

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra fyziky
Obor: Experimentální jaderná a částicová fyzika



Studium chování nové řídící
elektroniky pro Čerenkovovy a
scintilační detektory Observatoře
Pierra Augera

Performance of the upgraded
electronics for Cherenkov and
scintillator detectors of the Pierre
Auger Observatory

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Margita Majerčáková
Vedoucí práce: RNDr. Martina Boháčová, Ph.D.
Rok: 2020

Prehlásenie

Prehlasujem, že som svoju bakalársku prácu vypracovala samostatne a použila som iba podklady (literatúru, projekty, SW atď.) uvedené v priloženom zozname.

V Praze dne

.....
Margita Majerčáková

PodĎakovanie

Rada by som poĎakovala RNDr. Martine Boháčovej, Ph.D. za trpezlivé vedenie mojej práce, poskytnutie cenných informácií a za prevedené korektúry.

Margita Majerčáková

Název práce:

Studium chování nové řídicí elektroniky pro Čerenkovovy a scintilační detektory Observatoře Pierra Augera

Autor: Margita Majerčáková

Studijní program: Aplikace přírodních věd

Obor: Experimentální jaderná a částicová fyzika

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: RNDr. Martina Boháčová, Ph.D.

Fyzikální ústav AV ČR

Abstrakt: Tie najenergetickejšie častice vesmírneho žiarenia dopadajú na zem zriedkavo, preto sú kladené vysoké nároky na detektory určené na ich pozorovanie. Najväčším astročasticovým experimentom na svete je Observatórium Pierra Augera. Práca je venová sledovaniu vlastností elektroniky, ktorá je na observatóriu implementovaná v rámci upgradeu AugerPrime. Pozornosť sa kladie na novú základnú dosku, ktorá spracováva signály z povrchových detektorov a jej vlastnosti ako je šum a pomer kanálov s vysokým a nízkym faktorom zosilnenia. Následne je porovnaná závislosť šumu na teplote pre staršiu a novšiu verziu tejto dosky.

Kľúčová slova: kozmické žiarenie, Observatórium Pierra Augera, AugerPrime

Title:

Performance of the upgraded electronics for Cherenkov and scintillator detectors of the Pierre Auger Observatory

Author: Margita Majerčáková

Abstract: The most energetic cosmic ray particles are very rare, therefore high demands are imposed on detectors, which are observing them. This thesis focuses on monitoring the properties of the electronics, which is implemented within the AugerPrime upgrade. Attention is paid to the new upgraded unified board, which processes signals from surface detectors and its properties like electronic noise and the gain ratio between low gain and high gain channels. Subsequently, the dependence of noise on temperature is compared for the older and newer board versions.

Key words: cosmic rays, the Pierre Auger Observatory, AugerPrime

Obsah

Úvod	11
1 Kozmické žiarenie	13
1.1 História objavu	13
1.2 Zloženie kozmického žiarenia	15
1.3 Urýchľovanie častíc kozmického žiarenia	16
1.4 GZK limit	16
1.5 Spršky kozmického žiarenia	16
1.6 Straty nabitých častíc pri prechode prostredím	17
1.6.1 Ionizačné straty	17
1.6.2 Vysoko-energetické radiačné efekty	18
1.6.3 Coulombický rozptyl	19
1.7 Čerenkovovo žiarenie	19
1.8 Emisia rádiových vĺn	20
1.9 Interakcie fotónu	21
1.9.1 Fotoelektrický jav	21
1.9.2 Comptonov rozptyl	22
1.9.3 Produkcia elektrón-pozitrónových párov	22
2 Detekčné metódy kozmického žiarenia	25
2.1 Luminiscencia	25
2.2 Scintilačné detektory	25
2.3 Vodné Čerenkovove detektory	26
2.4 Fluorescenčné detektory	26
2.5 Detektory rádiových vĺn	27
2.6 Fotonásobiče	27
3 Observatórium Pierra Augera	29
3.1 Povrchový detektor	29
3.1.1 Kalibrácia povrchového detektoru	29
3.2 Fluorescenčné detektory	30
3.3 HEAT (High Elevation Auger Telescopes)	32
3.4 AERA (Auger Engineering Radio Array)	32
3.5 AugerPrime	33
3.5.1 Scintilátory	33
3.5.2 Miónové detektory	34
3.5.3 Rádiové detektory	34

4	Meranie vlastností novej elektroniky pre povrchové detektory	37
4.1	Popis experimentálneho usporiadania	38
4.2	Meranie šumu	39
4.2.1	Diskusia	42
4.3	Pomer kanálov s vysokým a nízkym faktorom zosilnenia.	42
4.3.1	Diskusia	42
5	Štúdium sezónnych závislostí	45
5.1	Testovanie UUB	45
5.2	Teplotná závislosť pre dáta z Observatória	46
5.3	Diskusia	47
	Záver	49
	Literatura	51

Úvod

Už vyše storočia od objavu kozmického žiarenia zaujímalo ľudstvo, skade toto žiarenie pochádza, čo ho tvorí a kde sú častice, z ktorých sa skladá, urýchľované na takú vysokú energiu.

Na jeho dôkladné pozorovanie sú potrebné komplexné systémy detektorov, z ktorých najväčší je Observatórium Pierra Augera v Argentíne. Toto Observatórium sa venuje pozorovaniu tých najenergetickejších častíc a preto je náročné na rozlohu a aj na techniku. Prvé detektory tu začali fungovať už v roku 2001 [1]. Technológie a elektronika od tej doby zaznamenali veľký pokrok a používanie starej elektroniky prestalo byť efektívne.

Táto bakalárska práca sa zaoberá štúdiom novej elektroniky, ktorá je súčasťou upgradu Observatória Pierra Augera.

V prvej kapitole sa práca venuje kozmickému žiareniu. Na začiatku je stručná história jeho objavu, v ktorej sú opísané začiatkové spôsoby pozorovania tohto žiarenia, meracie aparatury a výsledky, z ktorých bol určený jeho pôvod. Následne rozoberá jeho zloženie, spôsob urýchľovania vo vesmíre a ďalšie vlastnosti. Ďalej sú opísané základné typy interakcií rôznych druhov častíc kozmického žiarenia a javy, na základe ktorých ich je možné detekovať.

Detekčné metódy kozmického žiarenia a typy detektorov, ktoré sa využívajú sú popísané v druhej kapitole. Každý typ je opísaný stručne, pretože dôkladnejšia charakteristika sa nachádza v nasledujúcej kapitole pri konkrétnych detektoroch na observatóriu.

Tretia kapitola popisuje Observatórium Pierra Augera a systémy detektorov, ktoré využíva. Sú tu pomenuté vylepšenia, ktoré už existujú, alebo sú v priebehu. Najviac sa kapitola venuje upgraudu AugerPrime, ktorý má viacero častí.

Štvrtá kapitola práce sa už týka praktickej časti a to meraniu vlastností novej elektroniky pre povrchové detektory. Na začiatku sa nachádza porovnanie elektroniky s jej starou verziou, následne je opísané experimentálne usporiadanie, aké sme v laboratóriu používali. V ďalších častiach kapitoly sú analyzované jednotlivé testovania a ich výsledky.

Posledná kapitola práce sa venuje štúdiu sezónnych závislostí, konkrétne zmenám teploty na novú elektroniku. Najprv je vysvetlená motivácia tohto štúdia a to hlavne opisom celkového testovania elektroniky. Používané sú dáta z laboratória aj dáta z observatória.

Kapitola 1

Kozmické žiarenie

Kozmické žiarenie je tvorené prúdiacimi časticami z vesmíru do našej atmosféry a produktami rozpadu, ktorý nastane pri ich reakcii s atmosférou. Tieto častice k nám prúdia neustále a zo všetkých smerov. Ku jeho konečnému objavu a potvrdeniu miesta pôvodu však viedla cesta viazaná na nesprávny predpoklad.

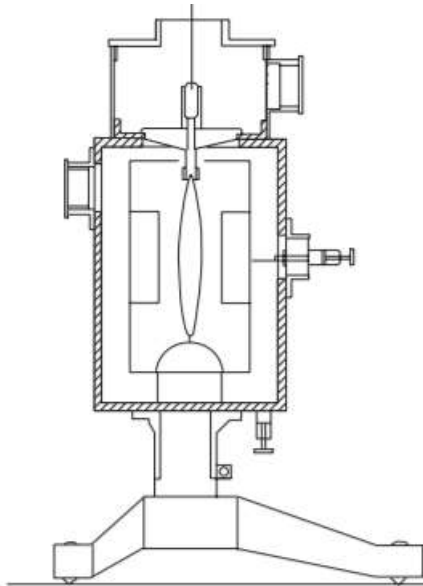
1.1 História objavu

Dôkladnejšie skúmanie prítomnosti nabitých častíc v atmosfére siaha do roku 1900, kedy sa značne vylepšila citlivosť elektroskopov, najmä vďaka izolácii citlivých častí od okolia pomocou sklenenej nádoby. Vedelo sa totiž, že rádioaktívne prvky spôsobujú ionizáciu vzduchu a elektroskop, ktorý sa nachádza v ich blízkosti, zaznamená elektrostatický výboj.

Predpokladalo sa teda, že ionizácia spôsobujúca spontánny výboj zaznamenaný týmto elektroskopom je spôsobená rádioaktívnymi prvkami pochádzajúcimi zo Zeme. V roku 1909 nemecký vedec Theodor Wulf meral ionizáciu na Eiffelovej veži v Paríži vo výške približne 300 m, pretože sa snažil objasniť a potvrdiť jej pôvod. Keďže v tejto dobe prevládala hypotéza, že spomínaná ionizácia pochádza zo Zeme, očakával v tejto výške jej úplné vymiznutie, zaznamenal však pokles ani nie na polovicu. Schématický náčrt jeho elektromeru je znázornený na Obr.1.1.

