



Gimnazija Kranj, Koroška cesta 13, 4000 Kranj; Inštitut Jožef Štefan, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana

MERJENJE ŠTEVILA KOZMIČNIH DELCEV MIONOV V ODVISNOSTI OD KOTA MED DETEKTORJEMA IN NAVPIČNICO

Področje: Fizika

Avtor: Maja Bešter

Mentor:izr. prof. dr. Rok Pestotnik

Somentor: Tatjana Mohar, univ. dipl. inž. kem. teh

Kranj, 2020

KAZALO

POVZETEK.....	4
ZAHVALA.....	6
1. UVOD.....	7
1.1 Namen.....	7
1.2 Teoretično ozadje.....	8
1.2.1 Kozmični delci.....	8
1.2.2 Mioni.....	12
1.2.3 Potrditev posebne teorije relativnosti na podlagi zaznavanja mionov.....	13
1.2.4 Kotna odvisnost števila mionov.....	15
1.2.5 Delovanje detektorja.....	16
1.3 Hipoteza.....	19
2. MATERIALI IN PRIPOMOČKI.....	20
3. METODE DE LA.....	21
3.1 Umeritvena krivulja.....	21
3.2 Merjenje števila mionov v odvisnosti od kota med detektorjema in navpičnico.....	22
4. REZULTATI.....	23
4.1 Umeritvena krivulja.....	23
4.2 Rezultati merjenja števila mionov v odvisnosti od kota med detektorjema in navpičnico.....	26
5. DISKUSIJA.....	28
5.1 Umeritvena krivulja.....	28
5.2 Merjenje števila mionov v odvisnosti od kota med detektorjema in navpičnico.....	28
5.3 Predlogi za nadaljnje raziskovanje.....	28
6. VIRI IN LITERATURA.....	29

POVZETEK

V raziskovalni nalogi »Merjenje števila kozmičnih delcev mionov v odvisnosti od kota med detektorjema in navpičnico« je predstavljeno merjenje števila mionov v odvisnosti od kota med detektorjema in navpičnico.

Mioni so osnovni delci, ki nosijo negativen osnovni naboj in imajo polovični spin. V svojih lastnostih so podobni elektronom, vendar so 207-krat težji ($m_{\mu} = 105,66 \text{ MeV}/c^2$) in zelo nestabilni, z razpolovno dobo 2,2 mikrosekunde. So najpogostejši delci med kozmičnimi delci, njihova pogostost pa znaša približno 1 mion na minuto na kvadratni centimeter na nivoju morske gladine.

Detektor uporabljen v nalogi temelji na dveh scintilatorjih (površina 168 cm^2), pritrjenih na vrtljivo prečko, ki leži na nepremični navpični prečki, pritrjeni na podlago (mizo). Opazujemo kot med navpičnico in detektorjema, katerega lahko prosto spreminjamo. Mioni v scintilatorju pustijo energijo v obliki elektromagnetnega valovanja oziroma fotonov, ki ga zaznata fotopomnoževalki. Razlog za uporabo dveh scintilatorjev in ne enega leži v dejstvu, da z uporabo več detektorskih enot zmanjšamo možnost zaznave lažnih signalov.

Dobljeni rezultati kažejo odvisnost med kotom merjenja mionov in številu zaznanih mionov. S povečevanjem kota meritve število zaznanih sunkov pada, odvisnost lahko opišemo s krivuljo funkcije $\cos^2 x$. Največ sunkov smo zaznali pri kotu 0° in sicer $0,19 \pm 0,02$ mionov na sekundo, pri kotu 90° to število upade na $0,03 \pm 0,01$ mionov na sekundo. Meritve potrjujejo našo hipotezo, da se z večanjem kota število zaznanih mionov manjša.

Raziskovalna naloga pa ne predstavlja samo odvisnosti števila zaznanih mionov od kota, temveč tudi potrjuje osrednjo idejo posebne teorije relativnosti, ki narekuje, da se delcem z izredno velikimi hitrostmi – primerljivimi s svetlobno hitrostjo – zaradi relativističnega učinka razpolovna doba podaljša. To se odraža v samem zaznavanju delcev.

ABSTRACT

In this research paper the measurement of angular distribution of muons is presented.

Muons are elementary particles, which carry a negative charge and have a spin of $\frac{1}{2}$. In these properties they are similar to electrons, however they are 207-times heavier ($m_\mu = 105,66 \text{ MeV}/c^2$) and are very unstable, with a half-life of 2,2 microseconds. They are the most abundant particles amongst cosmic rays, with one hitting the Earth's surface per square centimeter per minute at sea level.

The detector is scintillator based, made of two scintillator slabs (area of 168 cm^2) mounted on a simple casing, with which the user can set the detection angle to whichever desired. Two scintillators are used to lower the chances of detected signals being false. Since the detector is scintillator based, it means that the incoming interacting muons deposit an amount of energy in the scintillator in the form of electromagnetic radiation (photons), which is detected by photomultipliers.

As expected, results point to clear correlation between the angle of measurement and the number of detected muons which becomes smaller when the angle approaches the value of 90° . The most muons were detected at 0° ($0,19 \pm 0,02$ muons per second) and the least at 90° ($0,03 \pm 0,01$ muons per second). The number steadily falls, but does not completely resemble the expected function $\cos^2 x$. Overall, observations confirm our hypothesis which states, that less muons are measured at greater angles.

This paper not only presents angular distribution of detected muons but also proves the main concept of the special theory of relativity, where due to the velocity of particles traveling through space, their traveling through time slows down, increasing their half-lives by about a factor of 10. This manifests in the detection of particles itself.

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem svojemu mentorju dr. Roku Pestotniku za strokovno svetovanje, potrpežljivost in spodbudo pri raziskovanju.

1. UVOD

1. 1 Namen

Kozmični delci od začetka 20. stoletja igrajo pomembno vlogo v fiziki delcev, ki se ukvarja z gradniki snovi in interakcijami med njimi. Preučuje delce, ki so sestavine atomov in delce, ki so sestavine sestavin atomov. Poleg tega se osredotoča tudi na sipanja in druge visoko energetske fenomene, ki ustvarjajo najmanjše člane našega vesolja. Kozmični delci pa ne pripomorejo samo k razumevanju najmanjših gradbenih enot, temveč tudi k razumevanju tistih največjih kot so črne luknje, kvazarji, pulzarji, supernove in podobno, ki gradijo največji dinamični organizem – naše vesolje.

Namen te raziskovalne naloge je opazovanje odvisnosti števila zaznanih mionov od spreminjanja kota med detektorjema in navpičnico.

1.2 Teoretično ozadje

1.2.1 Kozmični delci

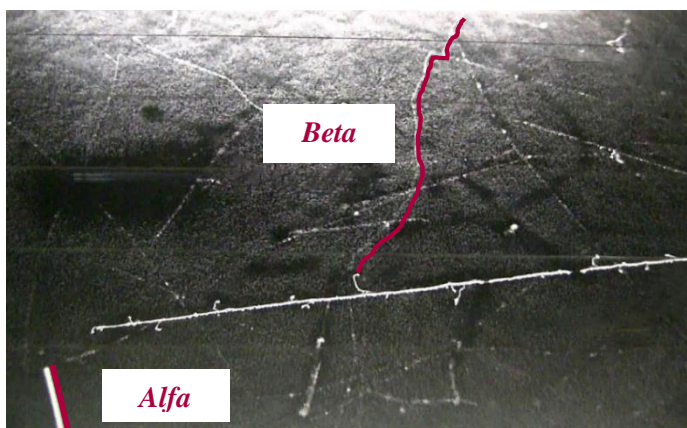
Že od 19. stoletja je znano, da ionizacijo¹ v atmosferi povzroča radioaktivnost, ki na Zemlji izvira iz naravnih radionuklidov², kot je na primer radon (Longair, 1992). Ker pa zgolj z Zemljino radiacijo ne moremo pojasniti zakaj se na primer elektroskop razelektri hitreje glede na vedno višji položaj v atmosferi, je leta 1912 avstrijsko-ameriški fizik Victor Hess uvedel pojem kozmičnih delcev, ki pojav utemeljijo kot odziv na zunajzemeljski vir radiacije.

