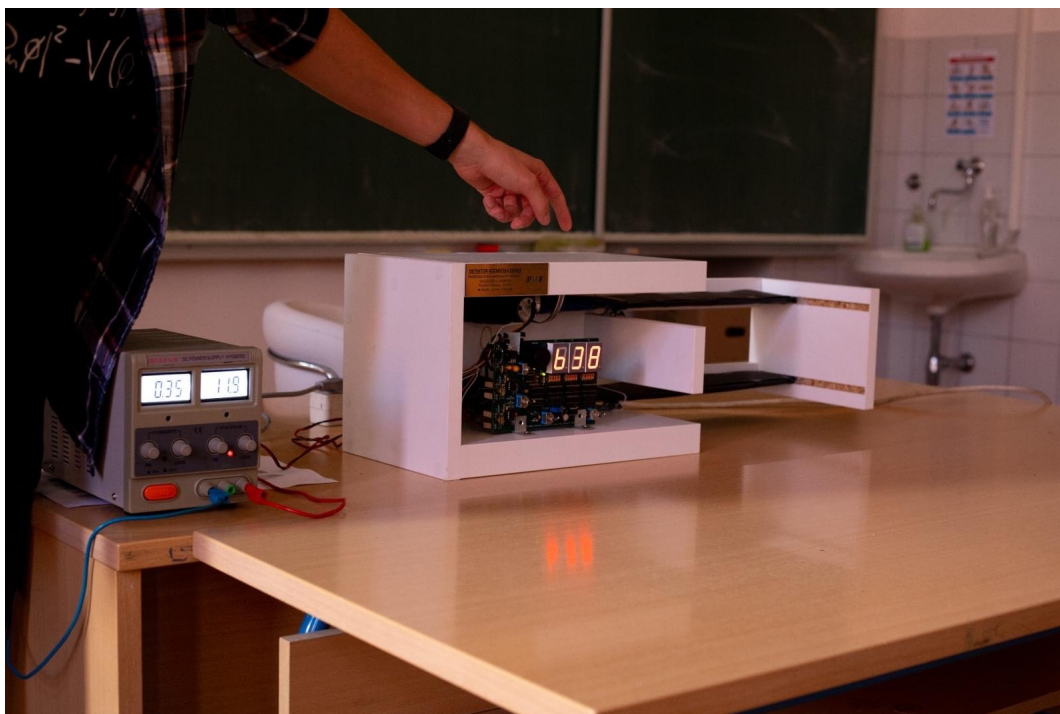
pri čemu su $s = m_e/M$ i $\eta = \beta\gamma$. Za česticu koja je puno masivnija od elektrona, tj. $M \gg m_e$, ovaj izraz možemo razviti u red i dobiti: $W_{max} \approx 2m_e c^2 \eta^2$. U praksi se često u formulu dodaju korekcije ljuske C i efekta gustoće δ :

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Zz^2}{A\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e \gamma^2 v^2 W_{max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right]. \quad (8)$$

Pomoću ove formule možemo izračunati gubitak energije miona tijekom prolaska kroz atmosferu ili kroz scintilator.

2 Detektor kozmičkih zraka

Za potrebe ovog rada i popularizacije znanosti, izrađen je mjerno-demonstracijski koincidenijski detektor kozmičkih zraka (slika 4). Uređaj je sastavljen prema shemi "Berkley Lab Cosmic Ray Detector" [14], a sastoji se od 2 zasebna detektora od kojih svaki ima po 3 glavna dijela: plastični scintilator, fotomultiplikator te elektronički sklop za obradu podataka.



Slika 4: Predstavljanje detektora povodom Svjetskog tjedna svemira u III. gimnaziji Osijek, 4. listopada 2022.

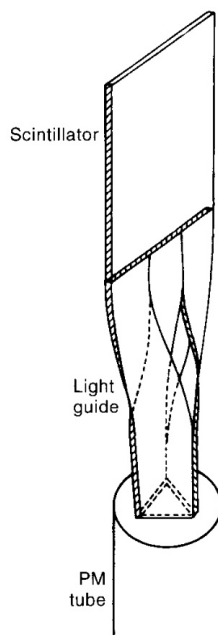
Ideja izrade detektora nastala je u studenom 2021. godine. Proces izrade započeo je opskrbom potrebnim dijelovima i komponentama.

2.1 Sustav za detekciju

Sustav za detekciju sastoji se od scintilatora, svjetlovoda te fotomultiplikatora. Proces izrade ovog sustava započinje oblikovanjem plastičnih scintilatora u željeni geometrijski oblik. Oni se mogu lako oblikovati i rezati pomoću skalpela, nakon čega je potrebno izbrusiti rubove. Izrezane scintilatore je zatim potrebno ispolirati i oprati, pri čemu je važno koristiti zaštitne rukavice jer masti i ulja s kože mogu oštetiti površinu scintilatora. Kako bi se smanjio utjecaj svjetlosti, scintilatori su obloženi u nekoliko slojeva aluminijske i crne zaštitne folije te dodatno crnim papirom. Scintilatori

su postavljeni paralelno jedan iznad drugog na međusobnoj udaljenosti od 10 cm. Oba scintilatora imaju jednake površine iznosa $A = 224 \text{ cm}^2$.

Svjetlost nastalu u scintilatorima do fotomultiplikatora vodi svjetlosni valovod. Zadaća svjetlovoda je prenijeti i sažeti svjetlost te ju dostaviti do rešetke fotomultiplikatora. Scintilator i svjetlovod spojeni su prozirnim dvokomponentnim epoksidalnim ljepljivom u položaju kao na slici 5a. Kako bi spoj što bolje prenosio svjetlost, rubovi scintilatora i svjetlovoda trebaju biti očišćeni i ispolirani. Kako ne bi došlo do velikih oštećenja plastika, koriste se vlažni brusni papiri sitnih granula abraziva.



(a) Shematski prikaz spoja scintilatora, svjetlovoda i fotomultiplikatora [11].



(b) Fotomultiplikator ET Enterprises 9780B.

Slika 5: Komponente sustava za detekciju

Fotomultiplikatori koji se koriste u postavu su tipa ET Enterprises 9780B s HVSW12AN bazama. Radi se o fotomultiplikatorima s bočnim prozorima promjera 29 mm koji za rad zahtijevaju ulazni napon između 1000 i 1250 V DC (slika 5b). Oni sadrže bialkalijsku fotokatodu najosjetljiviju u području plavog i zelenog spektra vidljivog zračenja te devet kružnih dinoda napravljenih od spoja antimona i cezija ($SbCs$). Bazama fotomultiplikatora dostavlja se ulazni napon od 5 V DC koji se pojačava na napon do 1250 V DC. Nazivna kvantna djelotvornost ovih fotomultiplikatora iznosi $QE = 22\%$.