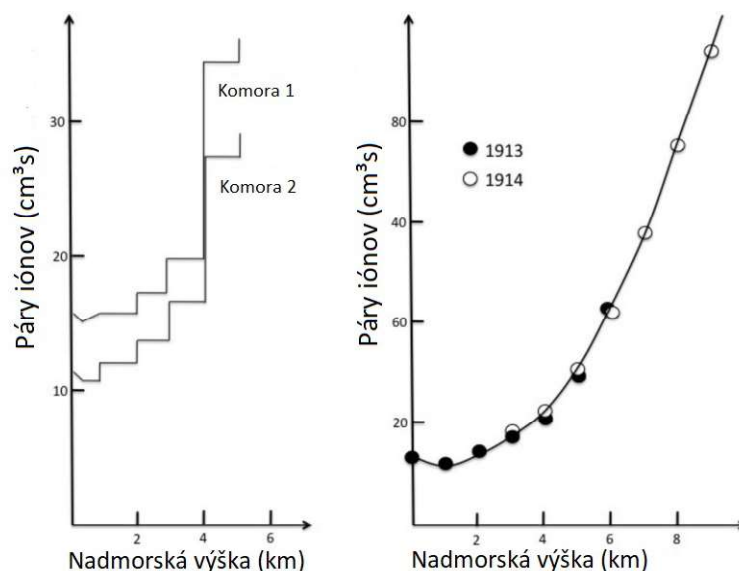
V roku 1910 sa Taliansky fyzik Domenico Pacini pokúšal merať radiáciu tri metre pod vodou. Zistil, že množstvo spontánnych výbojov je menšie asi o 20% ako na Zemi [2]. To podporilo domnienku, že častice nemajú zemský pôvod. V tejto chvíli začala byť jasná potreba merania radiácie pomocou letu balónom vo vysokých nadmorských výškach.

Za zlom v skúmaní a objav kozmického žiarenia sa považuje experiment v roku 1912, kedy rakúsky fyzik Victor Hess meral ionizáciu v ovzduší pomocou letu balónom. Pri svojom meraní použil tri elektroskopy, všetky kompletne uzavreté. Vo výške 1400 m nameral silný nárast ionizácie a teda konečne vyvrátil hypotézu, že tieto častice pochádzajú zo Zeme, pretože ionizácia s rastúcou nadmorskou výškou neklesala, ale



Obr. 1.1: Wulfov elektroskop. Hlavná citlivá časť elektroskopu sú kremíkové vlákna, ktoré sú pripevnené k ďalšiemu vláknu, ktoré sa správa ako pružina. Týmto spôsobom je pomocou napätia pružinky možné nastaviť citlivosť elektroskopu. Vzdialenosť týchto dvoch vlákien je meraná mikroskopom, ktorý je pripevnený na obvode. Prevzaté z [3].

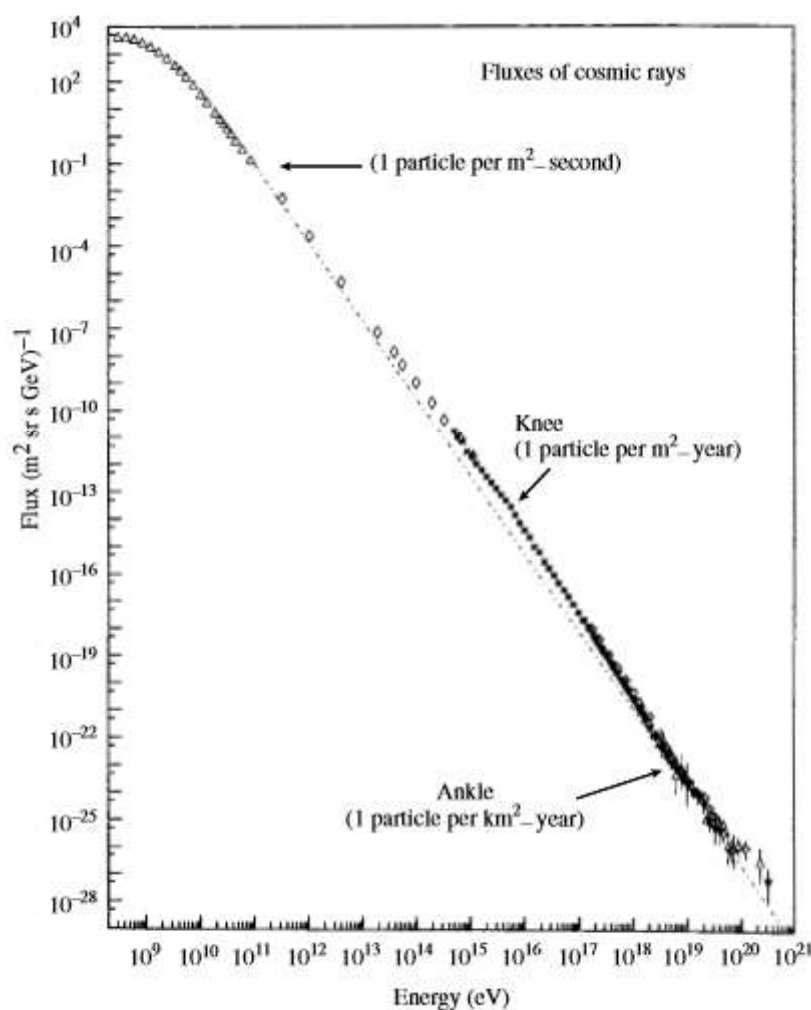
rástla. Z toho bol teda vyvodený záver, že toto žiarenie na nás dopadá z vesmíru. Keďže Hess nespozoroval pokles radiácie v noci, tak vylúčil aj možnosť, že by pochádzala zo Slnka [3]. V roku 1936 dostal za tento objav Nobelovu cenu. Hessove výsledky boli potvrdené experimentmi Kolhorstera, ktorý uskutočnil niekoľko letov do výšky až 9200 m. Výsledky experimentov sú zaznamenané na Obr.1.2.



Obr. 1.2: Počty párov iónov nameraných v rôznych nadmorských výškach. Uskutočnené Hessom v rokoch 1913 a 1914. Prevzaté z [4].

1.2 Zloženie kozmického žiarenia

Kozmické žiarenie pozostáva najviac z protónov, ktoré zaberajú až 86% jeho zloženia, ďalej z alfa častíc (jadrá hélia), ktoré zaberajú 11%, a ďalej napríklad jadrami ťažších častíc až po uránium a taktiež elektrónmi.[6] Vidíme teda, že je zväčša tvorené jednoduchými jadrami a len z veľmi malej časti ostatnými typmi častíc. V tomto žiarení môžeme nájsť aj malé množstvo antičastíc ako sú pozitrony a antiprotóny, tie sú však zrejme sekundárneho pôvodu a vznikajú pri interakcii primárnych častíc s medzihviezdnym plynom. Niektoré z častíc v tomto žiarení sú tie najenergetickejšie aké sme mohli pozorovať od Veľkého Tresku (až do 10^{20} eV). Spektrum energií kozmických častíc je na Obr. 1.3. Tento graf má pár význačných častí, prvú pri



Obr. 1.3: Spektrum kozmického žiarenia. Prevzaté z [6].

energiách $3 \cdot 10^{15}$ eV, ktorá sa nazýva koleno (knee), kde začína byť spektrum strmšie a ďalšiu pri $3 \cdot 10^{18}$ eV, členok (ankle), kde sa opäť sploští.[27].

1.3 Urýchľovanie častíc kozmického žiarenia

Otázkou teda je, ako je možné, že tieto častice k nám prilietajú s takou vysokou energiou. Vo vybudovaných urýchľovačoch častíc, ako je napríklad LHC sa podarilo dosiahnuť energiu najvyššiu $1.3 \cdot 10^{14}$ eV, zatiaľ čo pozorované častice z kozmického žiarenia dosahujú až rády 10^{20} eV [6].

Fermi v roku 1949 navrhol možný mechanizmus tohto urýchľovania. Tento princíp je častokrát pripodobňovaný ku pinpongovej loptičke, odrážajúcej sa medzi dvomi stenami. Pri výbuchu supernovy vznikajú pohyblivé, turbulentné magnetické polia, medzi ktorými sa táto častica môže zachytiť a týmto spôsobom sa urýchliť. Tieto teórie však vedia objasniť urýchľovanie do energie rádu 10^{15} eV, takže stále presne nevieme, odkiaľ sa berú tie najenergetickejšie častice.

1.4 GZK limit

Vieme, že vo vesmíre sa nachádzajú pozostatkové fotóny, ktoré vznikli v rannom štádiu vesmíru. Tieto fotóny nazývame reliktné žiarenie alebo aj kozmické mikrovlnné pozadie. Protón sa môže zraziť s takýmto fotónom a prebiehajú reakcie [7]:

- $p + \gamma \rightarrow n + \pi^+$
- $p + \gamma \rightarrow p + e^+ + e^-$

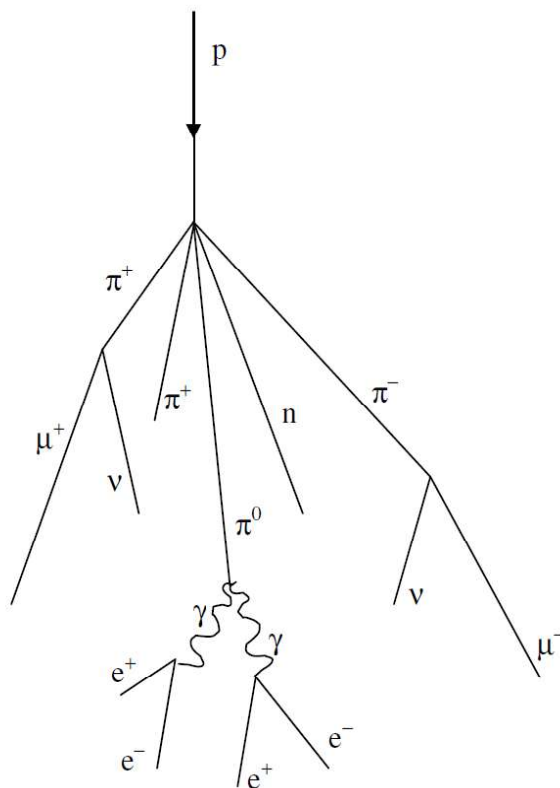
Takto vzniknutý nový protón má však nižšiu energiu ako pôvodný (asi o 15% [6]). Z toho vyplýva, že pravdepodobnosť, že sa k nám dostane protón nad nejaký energetický limit, klesá s jeho energiou. Z energetických strát protónu pri takýchto kolíziach bol odvodený teoretický limit pre protóny - GZK (Greisen-Zatsepin-Kuzmin) limit, ktorý je približne 4.10^{19} eV [6].

1.5 Spršky kozmického žiarenia

Sprškami kozmického žiarenia alebo sekundárnym kozmickým žiarením nazývame spršku častíc, ktorá vznikla dôsledkom interakcie primárneho kozmického žiarenia s atmosférou. Stredná voľná dráha protónu v atmosfére je približne $\lambda = 100$ g cm^{-2} [6]. Pri reakcii protónu s molekulami v atmosfére tvoria hlavnú časť spršky pióny, ktoré vznikajú najmä v stratosfére. Priebeh takejto spršky je znázornený no Obr.1.4. Pri rozpade piónu prebiehajú nasledujúce procesy:

- $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
- $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$
- $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$

Miónová zložka spŕšiek sa takisto nazýva aj ťažká komponenta (viac prenikavá) a zložka z elektrónov, pozitronov a fotónov sa nazýva mäkká. Mióny sa môžu ďalej rozpadáť. Základnou veličinou pri skúmaní týchto spŕšiek je atmosférická hĺbka, pri ktorej nastalo maximum jej vývoja a nazývame ju maximum spŕšky X_{max} [g/cm²].