Sedemnajst let po njihovem odkritju je obstoj kozmičnih delcev eksperimentalno dokazal Dmitrij Vladimirovič Skobel'cyn z uporabo meglične oziroma Wilsonove celice, ki je namenjena zaznavanju delcev ionizirajočega sevanja. Sestavljena je iz neprodušne posode, v kateri je podhlajena prenasočena vodna para (lahko tudi alkoholna), ki je blizu točke vrelišča oziroma kondenzacije. Vstopajoč alfa oziroma beta delec³ interagira z mešanico in paro kondenzira v kapljice vode, ki ustvarjajo vidno sled (na *sliki 2* dodatno označena z vijolično črto). Alfa delci puščajo značilne kratke, debele in ravne sledi, medtem ko beta delci ustvarijo daljše in tanjše sledi, z več odkloni. Ker gama žarki redko reagirajo s paro njihove sledi težko zaznamo z Wilsonovo celico (Clark, 2019).

Pozneje je ameriški fizik Carl David Anderson z lastno izpopolnjeno verzijo Wilsonove celice zaznal sledi delcev, ki so imeli enako maso kot elektron toda nasproten naboj. Njegovo odkritje, oznanjeno leta 1932, je potrdilo teoretično napoved švedsko-britanskega teoretičnega fizika Paula Diraca o obstoju pozitrona (antidelcu elektrona) in tako eksperimentalno dokazalo obstoj antimaterije. Štiri leta pozneje je Anderson v sodelovanju s svojim študentom Sethom Neddermeyerom med kozmičnimi delci odkril mion (Levine, 2009).



Slika 1: Nobelov nagrajenec za fiziko Victor Hess (1883 - 1964) v zračnem balonu nekje med letoma 1911 in 1912; vir: VF Hess Society, Schloss Pöllau/Austria (1913).



Slika 2: Sledi alfa in beta delcev v Wilsonovi celici; vir: Pic DuMidi (2014).

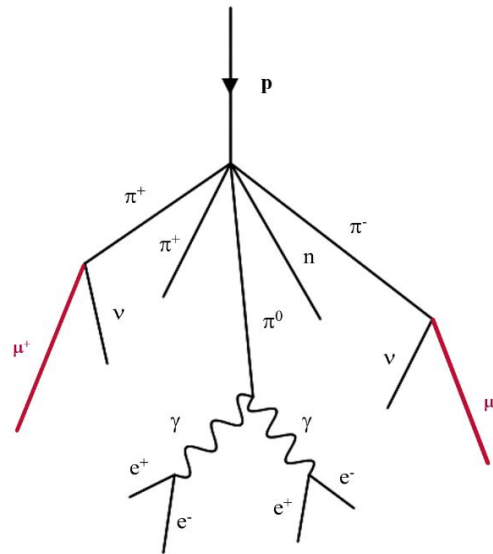
¹ Ionizacija je proces spremembe atoma v ion.

² Radionuklidi so jedra atomov, ki imajo radioaktivne lastnosti.

³ Alfa delci so helijeva jedra (dva protona in dva nevtrona), beta delci so elektroni, gama žarki pa so oblike elektromagnetnega valovanja visoke frekvence.

Kozmični delci so delci z visoko energijo (izražamo jo v eV – elektronvoltih), ki izvirajo tako iz naše galaksije kot iz daljnih (slednji imajo energije večje od 10^{15} GeV) (Rachen & et al., 1993), katerih zaradi izredno visokih energij magnetna polja njihovih domačih galaksij ne morejo zadržati (Davies & Dawson, 1997). Ogromne razdalje kozmični delci lahko prepotujejo zahvaljujoč svojim izrednim življenjskim dobam, ki presegajo milijone let (Sharma, 2008). Vir večine nizko energetskih delcev, ki zadevajo našo Zemljo, pa so Sončevi vetrovi.

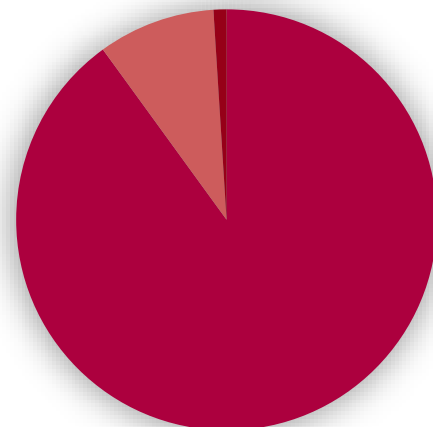
Glede na nastanek kozmične delce delimo na primarne in sekundarne. Primarni kozmični delci so nabiti delci, ki so jih pospešile ogromne energije astronomskih teles kot so črne luknje, nevtronske zvezde, pulzarji, supernove, kvazarji in podobno. Ti delci imajo energije od približno 1 GeV do 10^8 TeV⁴, mednje pa uvrščamo elektrone, protone, jedra helija, ogljika, kisika, železa in druga jedra, ki nastajajo v zvezdah. Ko primarni kozmični delci vstopijo v zemljino atmosfero, in na približno 10-15 km nadmorske višine interagirajo, oziroma trčijo, z molekulami zraka, nastanejo sekundarni kozmični delci. Temu pojavu pravimo »air shower« oziroma »ploha«. Delci z najvišjimi energijami lahko ustvarijo plohe v katerih nastane tudi do 10 milijard sekundarnih delcev čez površino 20 km² (CERN, 2019). Največ trkov je na nižjih stopnjah atmosfere, ker je tam povečana gostota zraka. Ti trki povzročajo nastanek jeder litija, berilija, bora in podobno. kot tudi nastanek protonov in antiprotonov ter fotonov (Beatty, Matthews, & Wakely, 2017). Razlike v naboju in masi delcev ter njihovim energijskim spektrom so povezane s pospeševalnim procesom in potovanjem delcev skozi vesolje (Institute, 2003).



p – proton, π - pion, n - nevtron, ν - nevtrini, μ - mion, γ - gama žarek, e - elektron

Slika 3: Ploha kozmičnih delcev; lastni vir.

Med kozmičnimi delci je približno 90% vodikov jeder (protonov), 9% alfa delcev ter 1% težjih elementov. Z nekaj izjemami, je kemijska kompozicija atomov med kozmičnimi delci enaka tisti v našem osončju (med njimi je manj vodika in helija, več litija, berilija in bora) (Institute, 2003).



■ Protoni ■ Alfa delci ■ Težji elementi

Graf 1: Kompozicija kozmičnih delcev; vir podatkov: NASA.

⁴ Te energije so lahko višje od tistih, ki so jih znanstveniki zmožni ustvariti v Hadronskem trkalniku v CERN-u.

Zanimivo pa je, da med kozmičnimi delci najdemo izredno malo elektronov. Ker električno polje težje premika zgolj delce z enim tipom naboja, astro-fizična telesa ustvarijo enaka števila protonov in elektronov. Med svojim medgalaktičnim potovanjem delci naletijo na mikrovalovno sevanje ozadja, oziroma prasevanje⁵, ki pri nabitih delcih povzroči inverzno Komptonovo sipanje, ko nabit delec interagira s fotonom iz bližnjega svetlobnega polja, in mu preda energijo. Tako se izgubi večina elektronov, ki potujejo med galaksijami. Do sipanja pride tudi s protoni in težjimi ioni, ampak je šibkejše (stopnja izgube energije je obratno sorazmerna z maso; protoni in drugi ioni so masivnejši od elektronov). Poleg tega Sončevo in Zemeljsko magnetno polje izloči delce z nižjo energijo ($E \approx 1 \text{ GeV}$) (Cotter, 2016).