2.2 Sustav za obradu podataka i koincidenzijska logika

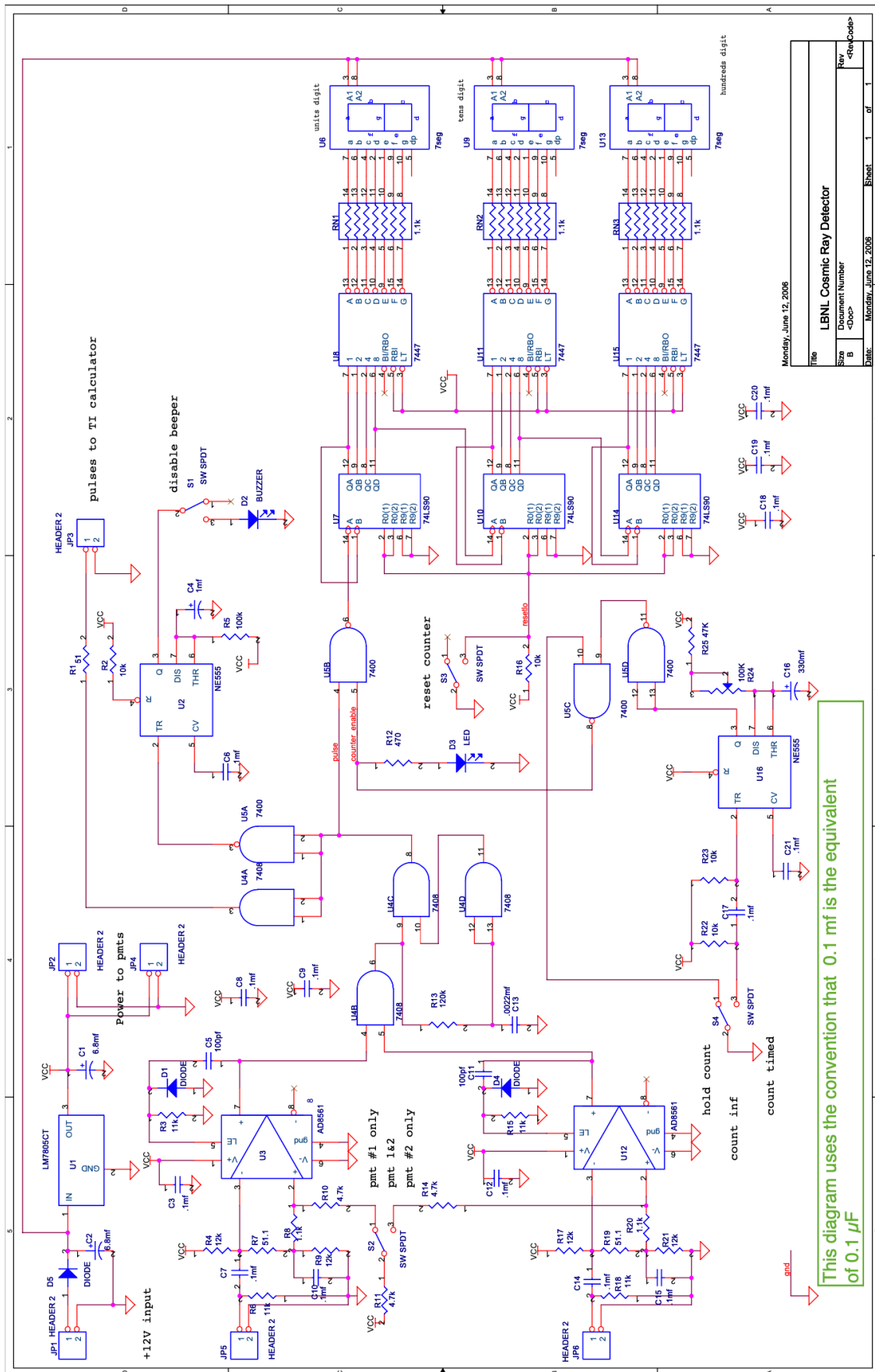
Izrada sustava za obradu podataka i njegovo usavršavanje bio je tehnički i vremenski najzahtjevniji dio ovog projekta. Sustav za obradu podataka sastoji se od printane pločice (eng. *printed circuit board*; kratica PCB) te više od 100 elektroničkih komponenti koje je trebalo zalemiti na pločicu prema shemi na slici 7. Nedostatak potrebnih mikročipova na tržištu, ali i nekih drugih elektroničkih komponenti oduljio je proces izrade.

Sustav detekcije dostavlja signal na printanu pločicu (PCB) za obradu podataka (slika 8). Ovaj sustav je multifunkcionalan te nudi širok spektar mogućih mjerenja. Prva funkcija pločice je opskrba fotomultiplikatora naponom. Detektor se spaja na ulazni napon od 12 V DC, a printana pločica dostavlja potrebnih 5 V DC svakoj od dvije fotomultiplikatorske jedinice.



Slika 6: Lemljenje elektroničkih komponenti na printanu pločicu za obradu podataka.

Glavni dio sustava za detekciju je koincidenzijska logika. Naime, signali koji dolaze iz fotomultiplikatora imaju relativno velik šum. Posebnost ovog detektora je sposobnost razaznavanja signala koji ostavlja mion od pozadinskog šuma. Kako bi se signal tretirao kao prolazak miona, signali iz gornjeg i donjeg scintilatora moraju biti većeg intenziteta od graničnog te moraju nastati u razmaku od maksimalno 800 nanosekundi [15]. Ovi uvjeti pospješuju točnost interpretacije signala. Dakle, detektor ima dva logička sklopa za primanje signala te sklop za usporedbu signala koji sadrži koincidenzijsku logiku.



This diagram uses the convention that 0.1 mf is the equivalent of 0.1 μ F

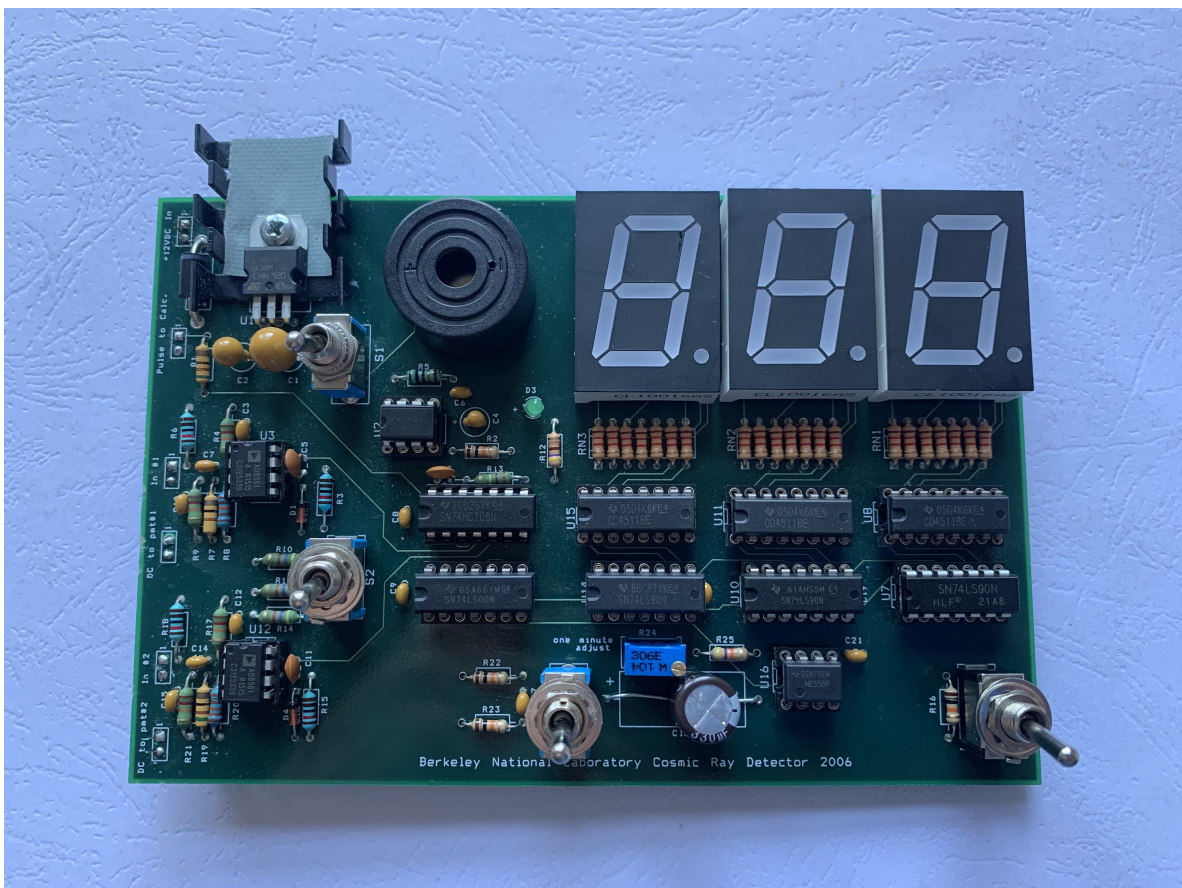
Monday, June 12, 2006

Title		LBNL Cosmic Ray Detector	
Size	Document Number	Rev	
B	<Doc>	<Rev>	<Code>
Page	Monday, June 12, 2006	Sheet	1 of 1

Slika 7: Shema sustava za obradu podataka [14].