Obr. 1.4: Spŕška kozmického žiarenia. Rozpad protónu v atmosfére. Prevzaté z [8].

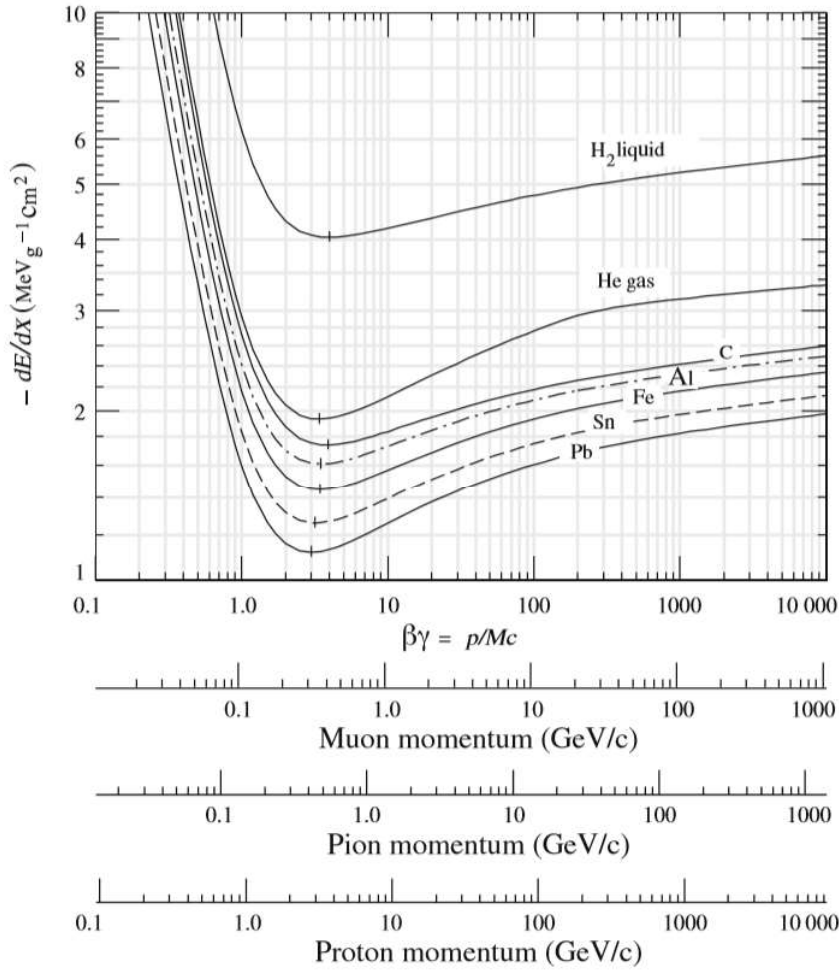
1.6 Straty nabitých častíc pri prechode prostredím

1.6.1 Ionizačné straty

Nabitá častica letiaca atmosférou interaguje s elektrónmi napríklad v atóme dusíka, excituje tieto atómy, čo môže viesť až k ionizácii a teda k strate energie pôvodnej častice. Strednú hodnotu straty energie tejto častice pri interakcii z elektrónmi vypočítame z Bethe-Blochovho vzťahu [9]

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = 2\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e \gamma^2 v^2 W_{max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right], \quad (1.1)$$

kde N_A je Avogadrova konštanta, r_e je polomer elektrónu, m_e jeho hmotnosť, ρ hustota média, Z jeho atómové číslo, A atómová hmotnosť, z náboj nabitej častice v jednotkách základného náboja, $\beta = \frac{v}{c}$, $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$, W_{max} je maximálna prenesená



Obr. 1.5: Ionizačné straty miónu, piónu a protónu pre rôzne materiály. Prevzaté z [10].

energia, I je priemerný excitačný potenciál, δ je korekčný člen hustoty, C je korekčný člen, ktorý zohľadňuje, že elektróny nie sú v pokoji.

1.6.2 Vysoko-energetické radiačné efekty

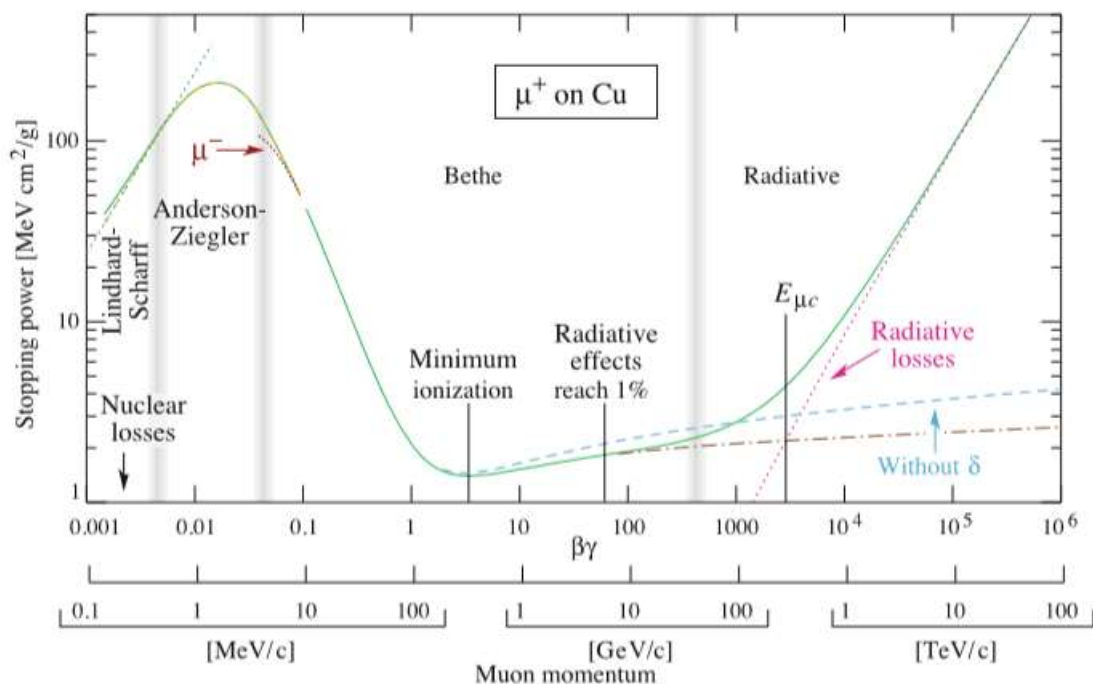
Nabitá častica pri urýchlení emituje elektromagnetické žiarenie. Častice, ktoré sú odrazené elektrickým poľom materiálu, ktorý prechádzajú, teda tiež emitujú fotóny. Hovoríme o brzdnom žiarení. Energetické straty miónu pri prechode medľou, sú znázornené na Obr.1.6.

Radiačné straty sú relevantné hlavne pre vysokoenergetické elektróny a pozitrony. Priemerná energia stratená elektrónom o energii E za prejdenú dĺžku dx je [2]

$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = -\frac{E}{X_0}, \quad (1.2)$$

kde X_0 je radiačná dĺžka elektrónu, čiže vzdialenosť, za ktorú elektrón stratí $1/e$

svojej energie.



Obr. 1.6: Energetické straty miónov pri prechode v medi ako funkcia $\beta\gamma$. Prevzaté z [10].

1.6.3 Coulombický rozptyl

Pri prechode nabitaj častice materiálom dochádza k jej rozptylu kvôli elektromagnetickým interakciám s jadrami tohto materiálu. Na dráhe o dĺžke t tieto rozptyly vytvoria rozdelenie viacnásobného Coulombického rozptylu [6]

$$\varphi = \left(\frac{zE_s}{pv} \right) \sqrt{\frac{t}{X_0}}, \quad (1.3)$$

kde X_0 je radiačná dĺžka, ktorá je závislá na materiále, cez ktorý častica prelieta, p je hybnosť častice, v jej rýchlosť a z náboj. $E_s = (4\pi/\alpha)^{1/2}mc^2 = 21 \text{ MeV}$.

1.7 Čerenkovovo žiarenie

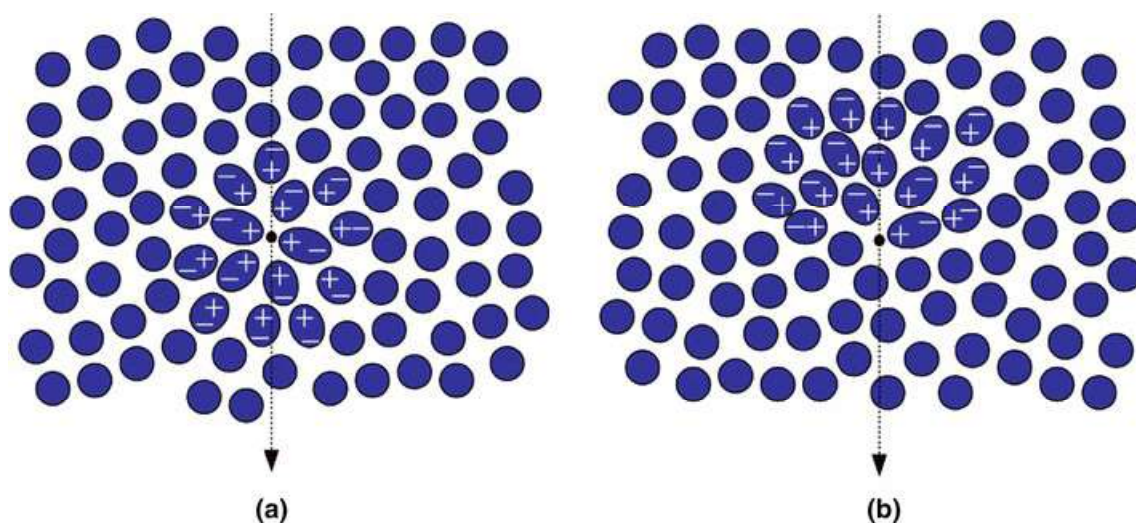
Čerenkovove žiarenie je jav, ktorý nastáva, keď nabitá častica prechádza dielektrikom rýchlosťou väčšou ako je rýchlosť svetla v danom médiu. Dielektrikum je materiál polarizovateľný elektrickým poľom. Nabitá častica emituje elektromagnetické žiarenie, takže preusporadúva kladné a záporné náboje v materiáli. Ak prelieta rýchlosťou nižšou ako je rýchlosť svetla, usporadúva náboje ako je znázornené na Obr.1.7(a), náboje sa po čase vrátia do ich pôvodného stavu, pričom sú vyžiarené

fotóny. Nedochádza však k detekcii žiadneho svetla, pretože fotóny interferujú deštruktívne. Keď však častica preletí relativistickou rýchlosťou, vlnky, ktoré zanecháva pozdĺž trate sú vo fáze a interferujú konštruktívne, takže pozorujeme svetlo [11]. Nesymetrické polarizačné pole je znázornené na Obr.1.7(b).