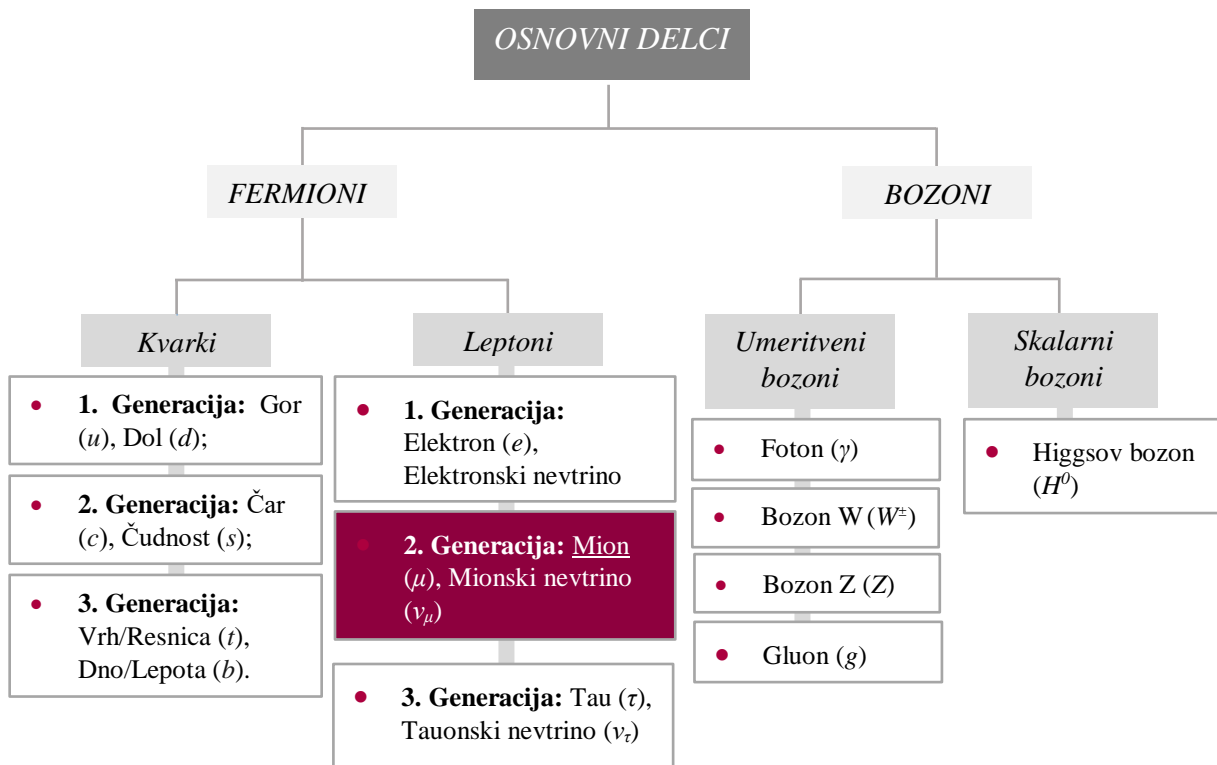
Zaradi magnetnega polja Zemlje, Sonca kot tudi Galaksije in celega vesolja je ugotavljanje izvora izredno težavno, ker se nabitim delcem v elektromagnetnem polju ukrivi pot. Poleg tega se zaradi vpliva gravitacije masovnih teles, ki poseljujejo kozmos oblika prostor-časa ukloni oziroma spremeni. Za iskanje izvorov kozmičnih delcev moramo zato imeti podatke o natančni obliki porazdelitve medzvezdne snovi in magnetnih polj (Vogrinčič, 2016). Na Zemljo kozmični delci prihajajo dokaj enakomerno z vseh strani, največ pa jih je ob polih, saj je tam zemljino magnetno polje najšibkejše. (Institute, 2003).



Slika 4: Aktivno jedro galaksije Centavrij A; vir: ESA (2009). Slika 5: Kvazar; vir: Pixabay (2018).

⁵ Prasevanje je elektromagnetno valovanje, ki zapolnjuje Vesolje, in izvira iz časa, ko je Vesolje postalo prozorno, bilo staro približno 379.000 let in imelo temperaturo približno 3000 K.

Kozmične delce (npr. elektrone, mione...) najdemo tudi v standardnem modelu, ki velja za enega izmed najzanesljivejših teoretičnih modelov lastnosti in interakcij delcev. Zajema močno in šibko jedrsko silo ter elektromagnetno silo. Vseeno pa standardnemu modelu manjka enoten opis gravitacije. Standardni model razdeli elementarne oziroma osnovne delce v dve glavni skupini – na fermione in bozone. Vsak delec ima poleg lastnosti, kot sta masa in električni naboj, tudi vrtilno količino, ki se imenuje *spin*. Delci, ki imajo polceli spin ($\pm 1/2$, $\pm 3/2$, $\pm 5/2$ itd.) so fermioni, in imajo vlogo gradnikov snovi. Delci, ki imajo celoštevilčni spin ($0, \pm 1, \pm 2$ itd.) pa se imenujejo bozoni, in so nosilci osnovnih interakcij. Ker standardnemu modelu manjka opis sile gravitacije, nekateri med umeritvene bozone štejejo tudi graviton, ki je zaenkrat še hipotetičen in še ni eksperimentalno dokazan. Kvarke in leptone se naprej delijo vsak v tri generacije⁶, umeritveni bozoni zajemajo le tri predstavnike, med skalarne bozone pa uvrščamo zgolj Higgsov bozon.

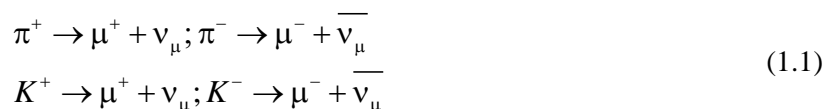


Slika 6: Osnovni delci Standardnega modela; lastni vir.

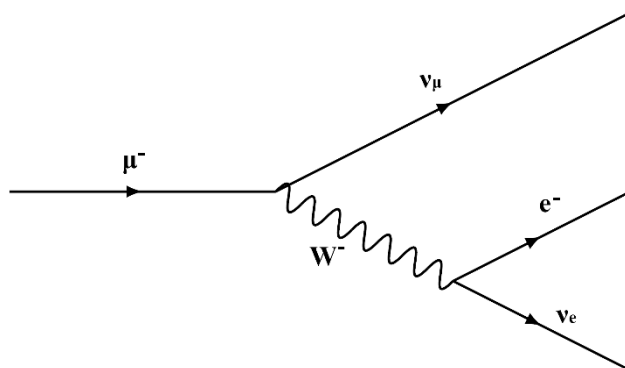
⁶ Med generacijami se delci razlikujejo po kvantnih številih okusa (opis značilnosti delca ter njegovih stanj) in masi, njihove interakcije pa so identične.

1.2.2 Mioni

V raziskovalni nalogi smo se osredotočili na mione, ki spadajo med leptone oziroma fermione. Spadajo med najpogostejše produkte razpadov sekundarnih kozmičnih delcev, njihova pogostost pa je 1 mion na kvadratni centimeter površine na minuto na nivoju morske gladine (Davies & Dawson, 1997). So osnovni delci, ki nosijo negativen naboj in imajo polovični spin, nanje pa vplivajo elektromagnetna, šibka jedrska in gravitacijska sila. Njihova masa znaša približno $105,658 \text{ MeV}/c^2$, in je 207-krat večja od mase elektronov ($m_e = 0,511 \text{ MeV}/c^2$). Poleg tega so mioni zelo nestabilni⁷ in imajo razpolovni čas⁸ $2.2 \mu\text{s}$ (razpolovna doba elektronov naj bi bila večja od $6.6 \cdot 10^{28}$ let (Agostini et al., 2015)). Po dveh mikrosekundah torej število tisočih mionov upade na polovico – petsto (po naslednjih dveh mikrosekundah na dvesto petdeset in tako dalje). Mioni nastanejo kot produkt razpada pionov in kaonov, ki so sekundarni kozmični delci⁹:



Po nastanku imajo mioni večinoma energijo 6 GeV, od teh 2 GeV energije izgubijo na poti do zemljinega površja, kamor potujejo z 99.4% svetlobne hitrosti¹⁰ (Tatum, 2014). Njihov najpogostejši način razpada je na mion nevtrino (ν_μ) in W bozon. Slednji nato razpade še na elektron (e) in na elektron nevtrino (ν_e), pri tem pa se ohranjata naboj in okus delcev (Taylor & et al., 2008).