Međutim, želimo li promatrati signal koji sadrži i pozadinski šum, kao i druge kozmičke čestice, sustav za detekciju omogućuje prikaz signala iz samo jednog od sustava za detekciju. Radi lakše analize pločica prikazuje broj očitanih čestica preko LED prikaznika, ali i pomoću zujalice.

Ostali logički sklopovi čije se komponente mogu vidjeti na slici 7 služe za prikaz rezultata sustava za obradu podataka pri koincidenzijskom načinu rada, ali i prilikom mjerenja s jednim od dva scintilatora. Također, postoji sustav za hlađenje elektronike te sustav koji omogućuje mjerenje tijekom točno određenog vremenskog perioda, koji se može regulirati pomoću promjenjiva otpornika. Završeni sustav za obradu podataka dan je na slici 8.

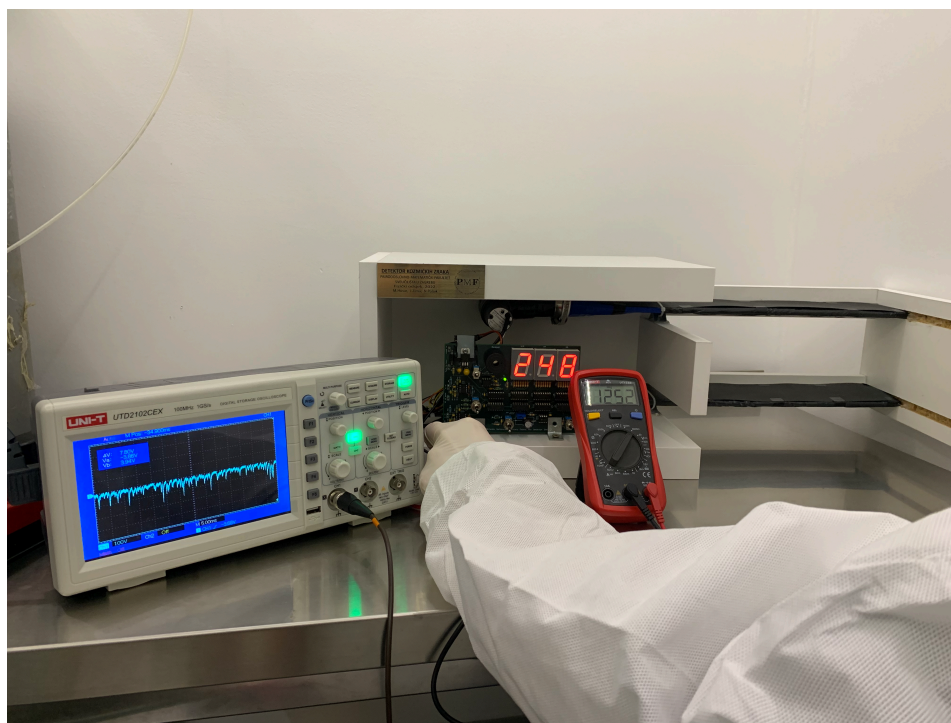


Slika 8: Završeni sustav za obradu podataka.

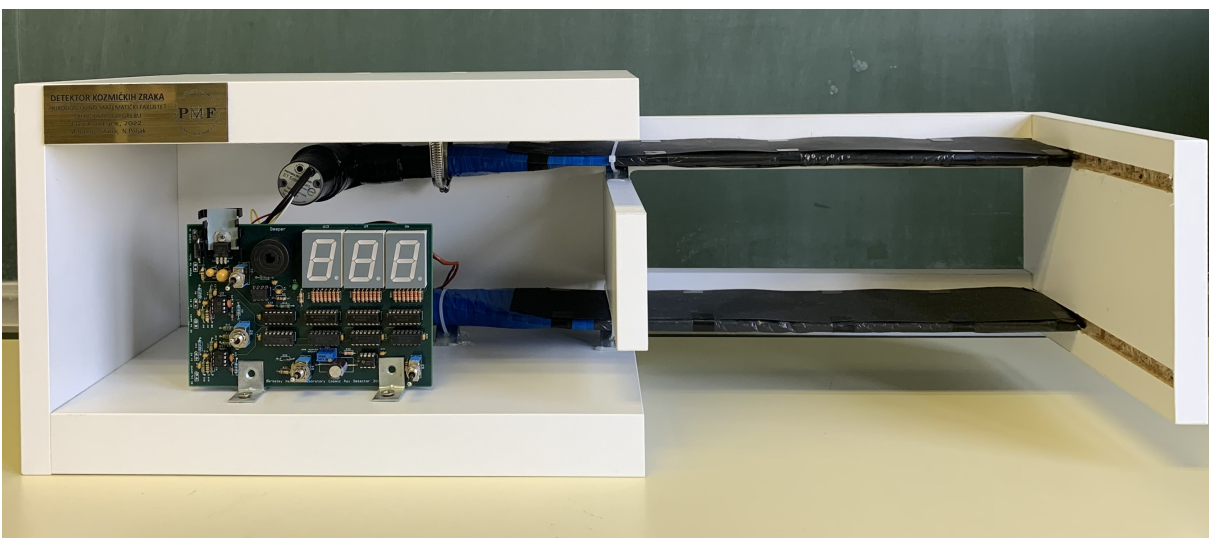
2.3 Kalibracija uređaja

Izrada detektora završila je u lipnju 2022. godine, nakon čega je uslijedila kalibracija uređaja koja je, uz neke preinake i usavršavanja sustava, trajala do siječnja 2023. godine. Kalibracija se vršila u čistoj sobi na Fizičkom odsjeku PMF-a kako bi se uklonila većina pozadinskih šumova.

Za provjeru rada koincidenzijske logike i brojača sustav za obradu podataka bio je spojen na generator signala. Generatorom signala i razdjelnikom imitiran je koincidenzijski signal, a prema njemu su namješteni naponi na bazama fotomultiplikatora. Nakon provjere rada koincidenzijske logike, morala se utvrditi granična amplituda signala koji bi se mogao klasificirati kao signal miona (ukoliko postoji njegov koincidenzijski signal). To se može učiniti pomoću osciloskopa. Utvrđena granična amplituda za dani napon na bazama fotomultiplikatora iznosi -2.7 V.