Toto žiarenie býva tiež prirovnávané k aerodynamickému tresku, kde tento tresk je jav akustický a Čerenkovovo žiarenie jav svetelný. Uhol vyžiarených elektromagnetických vln vzhľadom k ose pohybu prelietavajúcej častice je [2]

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} \quad (1.4)$$

kde n je index lomu prostredia.



Obr. 1.7: (a): Usporiadanie dipólov po prechode nabitaj častice médiom rýchlosťou nižšou ako je rýchlosť svetla v danom médiu. (b): Usporiadanie dipólov po prechode nabitaj častice médiom rýchlosťou vyššou ako je rýchlosť svetla v danom médiu. Prevzaté z [12].

1.8 Emisia rádiových vln

K emisii rádiových vln prispieva spŕška dvomi mechanizmami:

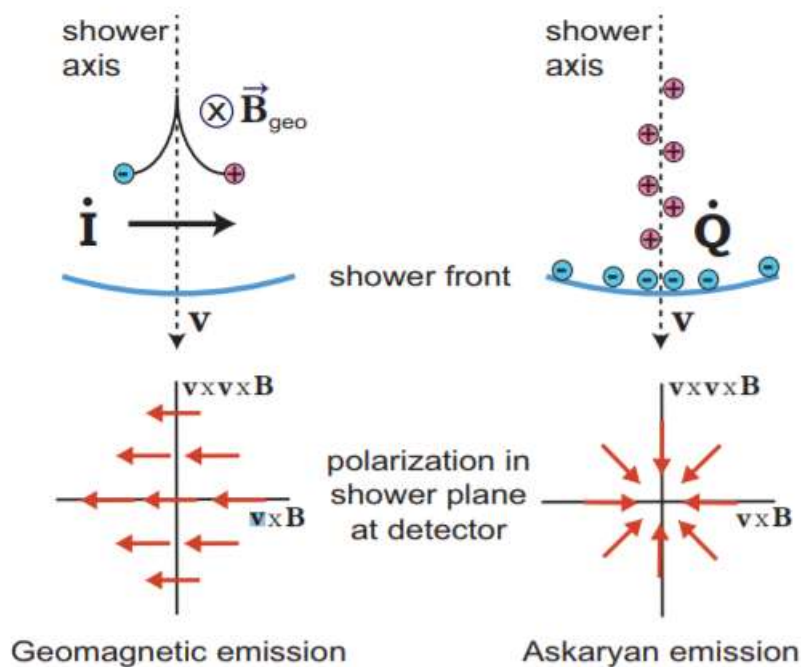
1. Geomagnetický mechanizmus

Nabité častice podliehajú Lorentzovej sile, ktorou pôsobí geomagnetické pole. Elektróny a pozitrony sú ním odrážané do opačných smerov. Z tohto dôvodu vzniká prúd, ktorý je kolmý k osi spŕšky a teda elektrické pole. Takéto pôsobenie poľa zeme sa nazýva geomagnetický efekt. Elektrické pole je lineárne polarizované v smere $v \times B$, kde v je smer osi spŕšky a B je smer geomagnetického poľa. Pozorovateľ teda detekuje rovnakú polarizáciu nezávisle od toho kde sa nachádza.

2. Askaryanov mechanizmus

Askaryanov mechanizmus je podobný ako Čerenkovovo žiarenie. Častica pohybujúca sa v hustom dielektrickom médiu rýchlosťou vyššou ako je rýchlosť svetla v danom médiu začne produkovať spršku. Elektróny v sprške anihilujú s pozitronmi, čo vyústi k emisii fotónov. Niektoré fotóny ionizujú atómy vo vzduchu, takže vznikajú ďalšie elektróny. Elektromagnetická časť spršky preto obsahuje viac negatívnych nábojov, ako pozitívnych. Toto vedie k elektrickému poľu, ktoré je radiálne polarizované vzhľadom k osi spršky. Takže v tomto prípade záleží na tom, kde sa pozorovateľ nachádza.

Polarizácia v oboch prípadoch je znázornená na Obr.1.8



Obr. 1.8: Znázornenie lineárnej polarizácie žiarenia pri geomagnetickom mechanizme a Askaryanovom mechanizme. Prevzaté z [24].

1.9 Interakcie fotónu

1.9.1 Fotoelektrický jav

Fotoelektrický jav je uvoľnenie elektrónu z atómu z dôvodu zrážky s fotónom. Fotón vyrazí elektrón, ktorý leží v blízkosti jadra a po jeho uvoľnení sa nazýva fotoelektrón. Tento jav je popísaný rovnicou [23]

$$hf = W_v + E_k, \quad (1.5)$$

kde h je Planckova konštanta, f je frekvencia fotónu, W_v je časť energie fotónu, ktorá je spotrebovaná na uvoľnenie elektrónu a E_k je kinetická energia fotoelektrónu. Energia fotoelektrónu teda závisí na frekvencii dopadajúceho fotónu a nie

na intenzite žiarenia. Po vyrazení elektrónu zostane atóm v excitovanom stave a následne pri deexcitácii vyžiari fotón.

1.9.2 Comptonov rozptyl

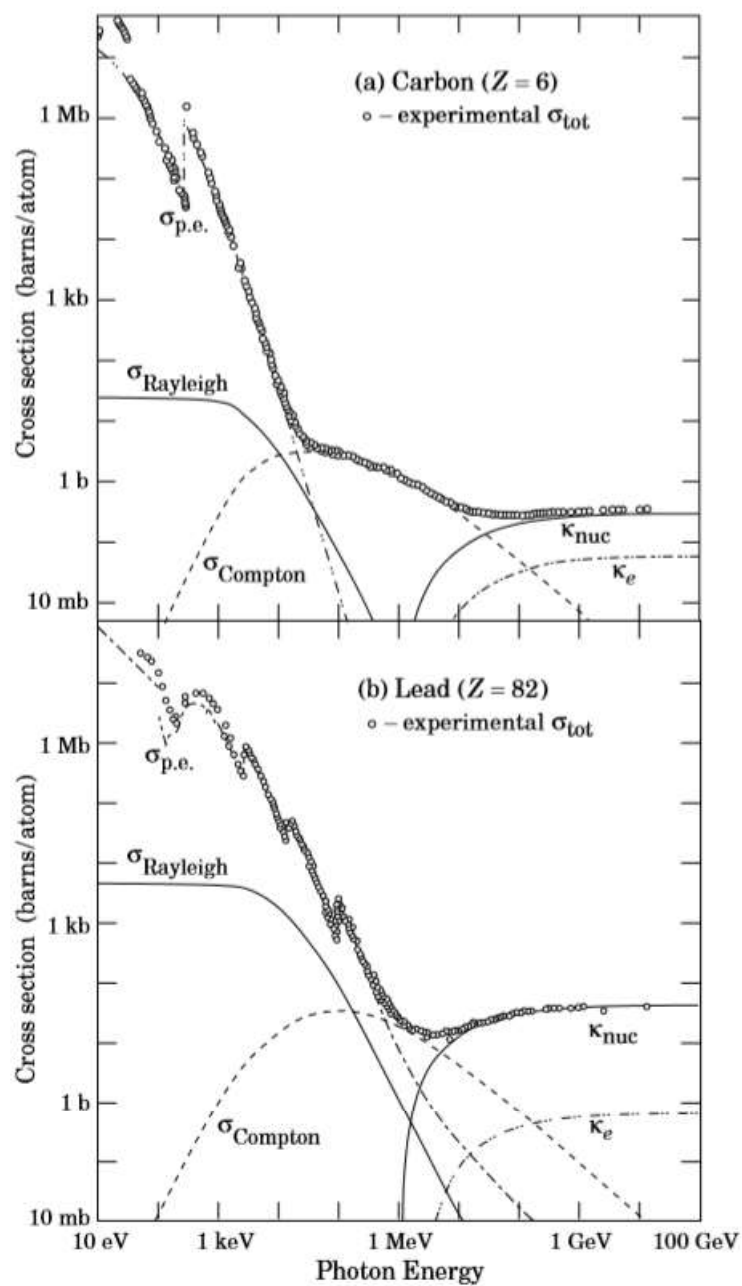
Comptonov rozptyl je zrážka fotónu s nabitou časticou, napríklad elektrónom, ktorá vyústi v emisii fotónu s väčšou vlnovou dĺžkou. Posun vlnovej dĺžky vyjadruje vzťah [23]

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta), \quad (1.6)$$

kde λ je počiatočná vlnová dĺžka fotónu, λ' je vlnová dĺžka po rozptyle, h je Planckova konštanta, m_e hmotnosť elektrónu a θ je uhol o ktorý sa fotón vychýlil z pôvodnej dráhy.

1.9.3 Produkcia elektrón-pozitrónových párov

Na tvorbu elektrón-pozitrónových párov potrebuje dopadajúci fotón najvyššiu energiu zo všetkých predchádzajúcich spomenutých interakcií. Potrebujeme aby nám vznikli dve častice, ktoré majú obe kludovú energiu približne 0.511 MeV, takže fotón musí mať minimálnu energiu 1.022 MeV. Tento proces nemôže nastať vo vákuu kvôli zákonu zachovania hybnosti, takže nastáva iba v blízkosti jadra alebo inej častice, ktorá prevezme časť hybnosti fotónu. Závislosť účinného prierezu v uhlíku a v olove na energii fotónu je znázornená na Obr.1.9.



Obr. 1.9: Účinný prierez v uhlíku (a) a olove (b) v závislosti na energii fotónu. Prevzaté z [25].

Kapitola 2

Detekčné metódy kozmického žiarenia

Kozmické častice je možné detekovať ako na Zemi, tak aj vo vesmíre. Na Zemi pozorujeme spršky častíc, ktoré boli vytvorené pri prelete primárnej častice atmosférou, ktorá slúži ako interačné médium.

2.1 Luminiscencia

Luminiscenčný materiál má takú vlastnosť, že po absorbovaní nejakej formy energie, napríklad tepelnej, svetelnej a podobne, sa jeho atómy excitujú a pri deexcitácii emitujú túto energiu naspäť vo forme viditeľného žiarenia.