Slika 7: Feynmanov diagram razpada miona; lastni vir.

⁷ V letu se jim življenjski čas podaljša za relativistični faktor gama.

⁸ Razpolovni čas oziroma razpolovna doba ($t_{1/2}$) je način opisovanja količin, ki eksponentno upadajo. V jedrski fiziki se izraz uporablja za časovni okvir, v katerem se število atomskih jeder zmanjša na polovico začetne vrednosti. Razpolovni čas je konstanten za celoten čas razpada.

⁹ Na zapisu razpada mionov in kaonov imajo nekatere oznake pozitivno (+) notacijo in nekatere negativno (-). Če je delec v najosnovnejši obliki, je notacija enaka naboju (na primer μ^- je navaden mion z negativnim nabojem njegov antidelec μ^+ pa ima nasprotni oziroma pozitivni naboj). Največ je negativno nabitih mionov.

¹⁰ Svetlobna hitrost (oznaka c) v vakuumu znaša $299\,792\,458 \text{ km/s}$, v zraku približno $299\,700\,000 \text{ km/s}$.

1.2.3 Potrditev posebne teorije relativnosti na podlagi zaznavanja mionov

Več kot 200 let so za opisovanje gibanja telesa veljale Newtonove enačbe iz leta 1687, objavljene v njegovem delu *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*¹¹. Njihove pomanjkljivosti je šele leta 1905 odkril in dopolnil nemški fizik in matematik Albert Einstein s svojo teorijo relativnosti¹² v članku *O elektrodinamiki gibajočih se teles*.

Bistvo posebne teorije relativnosti leži v dejstvu, da absolutni prostor in čas kot toga okvirja realnosti ne obstajata, temveč sta dinamična. V klasičnem smislu razpolovni čas definiramo kot čas v katerem se začetno število delcev neke snovi razpolovi. Iz tega sledi, da bi mioni, ki imajo razpolovno dobo $2,2 \mu\text{s}$ v tem času razpadli na polovico začetne populacije in s hitrostjo 99,4% svetlobne hitrosti prepotovali 660 metrov pred razpadom. V tem primeru, mioni ne bi dosegli naših detektorjev, saj najvišje plasti atmosfere, kjer mioni nastajajo, segajo tudi 11 kilometrov nad površjem.

Posebna teorija relativnosti drži samo pod določenim pogojem in sicer v Minkowskovem prostorčasu oziroma četvernem prostoru. Tega sestavljajo tri prostorske dimenzije in ena časovna, razdalje med točkami pa so invariantne oziroma neodvisne od opazovalca.

Ker pa vemo, da jih na površju Zemlje zaznamo, tako tudi vemo, da ta razlaga ne drži. Mioni namreč zaradi svoje izjemne hitrosti in relativistične narave prostor – časa uberejo relativističen pristop. Preprosto povedano, hitreje potujejo skozi prostor kot skozi čas in se jim zato razpolovni čas podaljša na

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx 2,01 \cdot 10^{-5} \text{ s} \quad (1.3)$$

Kjer je t_0 njihov razpolovni čas v mirovanju ($2,2 \mu\text{s}$) in t njihov relativistični razpolovni čas pri hitrosti v (99,4% c).

$$s = vt \approx 5,99 \cdot 10^3 \text{ m} \approx 6,0 \text{ km} \quad (1.4)$$

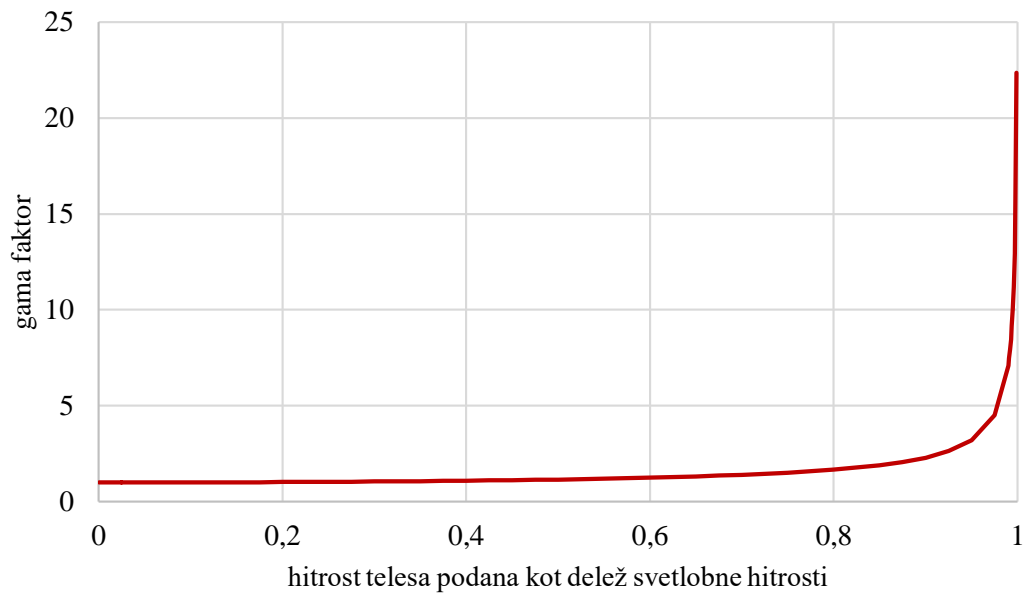
Iz tega sledi, da mioni z 99,4% svetlobne hitrosti prepotujejo približno 6 kilometrov pred razpadom, torej je že samo merjenje mionov potrditev posebne teorije relativnosti.

¹¹ *Slo. Matematična načela naravoslovja.*

¹² Leta 1905 Einstein matematično opiše gibanje s konstantno hitrostjo in smerjo, leta 1915 v Posebni teoriji relativnosti pa doda še pospešeno gibanje.

Iz enačbe 1.7 za razpolovni čas t oziroma gama faktor γ vidimo naslednjo odvisnost:

Odvisnost vrednosti gama faktorja od hitrosti telesa

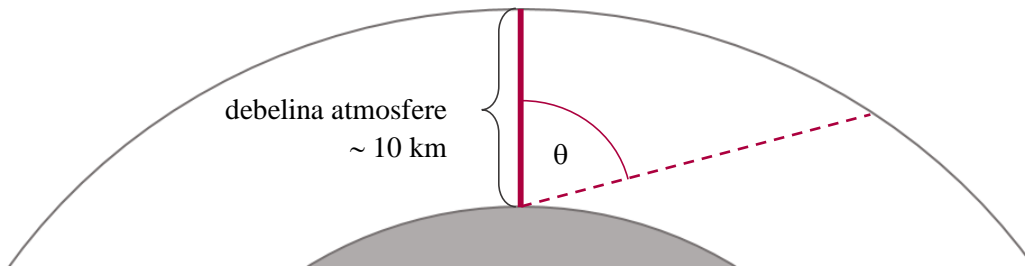


Graf 2: Odvisnost vrednosti gama faktorja od hitrosti telesa.

Kot je razvidno iz enačbe za relativistično podaljšanje časa, se telesom ta učinek bistveno pozna pri izredno visokih hitrostih, primerljivih s svetlobno hitrostjo. Teoretično gledano bi torej telo z neko maso in hitrostjo svetlobne hitrosti občutilo neskončno časovno podaljšanje.

1.2.4 Kotna odvisnost števila mionov

Največ kozmičnih delcev zaznamo v zenitu, število pada z manjšanjem zenitne razdalje oziroma zenitnega kota θ^3 . Mioni nastajajo v zgornjih plasteh atmosfere in razpadajo na svoji poti do površja. Tisti, ki vstopajo ob zenitu, prepotujejo najkrajšo pot in so zato najbolj številni, medtem ko večina tistih, ki prihajajo pod kotom 90° , razpade na svoji poti pred zaznavo. Odvisnosti se najbolj približa funkcija \cos^2x .