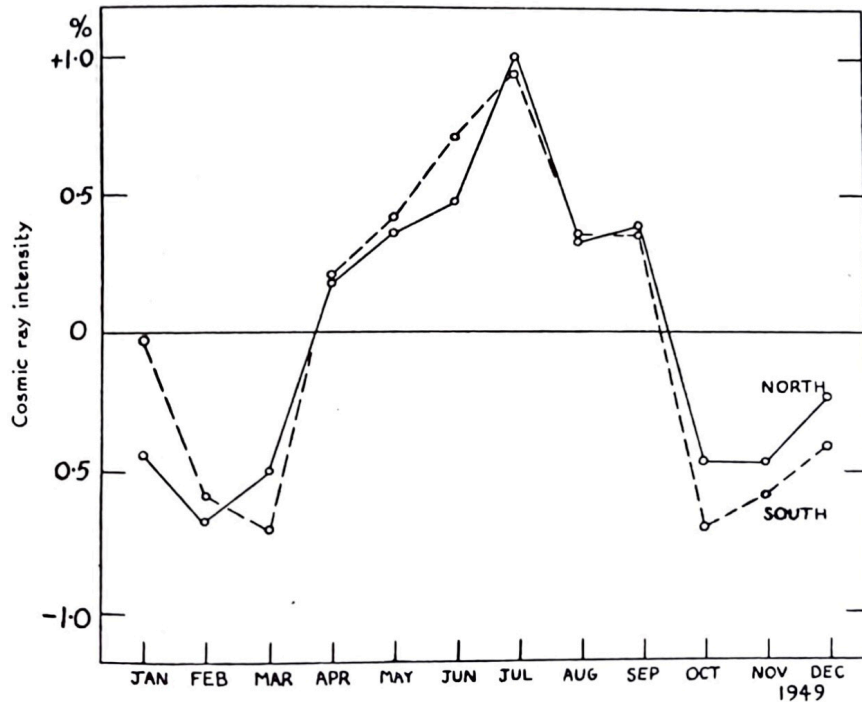
Slika 9: Kalibracija uređaja i napona na fotomultiplikatorima.



Slika 10: Samoizrađeni detektor kozmičkih zraka u konačnom izdanju.

3 Teorijska predviđanja utjecaja atmosferskih uvjeta na tok miona

Cijelo stoljeće istraživanja kozmičkih zraka dovelo je do spoznaja kako tok atmosferskih miona nije stalan, već ima fluktuacije koje mogu biti periodičke i neperiodičke. Periodičke fluktuacije rezultat su Zemljinog položaja u odnosu na Sunce te razlikujemo 3 vrste takvih varijacija: sezonske varijacije u periodu od jedne godine te dnevne solarne varijacije s periodima od 12 i 24 sata. Neperiodičke fluktuacije rezultati su barometarskih i temperaturnih efekata, ali i rjeđih efekata poput pojačane aktivnosti solarnih baklji i magnetskih oluja te geomagnetskih efekata [3, 16]. Velik utjecaj na detekciju toka miona ima i visina nastanka miona koja varira u vremenu. Također, vlaga u zraku, ali i zenitni kut θ pod kojim na Zemlju upadaju primarne kozmičke zrake imaju utjecaj na broj opaženih miona. Primjer izmjerenih sezonskih varijacija u intenzitetu kozmičkih zraka dan je na slici 11. Bitno je primijetiti da je uprosječna varijacija tijekom godine na skali jedan posto. Osnovna ideja ovog rada je pokazati utjecaj tlaka i temperature zraka na opaženi tok miona, dok se ostali utjecaji zanemaruju zbog nemogućnosti mjerenja tih efekata.



Slika 11: Sezonske varijacije u intenzitetu kozmičkih zraka [16].

3.1 Zakočno zračenje u atmosferi

Broj miona koji se može mjeriti na površini Zemlje usko je povezan s njihovim gubitkom energije u atmosferi. Kada nabijene čestice, kao što su mioni, prolaze kroz atmosferu, gube energiju ionizirajući okolnu materiju. No, veći utjecaj predstavlja zakretanje nabijene čestice u Coulombovom potencijalu jezgre. Zakretanjem miona od njegove početne putanje smanjuje mu se kinetička energija. Čestica koja se raspršuje na potencijalu može se elastično odbiti, ali se može i raspršiti uz emisiju fotona. Ovaj efekt poznat je kao zakočno zračenje (njem. *Bremsstrahlung*) i predstavlja značajni energetska gubitak pri gibanju nabijene čestice. Diferencijalni udarni presjek zakočnog zračenja miona σ na zasjenjenom potencijalu jezgre proporcionalan je kvadratu protonskog broja jezgre Z [17]:

$$\frac{d\sigma}{dv} = \alpha \left(2Z \frac{m_e}{M_\mu} r_e \right)^2 \left(\frac{4}{3} - \frac{4}{3}v + v^2 \right) \frac{\Phi(\delta)}{v}. \quad (9)$$

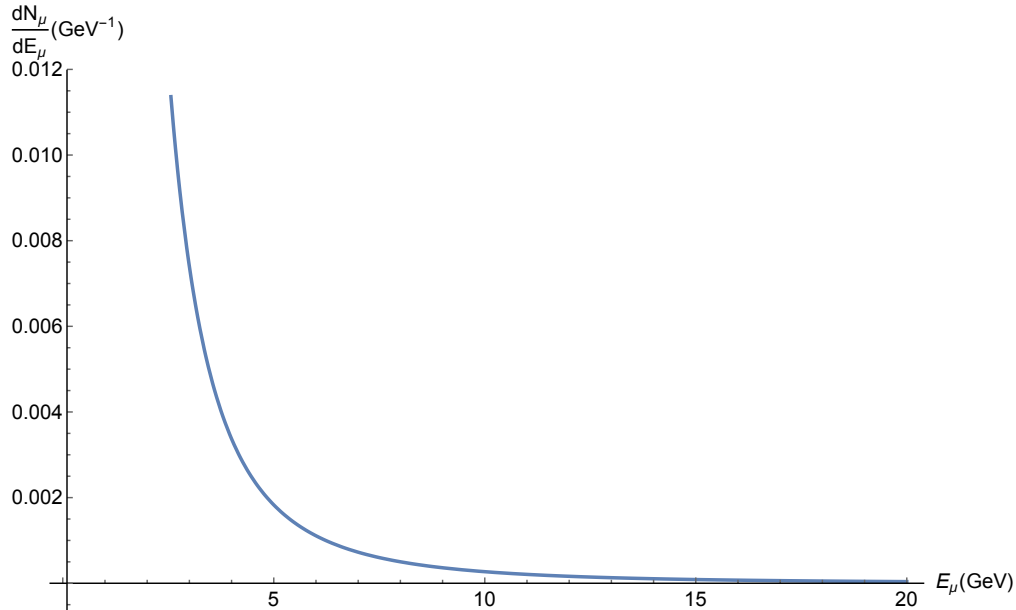
Drugim riječima, vjerojatnost raspršenja miona ovisi o gustoći atmosfere, a ona pak ovisi o temperaturi i tlaku zraka. Stoga, možemo postulirati da će varijacije u temperaturi i tlaku zraka imati utjecaj na tok miona, dok energetska gubitak možemo izračunati Bethe-Bloch jednadžbom (6).