Podľa doby, ktorú trvá kým sa po absorpcii svetla emituje svetlo rozdeľujeme tento jav na fluorescenciu (do 10^{-8} s) a fosforescenciu (nad 10^{-8} s)[9].

Scintilácia je taký typ luminiscencie, pri ktorej sa emituje svetlo v dôsledku pôsobenia ionizačného žiarenia na materiál [28].

2.2 Scintilačné detektory

Tento typ detektorov je vyrobený zo scintilačných materiálov. Najdôležitejšími podmienkami kladenými na tieto materiály sú aby vyžiarené svetlo bolo úmerné energii, ktorú scintilátor absorboval z primárnej častice a aby bol materiál transparentný pre fotóny.

Na scintilátor býva väčšinou napojený fotonásobič, v ktorom prebieha fotoelektrický jav a premieňa vyžiarené fotóny na elektróny a môžeme teda merať prúd. Amplitúda tohto elektrického signálu je úmerná stratenej energii a tak ju môžeme týmto spôsobom zmerať.

Tretou dôležitou časťou, ktorá buď scintilačný materiál priamo obsahuje alebo je napojená na detektor, je látka, ktorej úlohou je absorbovať emitované svetlo a vyžiarovať ho s dlhšou vlnovou dĺžkou. Toto posunutie sa používa na to, aby vyžiarené spektrum bolo bližšie citlivosti fotonásobiča.

Výhodou tohto typu detektoru je jeho krátky mŕtvy čas, teda schopnosť zaznamenávať častice, ktoré prilietajú v malých časových úsekoch za sebou. Ďalšou výhodou je možnosť rozlišovania rôznych častíc na základe tvaru výsledného elektrického impulzu, pretože každá častica spôsobí rôzne procesy fluorescencie. Scintilátor môže byť zložený z látok rôzneho pôvodu, preto delíme:

- Organické scintilátory (kryštalické, tekuté)
- Plastové scintilátory
- Anorganické scintilátory
- Plynné, Sklenené...

Každý jednotlivý typ má svoje výhody a nevýhody. Najväčšie množstvo emitovaného svetla na množstvo energie má zatiaľ antracén, ktorý patrí medzi organické scintilátory, avšak nemá takú rýchlu odozvu. Na detekciu kozmického žiarenia sa však takmer výhradne používa plastový scintilátor.

Plastové scintilátory

Tento typ detektoru je zmes pevného scintilátoru a pevného rozpúšťadla ako je napríklad polyvinyltoluén alebo polystyrén. Pretože tieto plasty sú ľahké a relatívne lacné vyrobiť, upraviť do požadovaného tvaru či preniesť na požadované miesto, stali sa najpoužívanejším typom organických scintilátorov v dnešnej dobe. Taktiež majú veľmi rýchly signál a veľké množstvo vystupujúceho svetla. Ako pevné látky však podliehajú viac škodám spôsobeným radiáciou.

2.3 Vodné Čerenkovove detektory

Vodné Čerenkovove detektory už podľa názvu využívajú Čerenkovovo žiarenie na detekciu nabitých relativistických častíc. Ich základnými stavebnými jednotkami je radiátor, čo je médium, v ktorom má detekovaná častica vyššiu rýchlosť ako svetlo v danom médiu a z fotocitlivých článkov, ktoré snímajú vyprodukované svetlo.

2.4 Fluorescenčné detektory

Keď prilietavajúca častica prechádza atmosférou, zráža sa s jej molekulami a môže spôsobiť ich chvíľkovú excitáciu. Následná deexcitácia je detekovateľná, pretože je vyžiarené svetlo. U dusíka sa toto svetlo nachádza v UV časti spektra.

Počet vyžiarených fotónov je malý, takže sa tento spôsob detekcie dá použiť iba pre vysokoenergetické častice. Detektory zaznamenávajú intenzitu vyžiareného svetla a časovú závislosť signálov vo fotonásobičoch, z čoho je možné zrekonštruovať ospršky a jej pozdĺžny profil.

Ich nevýhoda je operačný cyklus, ktorý je maximálne 15%, pretože detektory môžu merať iba za bezmesačných nocí a dobrého počasia.

2.5 Detektory rádiových vln

Tento spôsob detekcie kozmického žiarenia je najmladší zo všetkých. Detektory využívajú emisiu rádiových vln spomenutú na str. 20. Tieto detektory sú vlastne antény, ktoré zaznamenávajú emisiu fotónov v rádiovnej časti spektra.

Sú citlivé na elektromagnetickú časť spršky, pretože častice, z ktorých je zložená (elektróny, pozitrony), majú najväčšiu hodnotu merného náboja. Výhody tohto detektoru sú dobré uhlové rozlíšenie a oproti fluorescenčnému detektoru napríklad operačný cyklus, ktorý nemá obmedzený.

2.6 Fotonásobiče

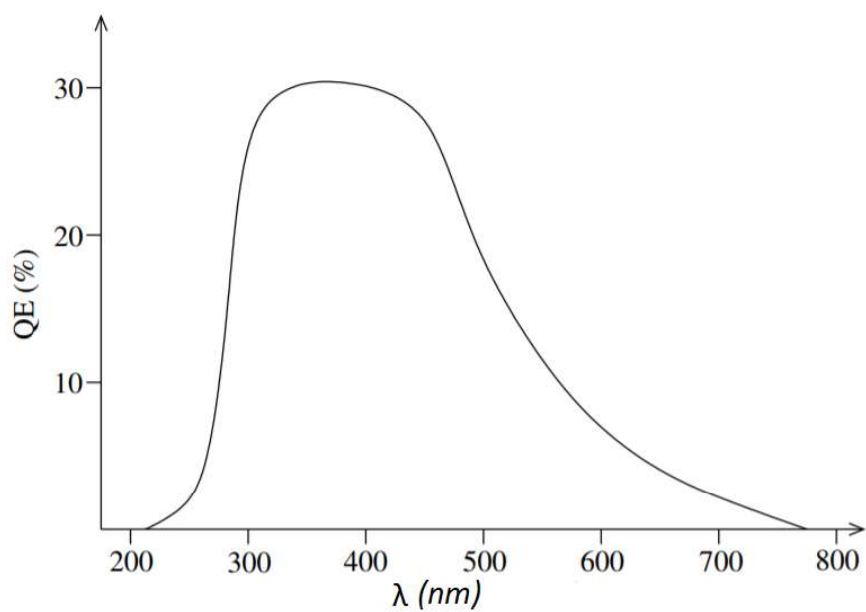
V fluorescenčných aj Čerenkovových detektoroch sa využívajú fotonásobiče. Fotonásobiče sú zariadenia slúžiace na premenu svetelného signálu na elektrický a jeho následné zosilnenie. Sú schopné zaznamenať svetlo od ultrafialového až po začiatok spektra infračerveného svetla.

Svetlo, ktoré vyžiari scintilátor dopadá na fotokatódu, ktorá je z vhodného materiálu a vďaka fotoelektrickému javu táto fotokatóda emituje elektróny. Účinnosť fotokatódy [20]

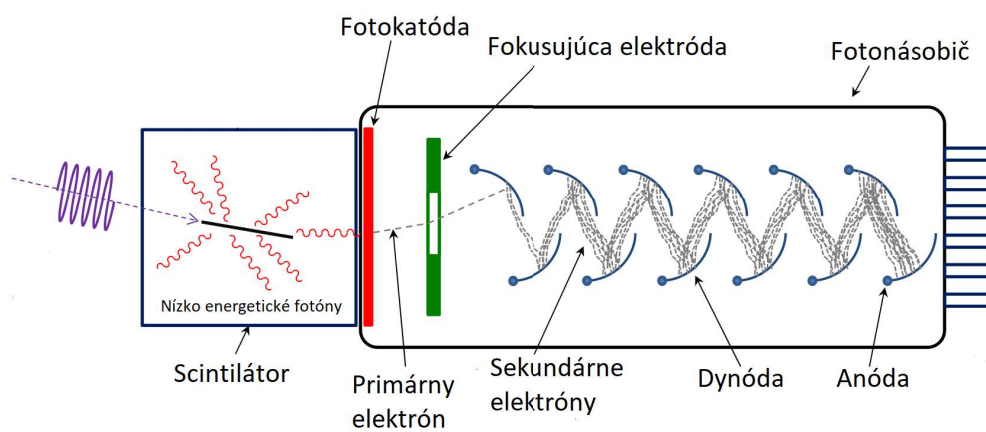
$$QE = \frac{N_e}{N_\gamma} \quad (2.1)$$

je určená ako pomer počtu dopadajúcich fotónov N_γ a emitovaných elektrónov N_e . Táto účinnosť je závislá na vlnovej dĺžke fotónov ako vidíme na Obr.2.1.

Účinnosť fotokatód sa pohybuje v rozmedzí 10% až 30% [20]. Tento fakt by znamenal, že zachytíme veľmi malé množstvo elektrónov, čo by bolo náročné na detekciu. Preto sú emitované elektróny usmernené fokusujúcou elektródou na sústavu dynód. Tieto dynódy sú vyrobené z kovových materiálov a každá nasledujúca dynóda má na svojom povrchu privedené väčšie napätie ako tá predchádzajúca. Elektrón po náraze na dynódu spôsobí emisiu sekundárnych elektrónov, ktoré dopadnú na druhú dynódu a opäť sa urýchlia. Týmto spôsobom sú produkované ďalšie a ďalšie elektróny na jednotlivých dynódach, ktoré sú vzápadť urýchlené. Poslednou jeho časťou je anóda, ktorá pritiahne elektróny a zaznamenáme ostrý elektrický pulz. Fotonásobič a jeho jednotlivé časti sú popísané na Obr.2.2.



Obr. 2.1: Závislosť účinnosti fotokatódy QE od vlnovej dĺžky dopadajúcich fotónov λ . Prevzaté z [20].



Obr. 2.2: Fotonásobič a jeho jednotlivé časti. Prevzaté z [26].