Slika 8: Pot mionov pred zaznavo; lastni vir.

Delci, ki v atmosfero vstopajo ob večjem kotu zaradi manjše zračne gostote manjkrat interagirajo in povzročajo nastanek manjšega deleža mionov.

Ker odvisnost ustreza Poissonovi porazdelitvi standardno napako δ_x oziroma koren variance določimo:

$$\delta_x = \frac{\sqrt{\Sigma x}}{N_{meritev}} \quad (1.5)$$

Kjer je Σx število vseh zaznanih sunkov in $N_{meritev}$ število ponovitev meritev. Vidimo, da se relativna napaka z večjim številom ponovitev meritev manjša.

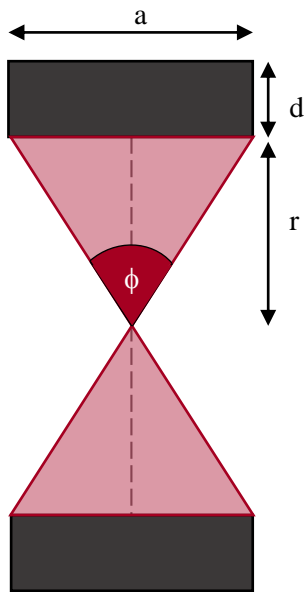
Lahko določimo še slučajno število koincidenc po enačbi:

$$N_{12} = N_1 N_2 \tau \quad (1.6)$$

kjer je N_{12} število slučajnih koincidenc, N_1 in N_2 sta število sunkov na posameznih detektorjih in τ širina časovnega razmika.

¹³ Zenitna razdalja oziroma zenitni kot θ je kot med smerjo proti zenitu in proti izbrani točki na nebu.

Seveda pa to tudi pomeni, da pri postavitvi, v kateri je kot med navpičnico in detektorjema na primer 90° , ne zaznavamo samo mionov, ki prihajajo po navpični trajektoriji temveč manjši kotni interval¹⁴.



Slika 12: Skica kotnega intervala pod katerim zaznavamo mione.

Napaka pri kotu je približno:

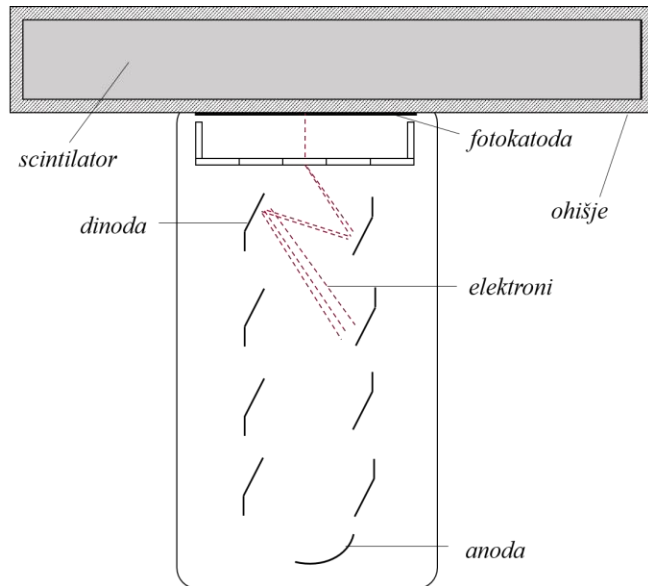
$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{0,5 \cdot a}{0,5 \cdot r}\right) \approx 26,6^\circ \quad (1.7)$$

Vidimo tudi, da se z večjo razdaljo med detektorjema kot merjenja in tako napaka tudi manjša.

¹⁴ Kotni interval lahko določimo za pogled od spredaj oziroma zadaj kot tudi s strani. Zaradi različnih dolžin se kotni intervali razlikujejo. V nalogi bomo upoštevali le ta, ki je opisan v besedilu oziroma sprednji.

Pri zaznavanju izredno majhnih delcev, kot so tisti v standardnem modelu, teh pravzaprav nikoli ne vidimo, temveč vidimo neko posledico njihove prisotnosti, kot je na primer elektromagnetna radiacija – fotoni. Te v našem primeru zaznavamo s scintilatorjem, ki je v našem primeru organska plastika z dodatkom scintilacijskega materiala. Scintilator je snov z lastnostjo luminescence, kar pomeni, da izseva energijo, ki jo prejme iz sevanja (elektromagnetno sevanje, alfa in beta delci...) v obliki vidne svetlobe. Če je ta izsevana takoj po absorpciji (po približno 10^{-8} sekunde) je to proces fluorescense, če pa je izsev zakasnen pa proces fosforescence.

Ko mion vstopi v plastični scintilator vzbudi atome materiala tako, da ti oddajo energijo v obliki vidne svetlobe, ki jo zaznata fotopomnoževalki. Vstopajoči mioni nosijo energije reda nekaj GeV. Če gostoto plastike ocenimo kot približno enako gostoti vode (1 g/cm^3), ioni v njej izgubijo približno 1 MeV/cm materiala (scintilator ima debelino 2 cm , torej pri prehodu skozenj izgubijo približno 2 MeV). Ta energija se pretvori v nekaj 1,000 do 10,000 fotonov. Nekaj teh fotonov zaznamo, nekaj pa se jih absorbira v materialu.



Slika 13: Fotopomnoževalka pritrjena na scintilator; lastni vir.

Priključen vir visoke napetosti v fotopomnoževalkah ustvarja potencialno lestev. Ko foton zadane fotokatodo, zaradi fotoefekta¹⁵, izbije elektron. Ta se zaradi napetosti usmeri in pospeši do prve dinode, kjer izbije iz dinode nekaj elektronov. Zaradi napetostne razlike se pospešijo do druge dinode, kjer se postopek ponovi z več elektroni, ki se na anodi zberejo v merljiv tok.

Priključen vir visoke napetosti v fotopomnoževalkah ustvarja potencialno lestev. Ko foton zadane fotokatodo, zaradi fotoefekta¹⁵, izbije elektron. Ta se zaradi napetosti usmeri in pospeši do prve dinode, kjer izbije iz dinode nekaj elektronov. Zaradi napetostne razlike se pospešijo do druge dinode, kjer se postopek ponovi z več elektroni, ki se na anodi zberejo v merljiv tok.

¹⁵ Fotoefekt je fizikalni pojav, pri katerem elektromagnetno valovanje dovolj kratke valovne dolžine iz kovine izbije elektrone. Prvi ga je matematično opisal Albert Einstein leta 1905 v članku »O nekem hevrstičnem stališču, ki zadeva nastanek in spremembo svetlobe.«

1. 3 Hipoteza

Na podlagi predstavljenih dejstev smo si za raziskovalno nalogo postavili hipotezo: *»Največ mionov bomo zaznali pod kotom 0° med detektorjema in navpičnico.«*

2. MATERIALI IN PRIPOMOČKI

V raziskovalni nalogi smo uporabili:

- 2 scintilatorja,
- 2 fotopomnoževalki,
- ogrodje za detektor (podlaga, navpična prečka, vrtljiva prečka in vijaki),
- vir napetosti,
- osciloskop WaveJet Touch 354; Teledyne Lecroy,
- zakasnitvena enota,
- števec signalov,
- enota za zaznavanje koincidence.

3. METODE DELA

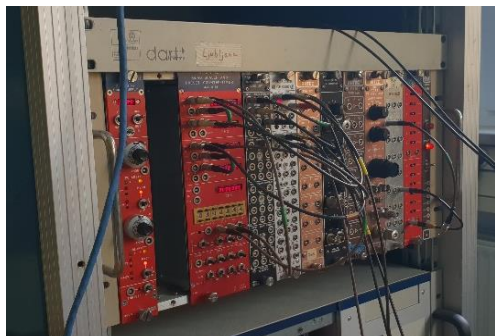
3.1 Umeritvena krivulja

Bistvo umeritvene krivulje je spoznavanje delovanja neke aparature. V raziskovalni nalogi smo to krivuljo ustvarili z merjenjem signalov pri različnih napetostih.