3.2 Broj miona nastalih u atmosferi

Kao što je bilo opisano u uvodu, mioni u atmosferi najčešće nastaju raspadom π -mezona, ali nezanemariv je i utjecaj nastanka miona raspadom K -mezona. Promatramo li ponovno proces raspada piona, možemo utvrditi minimalnu i maksimalnu energiju miona nastalog u ovom raspadu. Zakon očuvanja energije i količine gibanja daje granicu $E_{\min}^{\mu} = E_{\pi} \left(m_{\mu}^2 / m_{\pi}^2 \right) \approx 0.57 E_{\pi}$, odnosno $E_{\max}^{\mu} = E_{\pi}$. Uračunamo li sada vjerojatnosti raspada π i K mezona, uz pretpostavku protonskog spektra iznosa $1.8 E^{-2.7} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{GeV}^{-1}$, možemo izračunati mionski spektar izrazom:

$$\frac{dN_{\mu}}{dE_{\mu}} \simeq 0.14 E_{\mu}^{-2.7} \left[\frac{1}{1 + \frac{1.1 E_{\mu} \cos \theta}{115 \text{ GeV}}} + \frac{0.054}{1 + \frac{1.1 E_{\mu} \cos \theta}{850 \text{ GeV}}} \right], \quad (10)$$

gdje prvi izraz reprezentira broj miona nastalih od piona, a drugi nastalih od kaona [6]. S grafa navedenog izraza danog na slici 12 za slučaj okomito upadnih miona ($\cos \theta = 1$) vidljivo je da za solarne kozmičke zrake (energija do 30 GeV) tok jasno opada s energijom, unatoč članovima koji se pojavljuju u zagradi izraza (10). Pad toka je dosta nagao, što znači da sustav za detekciju treba pažljivo namjestiti kako bi se izbjegao pozadinski šum i kako bi se mogao se jasno razlikovati od mionskog signala. Napominjemo da promjena upadnog kuta ne mijenja vidljivo tok miona pa nije prikazana na grafu.



Slika 12: Ovisnost broja okomito upadajućih miona o energiji.

3.3 Tlak zraka

Ovisnost toka miona o tlaku zraka uočena je još 1928. Iza ovog otkrića stoje Myssowsky i Tuwim [16]. Utvrđena je obrnuta proporcionalnost između toka miona i tlaka zraka. Poveća li se tlak zraka, mioni će gubiti više energije i raspadati se prije dolaska do površine [18]. Efekt nije jednostavno proporcionalan i može se sažeti izrazom [3, 19]:

$$\phi = \phi_0 \cdot e^{-\beta_\mu \Delta p}, \quad (11)$$

pri čemu ϕ označuje tok, ϕ_0 referentni tok miona, β_μ barometarski koeficijent, a $\Delta p = p - p_{\text{ref}}$ razliku tlaka određenog mjerenja i referentnog tlaka.

U području visokog tlaka zraka molekule zraka su bliže jedne drugima i gibaju se brže. Kvalitativno govoreći, takvi uvjeti pružaju veći otpor gibanju miona nego u uvjetima smanjenog tlaka zraka. Dakle, mioni moraju utrošiti više energije pri prolasku kroz atmosferu pri visokom tlaku, što povećava šansu raspada čestice, odnosno smanjuje tok na površini Zemlje zbog toga što se veći udio raspadnutih čestica raspada na većim visinama.

3.4 Temperatura zraka

3.4.1 Negativni temperaturni efekt

Povećanjem temperature zraka, atmosfera se širi, tj. povisuje joj se gornja granica te primarne kozmičke čestice reagiraju s atmosferom u njenim višim slojevima [18]. Zbog toga neki mioni nastaju u višim slojevima te se raspadaju prije dolaska do površine. Ova negativna korelacija između intenziteta mionskog toka i temperature zraka naziva se negativni temperaturni efekt, a prvi ga je opazio Blackett 1938. godine [16].

Kako bi se ovaj fenomen opazio, potrebno je mjeriti temperaturu i tlak zračnog sloja u kojem je vjerojatnost raspada piona najveća. Iz tih se podataka računa visina nastanka miona H . Takvi eksperimenti su rađeni pomoću meteoroloških balona, a utvrđena je ovisnost vrlo slična barometarskoj opisanoj u relaciji (11):

$$\phi = \phi_0 \cdot e^{\alpha_H \left(\frac{H-H_0}{H_0} \right)}, \quad (12)$$

pri čemu α_H označava temperaturni koeficijent, H visinu raspada piona, odnosno visinu nastanka miona, a H_0 označava referentnu visinu [18].

Teorijsko očekivanje ovog utjecaja na tok miona je $-0.16\%/^{\circ}C$, što je u skladu s eksperimentom Comptona i Turnera iz 1937. i njihovim rezultatom od $-0.18\%/^{\circ}C$ [16]. Međutim, Hess je 1939. otkrio da postoje sezonske varijacije ovog efekta te da on može biti i do dva puta jače magnitude zimi. U svakom slučaju, mjerenje ovog efekta je problematično zbog njegove male vrijednosti, kao i mogućnosti poznavanja temperature atmosfere u sloju u kojem nastaje mion. U tu svrhu pretpostavljamo izotermnost atmosfere ili barem korelaciju u temperaturi pri površini Zemlje i u višim slojevima atmosfere. Na taj način možemo koristiti temperaturna mjerenja na mjestu provedbe eksperimenta za provjeru temperaturne ovisnosti toka.

3.4.2 Pozitivni temperaturni efekt

Pozitivni temperaturni efekt opisuje povećanje broja sekundarnih kozmičkih čestica na površini kako se gustoća zraka smanjuje u području nastanka istih. U literaturi se navodi kvalitativni opis proučavanjem raspada π -mezona [16]. Naime, pioni nastaju reakcijom primarnih kozmičkih čestica s atomima u atmosferi i zatim se ili raspadaju u mione ili se mogu zarobiti u određenim nuklearnim procesima. Vjerojatnost tog procesa za pion određene energije proporcionalna je gustoći zraka kroz koji se giba. Manja temperatura zraka, a time i veća gustoća, povećava vjerojatnost hvatanja piona, što rezultira smanjenim intenzitetom toka miona na površini.

Također, razmišljamo li u kontekstu statističke fizike, povećanje temperature atmosfere uvodi energiju u sustav miona. Dodatna energija povećava brzinu miona te tako veći broj njih dolazi do površine gdje se mogu opaziti.

3.4.3 Kvantitativni opis temperaturnih utjecaja

Postoji nekoliko metoda kvantitativnog opisa temperaturnih efekata, od kojih je jedna integralna metoda. Integralnom metodom promatramo temperaturu duž cijele vertikalne putanje čestice, a ne samo fiksnu temperaturu na određenoj visini. Opis temperaturnih efekata integralnom metodom dan je kao [20, 21]:

$$\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_T = \int_0^P \xi(x)\Delta T(x)dx, \quad (13)$$

pri čemu $(\Delta I/I)_T$ označava normaliziranu devijaciju intenziteta kozmičkih zraka povezanu s temperaturnim efektom na danom atmosferskom tlaku p , $\Delta T(x)$ temperaturnu devijaciju na danom tlaku x , a $\xi(x)$ temperaturni koeficijent na istom tom tlaku. Prednost ove metode je što je najtočnija, međutim kako bi se ona provela, potrebno je znati temperaturu na različitim visinama u atmosferi, što tehnički nije moguće u okviru ovog rada.

U vidu svega navedenoga, kao kvantitativni opis svih opisanih temperaturnih efekata koristimo relaciju [19, 22]:

$$\frac{\phi}{\phi_0} = 1 - \alpha_\mu \cdot \Delta T. \quad (14)$$

Kao i prije, ϕ_0 označava referentni mionski tok, α_μ temperaturni koeficijent, a ΔT promjenu temperature.