Kapitola 3

Observatórium Pierra Augera

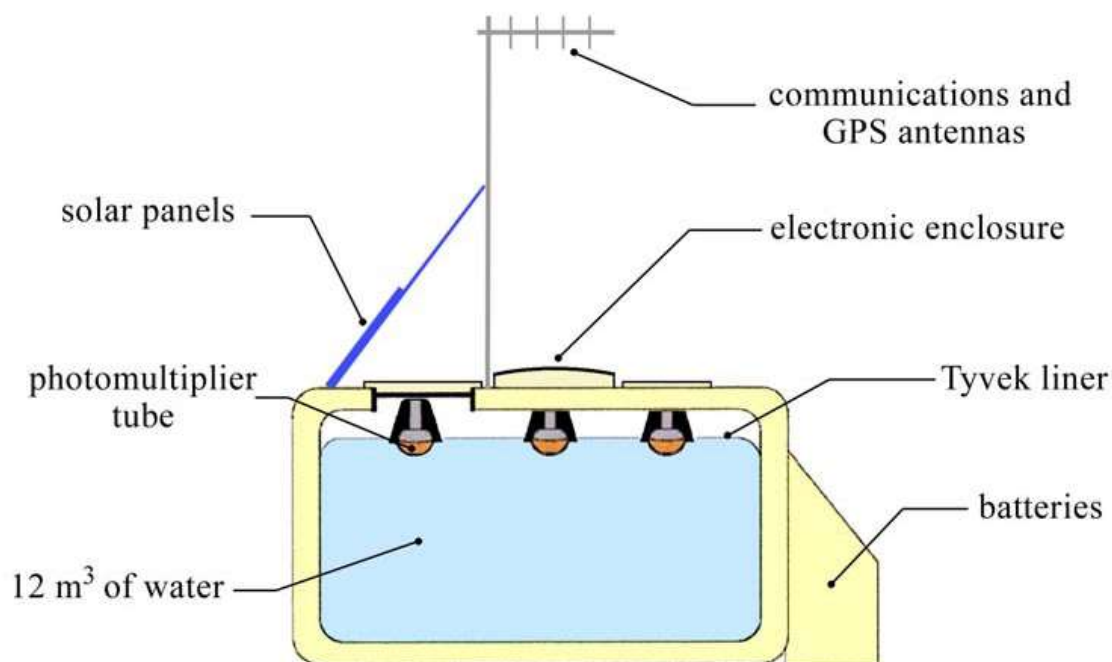
Observatórium Pierra Augera je v súčasnosti najväčší astročasticový experiment na svete. Rozlieha sa na 3000 km^2 v provincii Mendoza, Argentína. Observatórium bolo navrhnuté na pozorovanie vysokoenergetických častíc v spŕškach kozmického žiarenia, od 10^{17} eV . Toto observatórium sa nazýva taktiež aj hybridný detektor, pretože využíva dva spôsoby detekcie častíc zároveň. Prvý spôsob je pomocou povrchovej sústavy vodných Čerenkovových detektorov a druhý pomocou fluorescenčných teleskopov.

3.1 Povrchový detektor

Povrchový detektor sa skladá z Čerenkovových vodných detektorov. Princíp fungovania týchto detektorov bol vysvetlený v predchádzajúcej kapitole. Toto observatórium obsahuje približne 1600 detekčných staníc, ktoré sú rozmiestnené v mriežke. Každá nádrž je vyrobená z polyetylénu, má priemer 3.6 m, výšku 1.2 m a obsahuje 12000 l čistenej, destilovanej vody, ktorá je zbavená všetkých iónov a je úplne izolovaná od vonkajšieho svetla, najmä pridaním 1% karbónovej čiernej do jej vnútornej vrstvy. Na strope tejto nádrže sú umiestnené tri veľké fotonásobiče, vzdialené od osy nádrže 1.2 m. Keďže sú v blízkosti vody, tak majú na anódu privedené kladné napätie, fotokatóda je uzemnená. Vyprodukované svetlo po prechode častice je rozptýlené reflektívnym materiálom vnútri nádrže a zaznamenané fotonásobičmi. Elektronika je napájaná dvomi 12 V batériami, ktoré čerpajú energiu zo solárnych panelov o výkone 10 W. Zapojenie všetkej elektroniky je zabezpečené riadiacou doskou pre každú nádrž. Popísané základné časti nádrže sú na Obr.3.1

3.1.1 Kalibrácia povrchového detektoru

Jednotka, v ktorej sa merá zaznamenané Čerenkovove žiarenie sa nazýva VEM (Vertical Equivalent Muon). Táto jednotka udáva priemerný signál, ktorý je zaznamenaný keď mión prejde vertikálne cez nádrž. Tento signál je určený pomocou scintilátorov nad a pod nádržou. Cieľ tejto kalibrácie je získať VEM v hardvérových



Obr. 3.1: Schématicky popísané časti vodného Čerenkovovho detektoru v Argentíne. Prevzaté z [32].

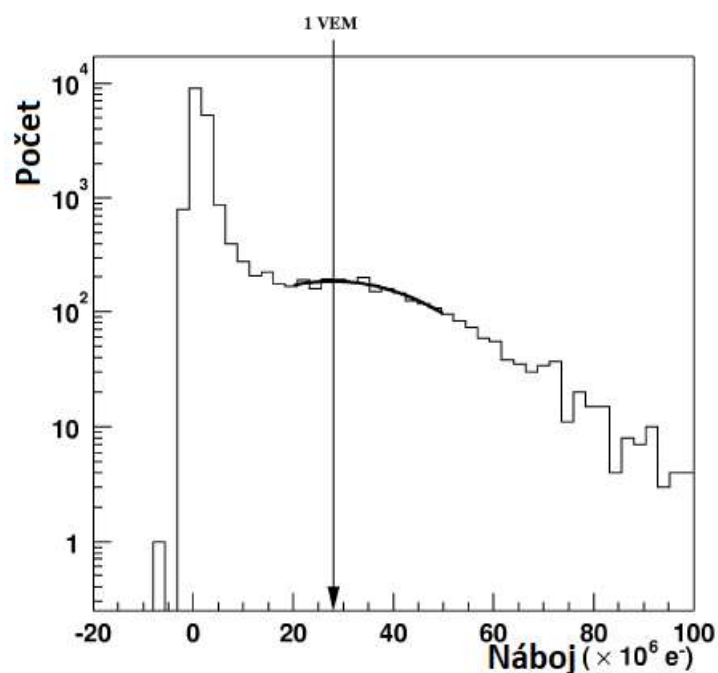
jednotkách. Väčšina miónov zostane pri prelete nádrže relativistická celú dobu a produkuje konštantné množstvo Čerenkovovho žiarenia.

Pri použití hraničného triggeru na fotonásobič detektoru sa v grafe rozdelenia náboja objaví pík, ktorý je viditeľný na Obr.3.2. Vidíme, že je na mieste približne $2.7 \cdot 10^7$ e, čo zodpovedá produkcii asi 25 fotoelektrónov vo fotonásobiči.[19].

3.2 Fluorescenčné detektory

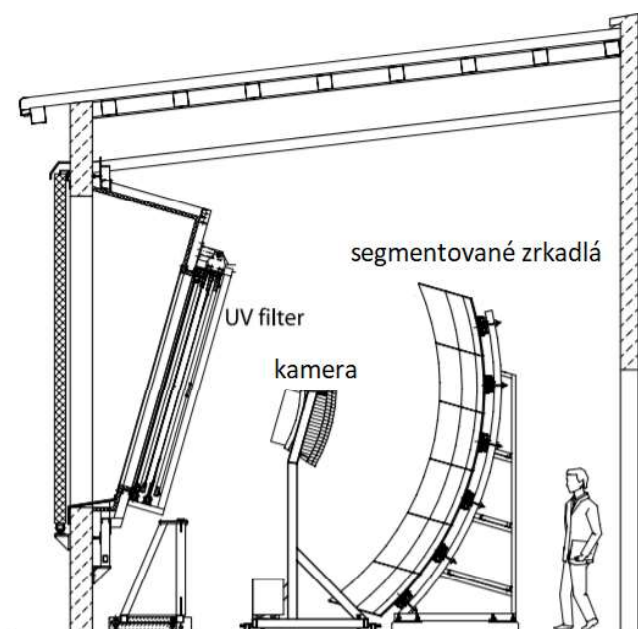
Základná zostava v observatóriu sa skladá z 24 teleskopov, ktoré sú zoskupené po šiestich na štyroch rôznych miestach na ploche observatória. Jeden teleskop zaberá azimutálny uhol 30° , takže kombinácia šiestich dokáže zaberať 180° . Tieto detektory fungujú na základe "fluorescencie atmosféry", kedy nabité častice v sprškách kozmického žiarenia excitujú molekuly dusíku v atmosfére a pri spätnej deexcitácii je vyžiarené svetlo o vlnovej dĺžke 300-430 nm.

Toto svetlo vniká do detektoru cez okno o polomere 1.1 m, ktoré obsahuje filter. Tento filter absorbuje viditeľné svetlo a prepúšťa také do vlnovej dĺžky 410 nm (UV), čo pokrýva takmer celé fluorescenčné spektrum dusíku. Pomáha teda pri filtrovaní šumu z viditeľného svetla z okolia. Na vonkajšej strane aparatury sa nachádzajú kruhové šošovky, ktoré opravujú geometrické optické chyby ako je sférická aberácia a koma. Svetlo je sústredené pomocou guľovitého zrkadla o polomere zakrivenia 3400 mm, ktoré má 13 m^2 na kameru o polomere zakrivenia 1700 mm, ktorá má 440 pixelov s fotonásobičmi. Táto kamera sníma spršku kozmického žiarenia pomocou aktivovaných pixelov. Keďže by bolo náročné na výrobu mať zakrivené zrkadlo s



Obr. 3.2: Dáta zobraň z testovacej nádrže v Argentíne, použitý bol testovací spúšťací signál na anódu fotonásobiča. 1 VEM tu zodpovedá približne $2.7 \cdot 10^7$ e. Prevzaté z [19].

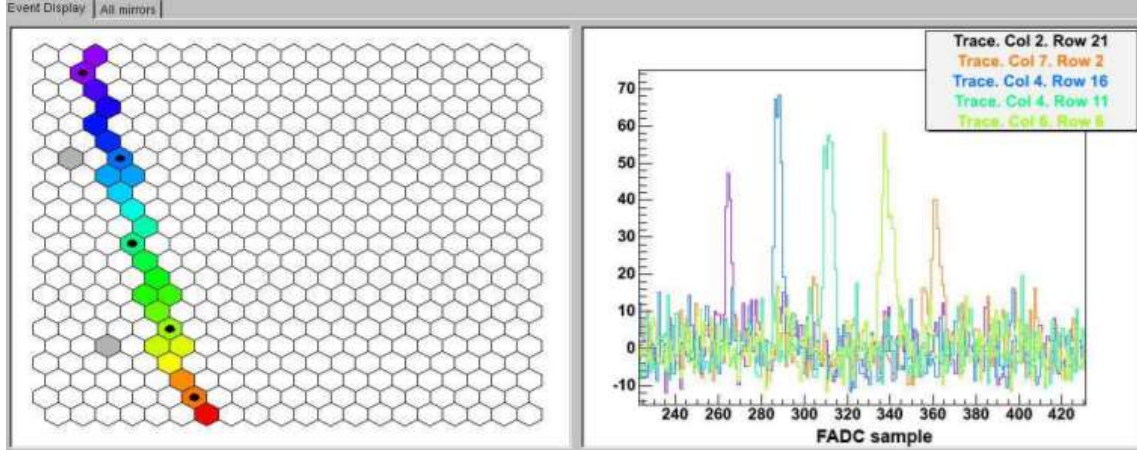
takou plochou, reálne sa používa segmentované zrkadlo a to buď do 60 pravouhlých zrkadiel alebo 36 hexagonálnych zrkadiel [17]. Schéma detektoru je znázornená na Obr.3.3.