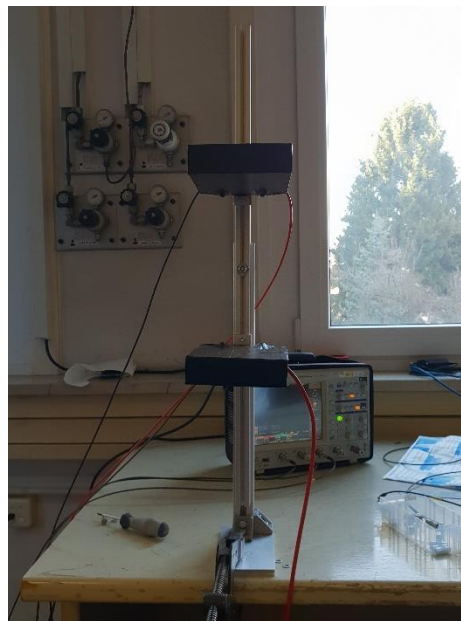
Merili smo na območju od 500 V do 900 V (višje napetosti zaradi občutljivosti fotopomnoževalk nismo uporabili).

Merili smo z detektorjem opisanim v 1.2.3 *Delovanje detektorja* in sicer pod kotom 0° z navpičnico. Scintilatorja sta imela dolžino 10 cm in širino 10 cm ter višino 3 cm. Fotopomnoževalke so dimenzij 2cm v širino in 2cm v dolžino, pritrjene so tesno ob stransko ploskev scintilatorjev. Napaka širine detektorja je tako 1,08 cm. Razdalja med posameznima scintilatorjema je bila 20 cm.

Meritve so bile opravljene v Ljubljani, ki leži na nadmorski višini približno 295 m.



Slika 15: Zakasnitvena enota, števec signalov in koincidenčna enota; lastni vir.

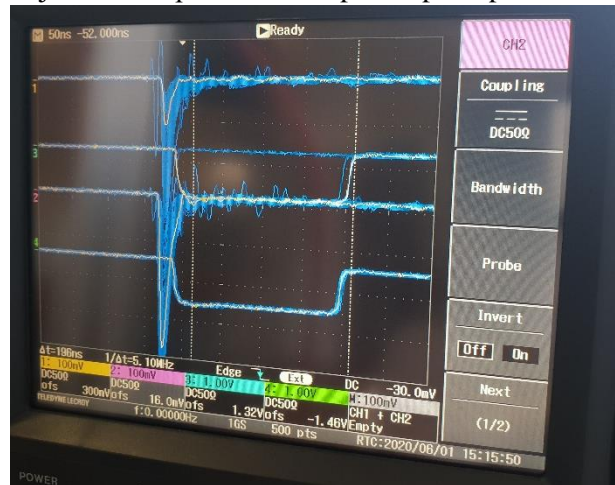


Slika 14: Detektor; lastni vir.

3.2 Merjenje števila mionov v odvisnosti od kota med detektorjema in navpičnico

Meritve števila mionov v odvisnosti od kota med detektorjema in navpičnico smo opravili pri napetosti 900 V, merili smo 100 sekund. Večino šuma smo izločili z višanjem praga, ki tako prefiltrira sunke, ki nimajo dovolj visokih energij.

Ker so dogodki neodvisni, je za natančne rezultate vseeno, če merimo v daljšem časovnem intervalu oziroma v več krajših. Pri nespremenjeni napetosti smo spreminjali kot in izmerili število zaznanih sunkov za kote 0° , 10° , 20° , 30° , 40° , 50° , 60° , 70° , 80° in 90° .



Slika 16: Zaznani signali na osciloskopu. Po logiki omenjeni v 1.2.5 Delovanje detektorja koincidence predstavljajo signali, ki se prekrivajo; lastni vir.

4. REZULTATI

4.1 Umeritvena krivulja

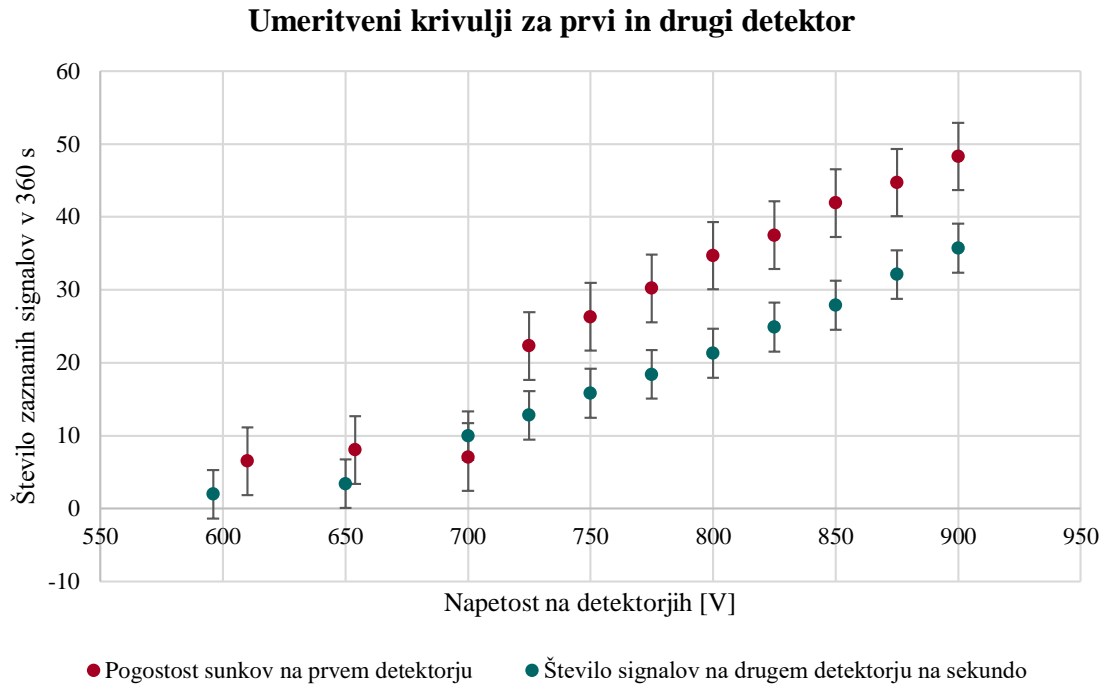
Čas merjenja je 6 minut, napaka napetosti je približno 1 volt, razdalja med detektorjema je 20 cm.

<i>Napetost na prvem detektorju [V]</i>	<i>Pogostost sunkov na prvem detektorju</i>
610	2341 ± 48
650	2893 ± 53
700	2543 ± 50
725	8038 ± 90
750	9451 ± 97
757	10873 ± 104
800	12477 ± 112
825	13509 ± 116
850	15100 ± 122
875	16104 ± 127
900	17418 ± 132

Tabela 1: Umeritvena krivulja za prvi detektor.

<i>Napetost na prvem detektorju [V]</i>	<i>Pogostost sunkov na drugem detektorju</i>
610	708 ± 27
650	1227 ± 35
700	3611 ± 61
725	4613 ± 68
750	5701 ± 76
757	6638 ± 81
800	7683 ± 88
825	8975 ± 95
850	10060 ± 100
875	11540 ± 107
900	12861 ± 113

Tabela 2: Umeritvena krivulja za drugi detektor.