Za kompletni opis atmosferskih utjecaja na tok miona uzimajući u obzir varijacije u tlaku i temperaturi, koristit ćemo produkt funkcija (11) i (14):

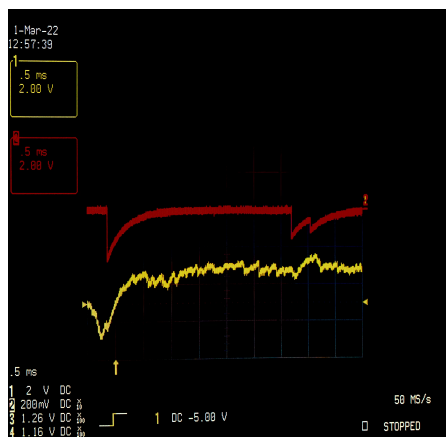
$$\frac{\phi}{\phi_0} = (1 - \alpha_\mu \Delta T) \cdot e^{-\beta_\mu \Delta p}. \quad (15)$$

4 Rezultati i mjerenja

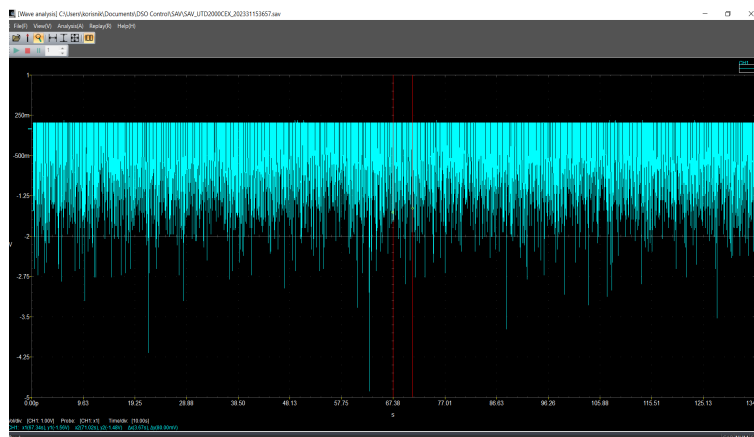
4.1 Obrada mjerenja

Za provjeru ispravnosti rada detektora signali su bili zasebno promatrani pomoću UNI-T UTD 2102CEX digitalnog osciloskopa. Granična naponska vrijednost koja je odabrana iznosi $-2.7V$, tj. to je vrijednost pri kojoj će minimalna vrijednost amplitude signala biti klasificirana kao mion. Postoje mioni čiji bi signal koji nastaje u fotomultiplikatoru bio slabijeg intenziteta, međutim promatraju se mioni viših energija od zadane granične energije. Ukoliko signal ima veću amplitudu od granične te postoji i njegov koincidencejski signal koji je nastao u razmaku od maksimalno 800 nanosekundi od prvoga, taj signal smatramo signalom atmosferskog miona.

Za provjeru broja očitavanja sprema se slika s digitalnog osciloskopa te se provjerava uz pomoć napisanog *Python* koda. Kodu se dostavlja jednodimenzionalna slika signala odrezana na amplitudi $-2.7V$ te se zatim svaki piksel slike pretvara u broj koji odgovara vrijednosti svjetline na skali od crne do bijele. Tako dobiveni numerički niz se obrađuje i broje se svi članovi niza različiti od 0. Taj broj se uspoređuje s onim očitanim na brojaču detektora. Ovom metodom utvrđena je točnost rada brojača i koincidencejske logike.



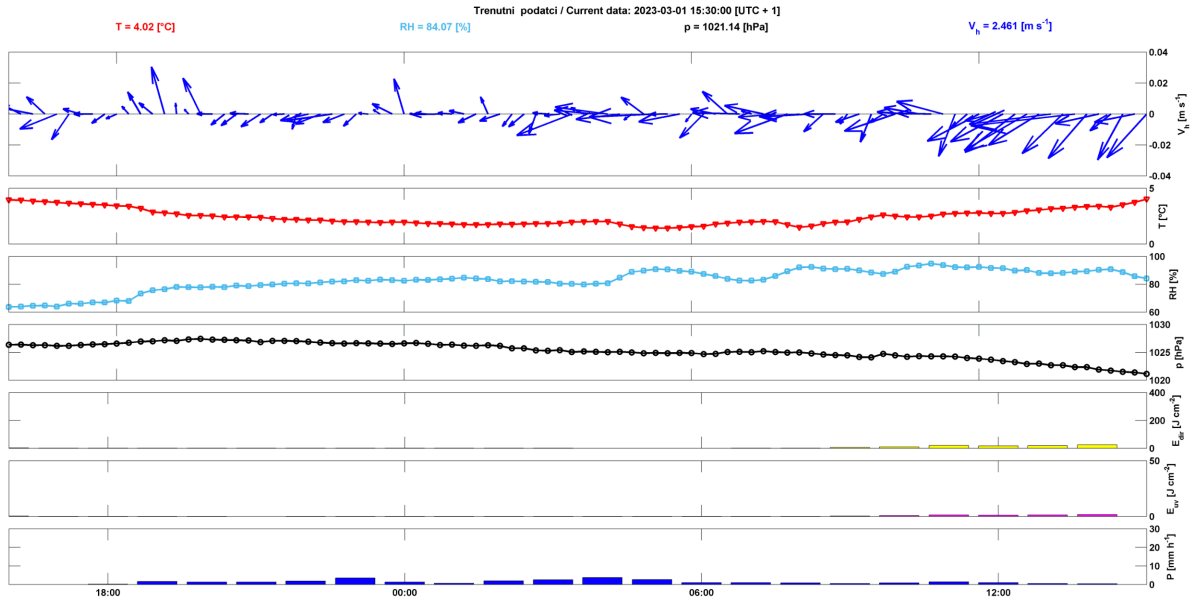
(a) Koincidencejski signal.



(b) Primjer zapisa signala s jednog od fotomultiplikatora u vremenskom intervalu trajanja 130 s.

Slika 13: Različiti prikazi mionskih signala s detektora.

Tijekom mjerenja toka miona očitani su i lokalni atmosferski uvjeti putem web-stranice Meteorološkog opservatorija Horvatovac Geofizičkog odsjeka PMF-a. Stranica nudi širok spektar podataka uživo, a ovaj opservatorij je odabran kao najbliži zgradi Fizičkog odsjeka PMF-a, gdje su vršena mjerenja toka atmosferskih miona. Prikaz primjera podataka s opservatorija dan je na slici 14.



Slika 14: Primjer prikaza podataka s web-stranice Meteorološkog opservatorija Horvatovac [23].

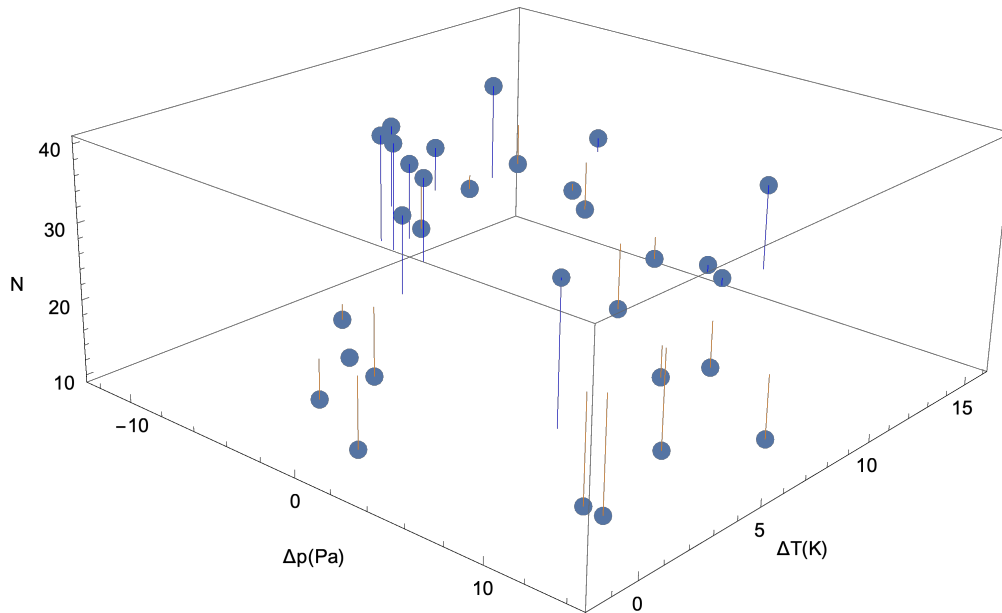
4.2 Rezultati i diskusija

Nakon mjesec dana izvršenih mjerenja skupljene su 32 trojke podataka o broju upadnih miona u ovisnosti o trenutnoj temperaturi i tlaku zraka. Zbog nepreciznosti uređaja svi su prikupljeni podatci imali sistematsku grešku koja je uzeta u obzir prilikom prilagodbe podataka. Prema teorijskim predviđanjima tok miona prati ovisnost danu ranije:

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = (1 - \alpha_\mu \Delta T) \cdot e^{-\beta_\mu \Delta p}, \quad (16)$$

pri čemu se prilikom prilagodbe dozvoljava proizvoljnost parametara α_μ i β_μ . Kako bi se prilagodba izvršila, potrebno je odabrati jednu točku koja će služiti za normalizaciju toka miona. Kako nemamo drugih uređaja koji će odrediti točan tok, koji uostalom ovisi i o poziciji gdje se mjeri, odabrana je jedna referentna točka u kojoj je tok bio jednak 24 miona po minuti.

U odnosu na tu referentnu točku određene su razlike u tlakovima i temperaturama za sva mjerenja. Prikupljeni podatci prikazani su na slici 15. Podatci su radi jasnoće spojeni s nevidljivom plohom koja označava referentnu točku. Stoga su podatci za koje je broj detektiranih miona $N > 24$ spojeni s plohom plavom, dok su oni za koje je $N < 24$ spojeni narančastom bojom.

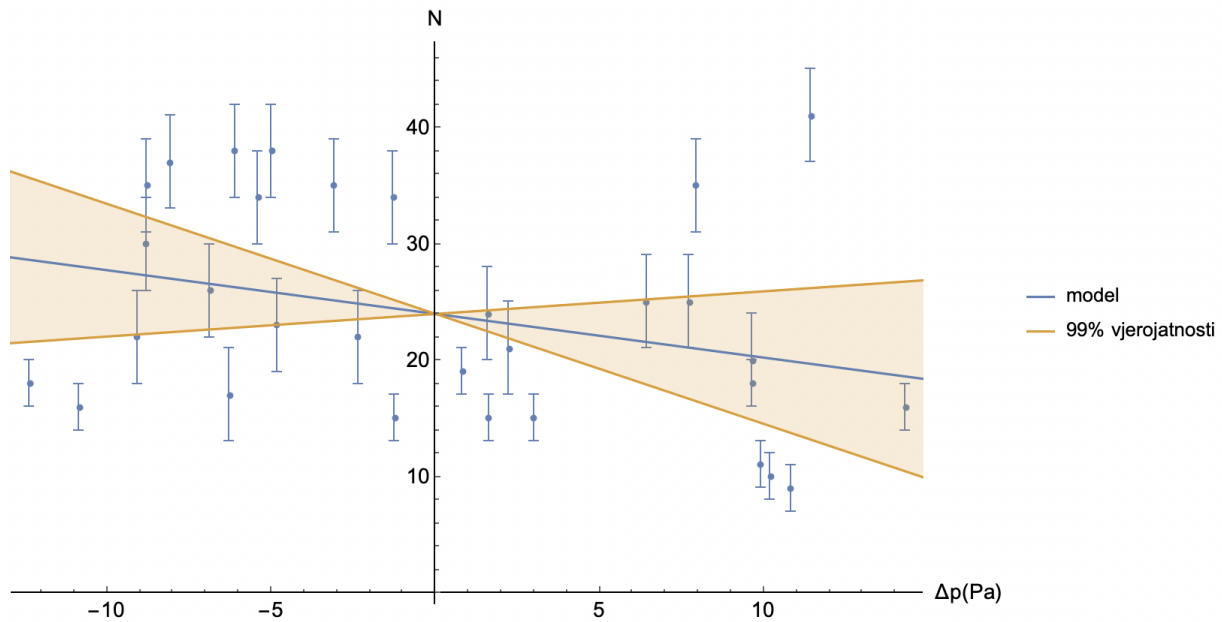


Slika 15: Podatci prikupljeni tijekom mjerenja. Podatci koji su spojeni s (nevidljivom) plohom $N = 24$ plavom bojom imaju $N > 24$, dok su podatci spojeni narančastom bojom oni koji imaju $N < 24$. x i y osi označavaju razliku u tlaku i temperaturi u odnosu na referentno mjerenje.

Dvoparametarska prilagodba na podatke izvršena je pomoću programskog paketa *Mathematica*. Rezultat prilagodbe daje parametar $\alpha_\mu = (0.04 \pm 0.08) \text{ K}^{-1}$, tj. pokazuje kako podatci ne iskazuju nikakvu statistički značajnu temperaturnu ovisnost. S druge strane, parametar $\beta_\mu = (0.017 \pm 0.008) \text{ Pa}^{-1}$, tj. statistički je značajan, iako dobivena ovisnost nije jaka. S obzirom na to da podatci ne iskazuju statistički značajnu ovisnost o temperaturi, izvršena je prilagodba samo na razlike u tlaku, tj.

$$\phi = 24 [\text{min}^{-1}] \cdot (1 - \beta_\mu \Delta p) , \quad (17)$$

pri čemu je ovisnost linearizirana s obzirom na malu vrijednost parametra β_μ . Prilagodba u programskom paketu *Mathematica* omogućuje određivanje parametra β_μ , kao i njegove greške i intervale u kojem je vjerojatnost očekivanja pojavljivanja izmjerenih podataka 99%. Podatci s greškama, kao i prilagodba te intervali 99% vjerojatnosti prikazani su na slici 16.



Slika 16: Eksperimentalni rezultati s pripadnim greškama. Plavom bojom označen je pravac dan jednađbom (17), predviđen teorijom, a smeđom bojom interval u kojem vjerojatnost pojavljivanja izmjerenih podataka iznosi 99%.

Vidljivo je da se izmjereni podatci kvalitativno slažu s predloženim teorijskim modelom. No, kako se i u teoriji radi o malim varijacijama u broju miona, za bolje određivanje numeričkih vrijednosti parametara α_μ i β_μ potrebno je više eksperimentalnih rezultata. Mjerni sustav bi se mogao optimizirati korištenjem fotomultiplikatora koji bi mogli raditi u duljim vremenskim periodima te bi se tako drastično povećao broj izmjerenih podataka.

5 Zaključak

Kako bi se mjerili atmosferski utjecaji na tok atmosferskih miona, izrađen je detektor kozmičkih zraka kojim su vršena mjerenja. Uz mjerenja toka miona, prikupljani su i lokalni atmosferski podatci preuzeti s meteorološke stanice u neposrednoj blizini mjesta mjerenja toka. Predložen je teorijski model u kojem su glavni parametri vrijednosti lokalne temperature i tlaka zraka, čiji su doprinosi sažeti jednadžbom (16). Obradom eksperimentalnih rezultata dobivene su vrijednosti za parametre α_μ i β_μ te se teorijski model simplificirao u jednostavnu ovisnost danu jednadžbom (17). Utvrđeno je kvalitativno slaganje eksperimentalnih rezultata s predloženom teorijom. Daljnjim prikupljanjem podataka planira se napraviti bolja procjena teorijskih parametara.

6 Zahvale

Tehničke zahvale

Iznimno zahvaljujem Meteorološkom opservatoriju Horvatovac Geofizičkog odsjeka PMF-a na pružanju mogućnosti obrade podataka. Zahvaljujem se i dipl. ing. Draženu Paunoviću na velikoj pomoći i savjetima u procesu sastavljanja detektora. Veliko hvala kolegi Janu Zimi na asistenciji i pomoći tijekom sastavljanja određenih komponenti detektora.