Obr. 3.3: Schéma fluorescenčného detektoru. Prevzaté z [17].

Energia, ktorú častica stratila je priamoúmerná nasnímaným fotónom. Pomocou

merania miery fluorescenčného žiarenia ako funkcie atmosférickej hĺbky X , tento detektor meria pozdĺžny profil spŕšky $\frac{dE}{dx}(x)$. Integrovaním tohto profilu získame celkovú energiu, ktorá bola stratená v atmosfére cez elektromagnetickú časť, čo tvorí približne 90% energie primárnej častice. Keďže tento teleskop zaberá UV svetlo blízke spektru viditeľného, počas dňa by boli výsledky veľmi rušené. Z tohto dôvodu je detektor spustený iba počas tmavých a bezmesačných nocí za priaznivého počasia. Pracovný cyklus týchto detektorov je najviac 15%. Typická zaznamenaná udalosť je na Obr.3.4.



Obr. 3.4: Typický zaznamenaný event fluorescenčným detektorom. Naľavo sú vyznačené aktivované pixely a napravo odozva pixelov ako funkcia času pre pixely vyznačené čiernou bodkou. Prevzaté z [17].

3.3 HEAT (High Elevation Auger Telescopes)

Okrem týchto 24 teleskopov, sa v observatóriu nachádzajú aj tri ďalšie, ktoré sú súčasťou projektu HEAT. Tieto teleskopy merajú energie už od 10^{17} eV. Častice týchto energií by mali pochádzať ešte z našej galaxie. Podstatné je, že dokážu byť naklonené až na 60° , takže zaberajú spŕšky vyššie v atmosfére [21]. Keďže častice s nižšou energiou vyprodukujú menej fluorescenčného svetla, nameriame ich iba ak sú dostatočne blízko teleskopu. Na zrekonštruovanie spŕšky potrebujeme detektorom nasnímať X_{max} takže zaberanie väčšieho uhlu je lepšie pre meranie častíc blízko teleskopu.

3.4 AERA (Auger Engineering Radio Array)

AERA je názov pre rozšírenie Observatória Pierra Augera, ktoré detekuje spŕšky kozmického žiarenia pomocou ich emisie rádiových vĺn, ktoré sú prijímané anténami. Takýchto antén sa na observatóriu nachádza 153 a sú rozmiestnené na území 17 km^2 . Dokáže snímať frekvencie v rozmedzí 30 MHz až 80 MHz. Využíva dva typy antén, LPDAs (Logarithmic Periodic dipole Antennas), ktorých výsledky nezávisia

od podmienok na zemi a "butterfly antennas", ktoré sa ľahšie nasadzujú a majú vyšší zisk. [14]

Na zistenie energie primárnej častice sa tu využíva množstvo energie sekundárnych častíc, ktoré bolo stratené pri emisii rádiových vln v mieste kde sú stanice.

3.5 AugerPrime

AugerPrime je rozpracovaný upgrade observatória, ktorý ma viac cieľov. Jedným z nich je zistiť viac o časticiach pri vysokých energiách, takže vyšetriť energiu, ktorú častice strácajú propagáciou a maximálne energie, na aké môže byť vesmírnymi urýchľovačmi urýchlené.

Výsledky observatória ukazujú, že vo vysokých energiách (nad 10^{20} eV) nie sú iba protóny, ale mohli by byť aj ťažie jadrá [36]. Nesúlad medzi predpokladanými a nameranými dátami je aj v počte detekovaných miónov. Preto treba viac skúmať spršky kozmického žiarenia a rozpady hadrónov.

Je zaujímavé študovať fyziku častíc v takýchto vysokých energiách, pretože pozorujeme nesúlad medzi výsledkami z observatória a modelmi hadrónových reakcií extrapolovaných dát z experimentov z umelých urýchľovačov.

Tento upgrade zahŕňa nasledujúce body:

- Umiestnenie plastových scintilátorov na každú Čerenkovovu stanicu. Týmto spôsobom zlepšime odlíšenie elektromagnetickej a miónovej komponenty spršky.
- Pridanie malého fotonásobiča na vodné Čerenkovove detektory.
- Rozšírenie podzemných miónových detektorov.
- Inštalácia rádiových detektorov
- Zavedenie novej elektroniky, ktorá bude prijímať signály zo scintilátorov aj Čerenkovových vodných detektorov. Zahŕňa taktiež rôzne vylepšenia, čo sa týka napríklad zberu dát alebo spresnenej kalibrácie detektorov.
- Predĺženie operačného cyklu fluorescenčných detektorov.

3.5.1 Scintilátory

Najpodstatnejšou časťou upgradeu je inštalácia scintilátorov, ktoré vďaka ich umiestneniu navrchu vodných nádrží zachytia viac elektrónov a fotónov (menej prenikavá zložka), kdežto vodné detektory viac miónov (viac prenikavá zložka). Tento scintilátor sa skladá z 12 polystyrénových doštičiek, ktoré sú dlhé 1.6 m, hrubé 1 cm a široké 10 cm. Doštičkami prechádza wavelength shifting vlákno a všetky vlákna sú privedené na jeden fotonásobič. Detektor je umiestnený v hliníkovom obale, pretože je potrebné aby vydržal vo vysokých teplotách, vetre a nepriaznivých podmienkach 10 rokov.

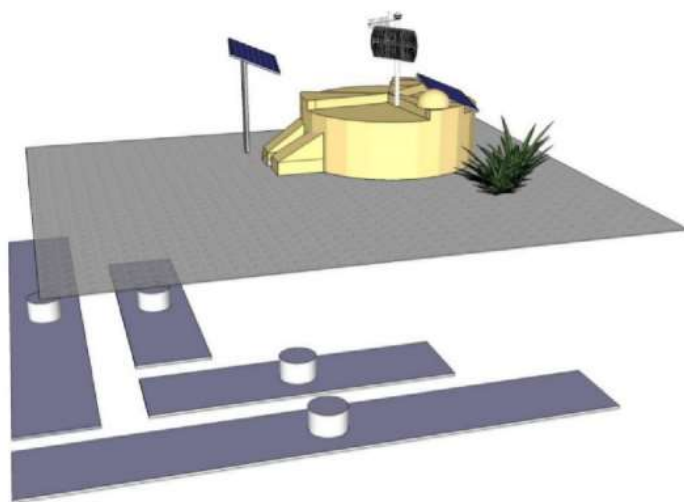
Scintilátor bude napojený na zjednotenú upgradeovanú základnú dosku - UUB (Upgraded Unified Board), ako ďalší fotonásobič [15].

3.5.2 Miónové detektory

Projekt na výstavbu miónových detektorov sa nazýva AMIGA (Auger Muons and Infill for the Ground Array). Pozostáva z rozmiestnenia 61 miónových detektorov na ploche 23.5 km^2 . Tie sú zakopané v hĺbke 1.3 m pod Čerenkovovými vodnými detektormi a každý má plochu 30 m^2 . Merajú miónovú zložku spršiek s energiami nad $3 \cdot 10^{17} \text{ eV}$.

Detektory sú zakopané v tejto hĺbke pretože chceme aby registrovali iba mióny, ktoré sú prenikavejšie ako elektróny. Každý modul sa skladá z 64 polystyrénových doštičiek, ktoré sú 4 m dlhé, 4.1 cm široké a 1 cm hrubé. Aktívna plocha jedného modulu teda činí 10 m^2 . Stanica sa skladá z dvoch 10 m^2 a dvoch 5 m^2 modulov. Toto rozloženie je znázornené na Obr.3.5. Doštičky sú napojené na optické vlákna, ktoré prenášajú signál do jedného fotonásobiča v strede, ktorý má 64 kanálov a nazýva sa multi-anode fotonásobič.

Napájanie miónových detektorov je taktiež cez solárne panely [22].



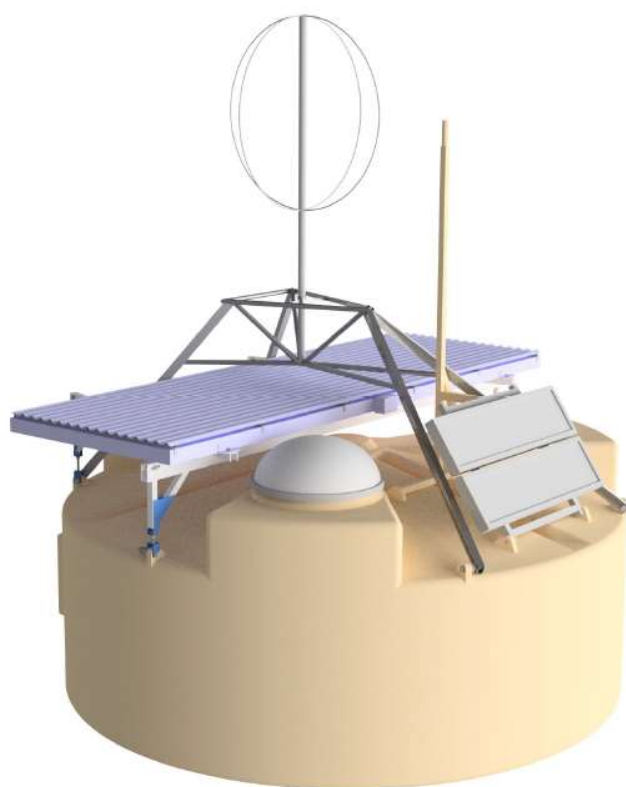
Obr. 3.5: Rozloženie miónových detektorov pod vodnou nádržou. Prevzaté z [29].

3.5.3 Rádiové detektory

Najnovšou súčasťou upgradeu je inštalácia rádiových detektorov na každú stanicu povrchového detektora. Montáž na nádrž je praktická z dôvodu využívania spoločnej infraštruktúry na napájanie, či komunikácie.

Čím viac je sprška horizontálna, tým ze sebou zanecháva väčšiu stopu. Antény lepšie vidia takéto inklinované spršky, kďežto scintilačné detektory vidia skôr vertikálnych spršiek. Inštaláciou týchto detektorov teda doplníme uhol snímaný tenkými scintilátormi.