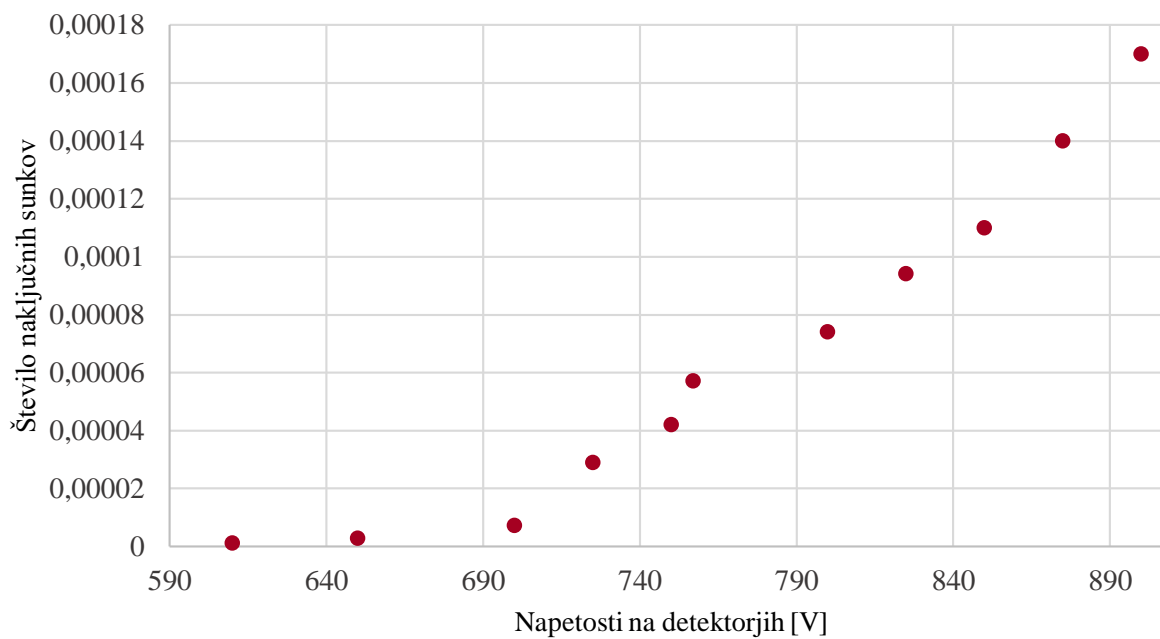
Graf 3: Umeritveni krivulji za detektor.

Število slučajnih sunkov je glede na enačbo 1.6 (upoštevamo časovni razmak 100 ns):

Napetost na detektorjih [V]	Število naključnih sunkov
610	$1,2 \cdot 10^{-6}$
650	$2,7 \cdot 10^{-6}$
700	$7,1 \cdot 10^{-6}$
725	$2,9 \cdot 10^{-5}$
750	$4,2 \cdot 10^{-5}$
757	$5,7 \cdot 10^{-5}$
800	$7,4 \cdot 10^{-5}$
825	$9,4 \cdot 10^{-5}$
850	$1,1 \cdot 10^{-4}$
875	$1,4 \cdot 10^{-4}$
900	$1,7 \cdot 10^{-4}$

Graf 4: Število slučajnih sunkov na detektorjih.

Število naključnih sunkov v odvisnosti od napetosti na detektorjih



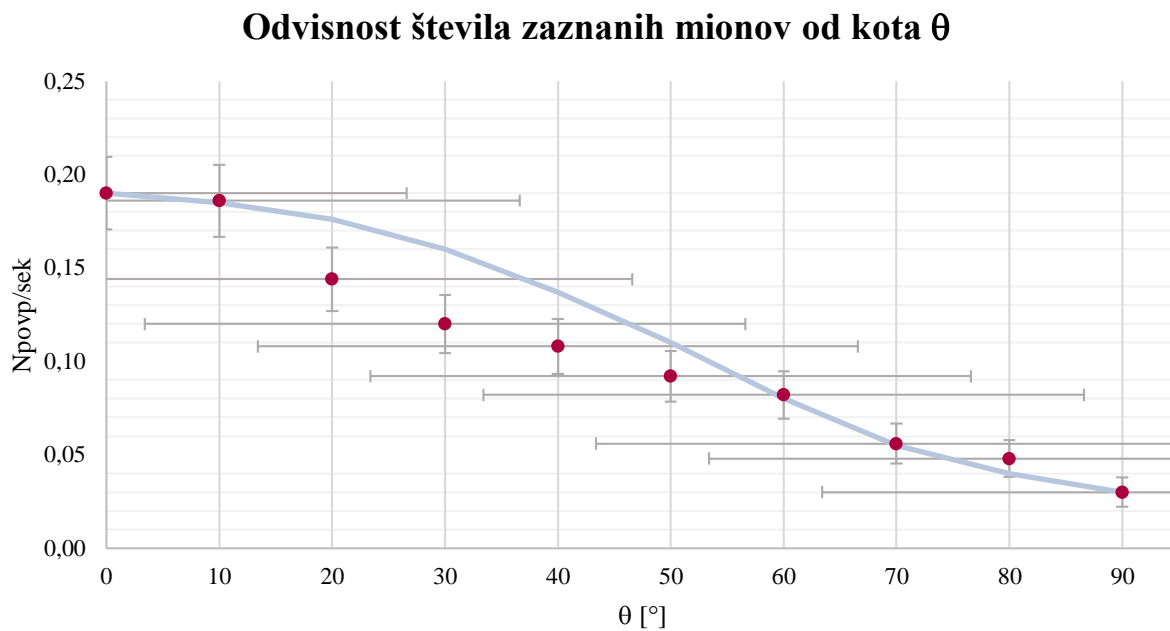
Graf 5. Odvisnost števila naključnih sunkov od napetosti na detektorjih.

4.2 Rezultati merjenja števila mionov v odvisnosti od kota med detektorjema in navpičnico

Za merjenje števila signalov v odvisnosti od kota med detektorjema in navpičnico smo si izbrali napetost 900 voltov, ker smo v primerjavi z nižjimi napetostmi, takrat zaznali največ signalov (4.1 Umeritvena krivulja). Za vsak kot smo merili 100 sekund in meritev ponovili petkrat.

Kot θ [°]	N		Σ_N	δ_N	Povprečno število koincidenz na sekundo																																																																													
0	14	21	14	95	0,02	0,19 ± 0,02																																																																												
	26	20					10	18	20	13	93	0,02	0,19 ± 0,02	22	20	20	14	10	16	72	0,02	0,14 ± 0,02	17	15	30	16	9	12	60	0,02	0,12 ± 0,02	10	13	40	7	8	14	54	0,01	0,11 ± 0,01	14	11	50	10	9	4	46	0,01	0,09 ± 0,01	10	13	60	8	8	9	41	0,01	0,08 ± 0,01	6	10	70	5	4	8	28	0,01	0,06 ± 0,01	3	8	80	6	3	5	24	0,01	0,05 ± 0,01	6	4	90	5	2	1
10	18	20	13	93	0,02	0,19 ± 0,02																																																																												
	22	20					20	14	10	16	72	0,02	0,14 ± 0,02	17	15	30	16	9	12	60	0,02	0,12 ± 0,02	10	13	40	7	8	14	54	0,01	0,11 ± 0,01	14	11	50	10	9	4	46	0,01	0,09 ± 0,01	10	13	60	8	8	9	41	0,01	0,08 ± 0,01	6	10	70	5	4	8	28	0,01	0,06 ± 0,01	3	8	80	6	3	5	24	0,01	0,05 ± 0,01	6	4	90	5	2	1	15	0,01	0,03 ± 0,01	4	3				
20	14	10	16	72	0,02	0,14 ± 0,02																																																																												
	17	15					30	16	9	12	60	0,02	0,12 ± 0,02	10	13	40	7	8	14	54	0,01	0,11 ± 0,01	14	11	50	10	9	4	46	0,01	0,09 ± 0,01	10	13	60	8	8	9	41	0,01	0,08 ± 0,01	6	10	70	5	4	8	28	0,01	0,06 ± 0,01	3	8	80	6	3	5	24	0,01	0,05 ± 0,01	6	4	90	5	2	1	15	0,01	0,03 ± 0,01	4	3													
30	16	9	12	60	0,02	0,12 ± 0,02																																																																												
	10	13					40	7	8	14	54	0,01	0,11 ± 0,01	14	11	50	10	9	4	46	0,01	0,09 ± 0,01	10	13	60	8	8	9	41	0,01	0,08 ± 0,01	6	10	70	5	4	8	28	0,01	0,06 ± 0,01	3	8	80	6	3	5	24	0,01	0,05 ± 0,01	6	4	90	5	2	1	15	0,01	0,03 ± 0,01	4	3																						
40	7	8	14	54	0,01	0,11 ± 0,01																																																																												
	14	11					50	10	9	4	46	0,01	0,09 ± 0,01	10	13	60	8	8	9	41	0,01	0,08 ± 0,01	6	10	70	5	4	8	28	0,01	0,06 ± 0,01	3	8	80	6	3	5	24	0,01	0,05 ± 0,01	6	4	90	5	2	1	15	0,01	0,03 ± 0,01	4	3																															
50	10	9	4	46	0,01	0,09 ± 0,01																																																																												
	10	13					60	8	8	9	41	0,01	0,08 ± 0,01	6	10	70	5	4	8	28	0,01	0,06 ± 0,01	3	8	80	6	3	5	24	0,01	0,05 ± 0,01	6	4	90	5	2	1	15	0,01	0,03 ± 0,01	4	3																																								
60	8	8	9	41	0,01	0,08 ± 0,01																																																																												
	6	10					70	5	4	8	28	0,01	0,06 ± 0,01	3	8	80	6	3	5	24	0,01	0,05 ± 0,01	6	4	90	5	2	1	15	0,01	0,03 ± 0,01	4	3																																																	
70	5	4	8	28	0,01	0,06 ± 0,01																																																																												
	3	8					80	6	3	5	24	0,01	0,05 ± 0,01	6	4	90	5	2	1	15	0,01	0,03 ± 0,01	4	3																																																										
80	6	3	5	24	0,01	0,05 ± 0,01																																																																												
	6	4					90	5	2	1	15	0,01	0,03 ± 0,01	4	3																																																																			
90	5	2	1	15	0,01	0,03 ± 0,01																																																																												
	4	3																																																																																