Osobne zahvale

Najdublju zahvalnost iskazujem svom mentoru izv. prof. dr. sc. Nikoli Poljaku na neiscrpoj podršci, savjetima i motivaciji tijekom posljednjih dvije godine zajedničkog rada. Zahvaljujem na beskonačnoj strpljivosti i predanosti!

Veliko hvala kolegicama Patriciji Kranjčić i Iskri Hrnčić za pomoć pri pronalaženju dijelova i sastavljanju određenih komponenti detektora, kao i za veliku podršku tijekom cijelog procesa izrade ovog rada. Veliko hvala Matei Gregurec na svoj beskrajnoj podršci i svim pravopisnim savjetima. Neizmjernu zahvalnost iskazujem svojim roditeljima i sestri.

Popis literature

- [1] Reinhard Schlickeiser. *Cosmic ray astrophysics*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [2] Ivica Picek. *Elementarne čestice*. Školska knjiga Zagreb, 1997.
- [3] Lev I Dorman. *Cosmic rays in the Earth's atmosphere and underground*, volume 303. Springer Science & Business Media, 2004.
- [4] Carnegie Institution of Washington. Department of Terrestrial Magnetism, Isabelle Lange, and Scott E Forbush. *Cosmic-ray results*. Carnegie Institution of Washington, 1957.
- [5] R. L. Workman et al. *Review of Particle Physics*. *PTEP*, 2022:083C01, 2022.
- [6] Todor Stanev. *High energy cosmic rays*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [7] Barry Holland, Zachary Spragg, Amanda Kubiak, and Laura Elliott. *Near-Space Muon Flux Detection and Analysis*, 05 2017.
- [8] Anthony Philip French. *Special relativity*. CRC Press, 2017.
- [9] The most common decay of the muon <<https://en.wikipedia.org/wiki/muon>>, 04/2023.
- [10] scintilacija. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. <<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=55063>>, Pristupljeno 4. 4. 2023.
- [11] Glenn F Knoll. *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons, 2010.
- [12] William R Leo. *Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how-to approach*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [13] Schematic of a photomultiplier tube coupled to a scintillator
URL<https://en.wikipedia.org/wiki/photomultiplier_tube>, 04/2023.
- [14] Michael Collier. *Assembly manual for the Berkeley lab cosmic ray detector*. 2002.
- [15] Colleen Twitty and Howard Matis. *Guide to using the Berkeley lab cosmic ray detector*. 2000.
- [16] J.G. Wilson. *Progress in Cosmic Ray Physics*. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1952.

- [17] Donald E Groom, Nikolai V Mokhov, and Sergei I Striganov. Muon stopping power and range tables 10 MeV–100 TeV. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 78(2):183–356, 2001.
- [18] John Poirier and T Catanach. *Atmospheric effects on muon flux at Project GRAND*. In *Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference*, volume 11, pages 348–351, 2011.
- [19] L Stevanato, G Baroni, SE Oswald, M Lunardon, V Mares, F Marinello, S Moretto, M Polo, P Sartori, P Schattan, et al. *An Alternative Incoming Correction for Cosmic-Ray Neutron Sensing Observations Using Local Muon Measurement*. *Geophysical Research Letters*, 49(6):e2021GL095383, 2022.
- [20] RRS De Mendonca, J-P Raulin, E Echer, VS Makhmutov, and G Fernandez. Analysis of atmospheric pressure and temperature effects on cosmic ray measurements. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(4):1403–1409, 2013.
- [21] Kaichi Maeda and M Wada. Atmospheric temperature effect upon the cosmic-ray intensity at sea level. *J. Sci. Research Inst.(Tokyo)*, 48, 1954.
- [22] RRS De Mendonça, CR Braga, E Echer, A Dal Lago, Kazuoki Munakata, T Kuwabara, Masayoshi Kozai, Chihiro Kato, M Rockenbach, NJ Schuch, et al. *The temperature effect in secondary cosmic rays (muons) observed at the ground: Analysis of the global muon detector network data*. *The Astrophysical Journal*, 830(2):88, 2016.
- [23] Meteorološki opservatorij Horvatovac Geofizičkog odsjeka PMF-a;
URL: <<https://geo10.gfz.hr/horvatovac.png>>.

7 Sažetak

Marko Husar

Mjerenje utjecaja atmosferskih uvjeta na tok miona samoizrađenim koincencijskim detektorom kozmičkih zraka

Kozmičke zrake već cijelo stoljeće služe kao prirodni izvori akceleriranih čestica. Razlikujemo primarne i sekundarne kozmičke zrake koje nastaju interakcijom kozmičkih čestica s atomima u visokim slojevima atmosfere. U takvim procesima nastaju mnoge čestice, a naglasak ovog rada je na proučavanju miona nastalih u atmosferi. Oni imaju povijesnu važnost u dokazivanju specijalne teorije relativnosti, a zanimljivi su i jer su elementarne čestice vrlo slične elektronima.

Okosnica ovog rada bila je izrada detektora miona koji se sastoji od dva scintilacijska plastična detektora za generiranje signala, fotomultiplikatora za njihovo pojačanje te elektroničke pločice za prijam i obradu podataka. Sustav za obradu podataka sadrži koincencijsku logiku koja uspoređuje signale iz dva scintilatora te utvrđuje je li nastali signal posljedica prolaska miona kroz sustave za detekciju. Izradu, testiranje i kalibraciju uređaja izvršio je autor.

Nakon izrade mjeren je tok atmosferskih miona te se promatrala ovisnost toka o lokalnoj temperaturi i tlaku zraka. Tok miona dodatno se kvantificirao spremanjem slike s digitalnog osciloskopa i obradom u programskom jeziku *Python*, a mjerenja atmosferskih uvjeta izvršena su u Meteorološkom opservatoriju Horvatovac. Mjerenjima su utvrđene ovisnosti pretpostavljene relacijama (11) i (14) te su parametri α_μ i β_μ prilagođeni teorijskim očekivanjima. Rezultati pokazuju kvalitativno slaganje s teorijom.

Ključne riječi: kozmičke zrake, mioni, atmosferski utjecaji, detektor kozmičkih zraka, koincencijska logika

8 Summary

Marko Husar

Measuring the impact of atmospheric conditions on the muon flux with a self-made cosmic ray coincidence detector

Cosmic rays have been used as natural sources of accelerated particles for a whole century. We can distinguish between primary and secondary cosmic rays, which are created by the interaction of cosmic particles with atoms in the upper layers of the atmosphere. Many particles are created in such processes, and this paper emphasizes the study of muons created in the atmosphere. They have historical importance in proving the special theory of relativity, and they are also interesting because they are elementary particles very similar to electrons.

The backbone of this work was the creation of a muon detector consisting of two scintillating plastic detectors to generate the signals, a photomultiplier for their amplification, and an electronic board for receiving and processing data. The data processing system contains coincidence logic that compares the signals from the two scintillators and determines whether the resulting signal is the result of a muon passing through the detection systems. The creation, testing, and calibration of the device were carried out by the author.

After the device was created, the flow of atmospheric muons was measured and the dependence of the flow on local temperature and air pressure was observed. The flow of muons was additionally quantified by saving an image from a digital oscilloscope and processing it in the programming language *Python*. Atmospheric conditions were measured at the Horvatovac meteorological observatory. The measurements established the dependencies assumed by the relations (11) and (14), and parameters α_μ and β_μ were adjusted to fit the theoretical expectations. The results show a qualitative agreement with the theory.

Keywords: cosmic rays, muons, atmospheric effects, cosmic ray detector, coincidence