Tabela 3: Meritve kotne odvisnosti zaznanih koincidenz.



Graf 6: Graf odvisnosti povprečnega števila zaznanih koincidenz na sekundo od kota θ med detektorjema in navpičnico. Modra črta predstavlja funkcijo $\cos^2 x$ na intervalu $[0^\circ, 90^\circ]$.

5. DISKUSIJA

5.1 Umeritvena krivulja

Za določanje umeritvene krivulje smo izmerili odvisnost števila zaznanih signalov od napetosti. Iz tabele in grafa je razvidno, da se število zaznanih signalov z višanjem napetosti viša in sicer od 700 V dalje skoraj linearno. Napetosti višje od 900 V zaradi občutljivosti fotopomnoževalk nismo uporabili.

Vidimo, da se z višanjem napetosti obenem viša število naključnih sunkov, ki kvarijo meritve.

Na podlagi meritev smo se odločili, da bomo meritve števila mionov v odvisnosti od kota med detektorjema in navpičnico zato opravili pri napetosti 900 V, ker imamo takrat največji izkoristek za zaznavanje signalov.

5.2 Merjenje števila mionov v odvisnosti od kota med detektorjema in navpičnico

V teoretičnem delu 1.2.2 *Mioni* smo izračunali verjetnosti za zaznave 1-5 mionov na sekundo, ki kažejo verjetnostni vrh pri zaznavi dveh mionov.

Največ sunkov smo zaznali pri kotu 0° in sicer $0,19 \pm 0,02$ mionov na sekundo. Od tam dalje število zaznanih mionov z naraščanjem kota upada, pri 90° smo zaznali le še $0,03 \pm 0,01$ mionov na sekundo. V primerjavi z grafom funkcije $\cos^2 x$ so največja odstopanja pri kotih 20° in 30° , ter vse od 60° do 90° . Meritve potrjujejo našo hipotezo, da se z večanjem kota število zaznanih mionov manjša.

Pri meritvah so vselej prisotne napake, ki so lahko posledice šuma in nenatančnosti naprave. Že same fotopomnoževalke same od sebe dajejo sunke zaradi termičnih ekscitacij. Vpliv šuma (lahko posledica tudi nezaželenih vdorov fotonov – zato so scintilatorji oviti v aluminijasto folijo, segrevanja vezij, nepravilnega delovanja aparaturne in podobno) smo čim bolj zmanjšali z višanjem nivoja proženja tako, da je bil ta čim bolj nad šumom.

5.3 Predlogi za nadaljnje raziskovanje

Med raziskovanjem so se nam odpirala nova vprašanja kot so:

- I. Ali bi bila število zaznanih mionov enako pri višjih nadmorskih višinah?
- II. Kako povečana razdalja med detektorjema vpliva na kotno ločljivost meritve?
- III. Koliko okolica oziroma druge elektronske naprave spremenijo oziroma kvarijo meritve?

6. VIRI IN LITERATURA

- Agostini et al., M. (2015). *American Physical Society*. Pridobljeno iz Physical Review Letters: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.115.231802>
- Beatty, J. J., Matthews, J., & Wakely, S. P. (2017). *Particle Data Group*. Pridobljeno iz pdg.lbl.gov: <http://pdg.lbl.gov/2017/reviews/rpp2017-rev-cosmic-rays.pdf>
- CERN. (2019). Pridobljeno iz Cosmic rays: particles from outer space: <https://home.cern/science/physics/cosmic-rays-particles-outer-space>
- Clark, K. (2019). *Physics University of Toronto*. Pridobljeno iz The Cloud Chamber Experiment: <https://www.physics.utoronto.ca/~phy326/cc/cc.pdf>
- Cotter, G. (2016). *University of Oxford*. Pridobljeno iz Department of Physics: <http://www-astro.physics.ox.ac.uk/~garret/teaching/hea-2016-lec9.pdf>
- Davies, P., & Dawson, B. (1997). *Cosmic Bullets: High Energy Particles in Astrophysics (Frontiers of Science)*. Massachusetts: Helix Books.
- Društvo jedrskih strokovnjakov Slovenije, D. j. (1997). *arao*. Pridobljeno iz arao.si: <http://www.arao.si/vprasanja-in-odgovori/slovar-izrazov-s-podrocja-rao>
- Institute, I. S. (2003). Cosmic rays - The nature of cosmic rays. *Spatium*, 16.
- Lampret, B. (2015). *Matrika*. Pridobljeno iz Izbrane teme sodobne fizike in matematike: http://matrika.fmf.uni-lj.si/letnik-2/stevilka-1/Scintilacijski_detektorji.pdf
- Levine, A. G. (2009). *American Physical Society*. Pridobljeno iz <https://www.aps.org/programs/outreach/history/historicsites/anderson.cfm>
- Loken, S. (2008). *Berkeley Center for Cosmological Physics*. Pridobljeno iz http://bccp.berkeley.edu/o/Academy/workshop08/08%20PDFs/LokenCosmic_Rays.pdf
- Longair, M. S. (1992). *Particles, Photons, and Their Detection, Vol. 1 of High Energy Astrophysics 2nd ed.* Cambridge: Cambridge University Press. Pridobljeno iz http://www.srl.caltech.edu/personnel/dick/cos_encyc.html
- Rachen, J., & et al. (1993). Extragalactic ultra-high energy cosmic rays - II. Comparison with experimental data. *Astronomy & Astrophysics*, 382.
- Sharma. (2008). *Atomic And Nuclear Physics*. Delhi, India: Pearson Education India.
- Tatum, A. (2014). *University of North Carolina Wilmington*. Pridobljeno iz Department of Physics and Physical Oceanography: <https://uncw.edu/phy/documents/CosmicRayMuons.pdf>
- Taylor, J. H., & et al. (2008). *Princeton University*. Pridobljeno iz Experimental Physics: https://www.princeton.edu/~romalis/PHYS312/Muon_lifetime1.pdf

Technology, U. N. (Junij 2015). *The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty*. Pridobljeno iz Fundamental Physical Constants from NIST: <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>

Vogrinčič, R. (2016). *Mafija fmf*. Pridobljeno iz <http://mafija.fmf.uni-lj.si/>: http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2015_2016/1-Kozmicni_delci.pdf