Rádiové detektory tvoria antény typu SALLA, ktoré sú tvorené z dvoch kruhov o prieme 1.2 m v dvoch polarizačných rovinách. Model stanice s takouto anténou je na Obr. 3.6.



Obr. 3.6: Model vylepšenej vodnej nádrže so scintilátorom navrchu a anténou SALLA. Prevzaté z [33].

Kapitola 4

Meranie vlastností novej elektroniky pre povrchové detektory

UUB je upgradeovaná verzia základnej dosky, na ktorú sú napojené výstupy zo všetkých fotonásobičov. Jej upgrade bol nutný najmä preto, že s pribúdajúcimi detektormi potrebujeme kanály na karte navyše. Táto karta slúži na viac vecí, napríklad na zber dát, triggrovanie, prevádzanie analógového signálu či kalibráciu.

UUB má oproti pôvodnej verzii rýchlejšie a precíznejšie ADCs (Analog to Digital Converter), 120 MHz oproti starej verzii 40 MHz, ktoré majú vyšší dynamický rozsah a to 12 bitov oproti pôvodným 10 bitom. Ďalej obsahuje FPGA, čiže programovateľné hradlové pole, ktoré sprostredkúva čítanie ADC signálov či generovanie triggrov. Hlavný procesor je 10-krát rýchlejší ako pôvodný a má väčšiu pamäť, čo umožňuje dôkladnejšie spracovanie signálu už v danej stanici.

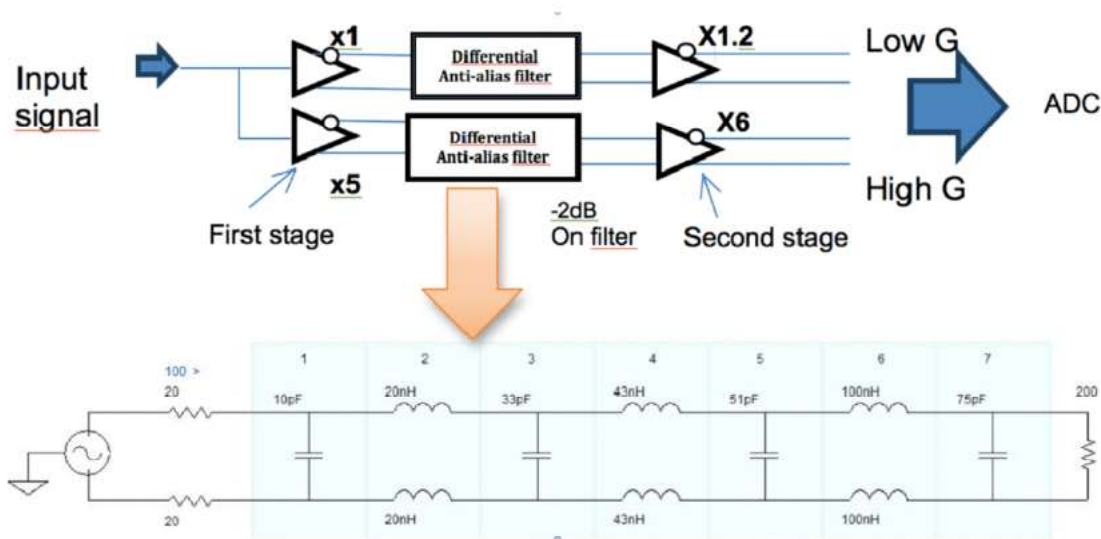
Takáto karta má kanály, do ktorých sú zapojené výstupné signály z fotonásobičov a ďalej spracovávané ADC prevodníkmi. Tieto kanály sú buď s vysokým alebo nízkym faktorom zosilnenia.

Na pôvodnej karte je na kanál z nízkym faktorom zosilnenia privádzaný signál z anódy fotonásobiča, kdežto na kanál s vysokým faktorom zosilnenia je privádzaný signál z poslednej dynódy, ktorý je zosilnený v základni fotonásobiča. Pomer medzi týmito dvoma kanálmi je približne 32 [30].

Na UUB je princíp zosilnenia odlišný. Obidva signály sú tu privádzané z anódy a paralelne zosilnené zosilňovačmi s rozličnými faktormi. Celý mechanizmus zosilňovania je znázornený na Obr.4.1. Karta obsahuje kanály pre fotonásobiče, rozdelené do dvojíc, kde tri dvojice obsahujú kanál s vysokým (HG) a nízkym (LG) faktorom zosilnenia, medzi ktorými je pomer 32 a sú určené pre tri veľké fotonásobiče na strope vodného Čerenkovového detektoru. Jedna dvojica je s faktorom zosilnenia 128, a je určená pre signál zo scintilátoru. Z praktických dôvodov je karta vyrobená tak, aby sedela na už existujúcej verzii fotonásobičov.

Ďalej karta obsahuje mikrokontroler, ktorý monitoruje vysoké napätie fotonásobičov a dohliada na rôzne napájacie napätia pre FPGA.

Spotreba UUB je vyššia ako pôvodnej a to 12 W namiesto 10 W, takže je potrebné aj vylepšenie solárneho napájania (12 W by súčasné panely ešte zvládli, ale s napojením antén na rádiovú detekciu sa spotreba ešte zvýši). V súčasnosti už existujú tri verzie UUB a to V1, V2 a V3. V1 bola prvá verzia, ktorá bola testovaná a pomocou



Obr. 4.1: Schéma zosilňovania signálov. HG kanál z fotonásobiča je najprv zosilnený asi päťnásobne, následne je prefiltrovaný 5-pólovým nízkopásmovým filtrom s použitím diskretných pasívnych cievok a kondenzátorov a opäť zosilnený, LG kanál je utlmený a prefiltrovaný tiež. Prevzaté z [30].

skúseností s ňou, boli vydávané nové verzie aby sa šum znížil čo najviac, či znížila spotreba.

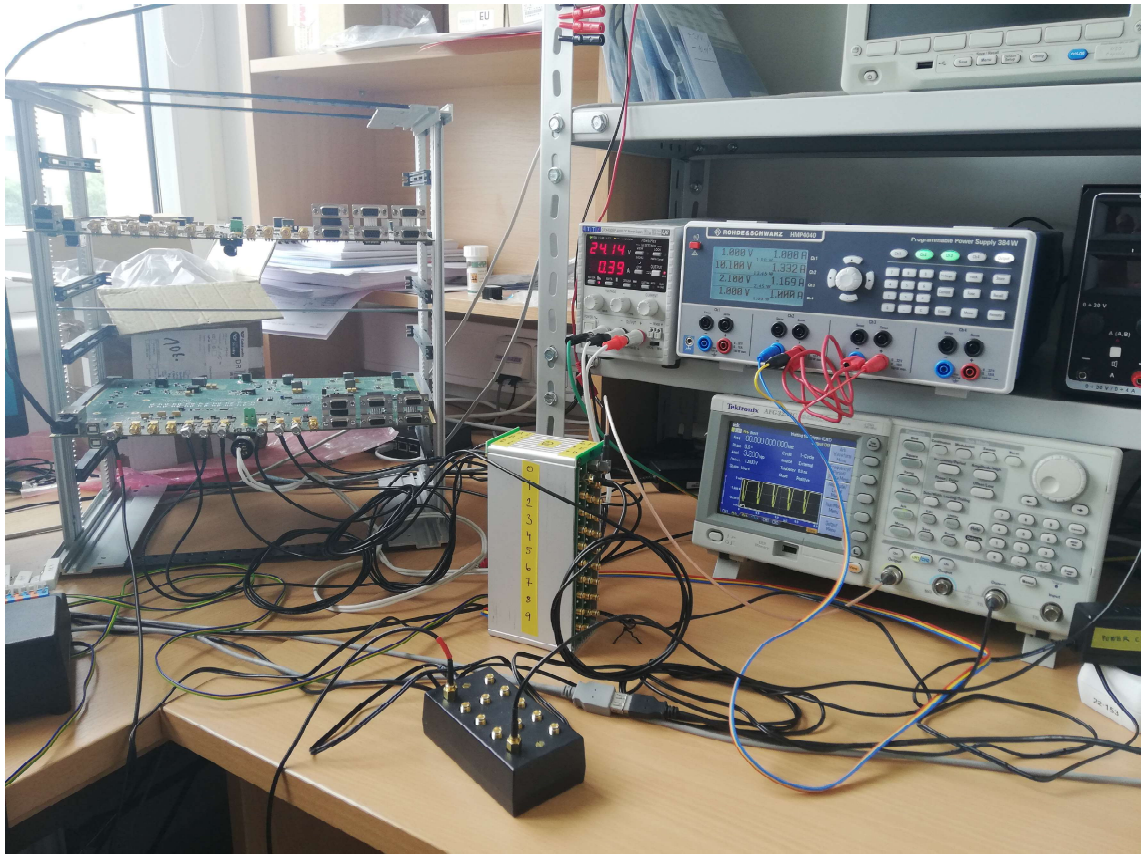
4.1 Popis experimentálneho usporiadania

V laboratóriu sme merali na UUB karte, typ V1. Meralo sa v dvoch usporiadaniach. Prvé usporiadanie bolo s generátorom pulzov, ktorý bol zapojený do distribučného modulu. Tento distribučný modul rozdeľuje signál z generátoru do všetkých kanálov na karte. Ďalej aparatúra obsahovala jednotku, ktorá časuje spúšťač signál. Toto usporiadanie je na Obr.4.2.

Druhé usporiadanie bolo so scintilátormi z projektu KASCADE¹. Tri scintilátory boli umiestnené v stojane kolmo nad sebou. Každý scintilátor má dva fotonásobiče, ktorých výstupy boli zapojené do kanálov na našej karte. Scintilátormi boli zaznamenávané spŕšky kozmického žiarenia, ktoré prešli budovou. Fotografia usporiadania je na Obr. 4.3.

Všade nás zaujímali práve kanály s vysokým faktorom zosilnenia (kanály 2, 4, 6, 10), pretože tam je úroveň šumu najvyššia a pomocou nich sú zaznamenané spŕšky so slabým signálom.

¹Experiment KASCADE sa zaoberal pozorovaním spŕšiek kozmických častíc v energiách 10^{14} eV až 10^{17} eV do roku 2013. Bol situovaný v kampuse Karlsruhe Institute of Technology v Nemecku. Jeho najväčšou časťou bol systém 252 scintilačných detektorov rozmiestnených v mriežke [35]. Experiment sa venoval hlavne pozorovaniu kolena v energetickom spektre kozmického žiarenia. Jeho časti sa použili neskôr v iných experimentoch ako je napríklad LOFAR alebo Tunka.



Obr. 4.2: Testovací systém s kartou, generátorom pulzov a distribučným modulom a časovacou jednotkou.

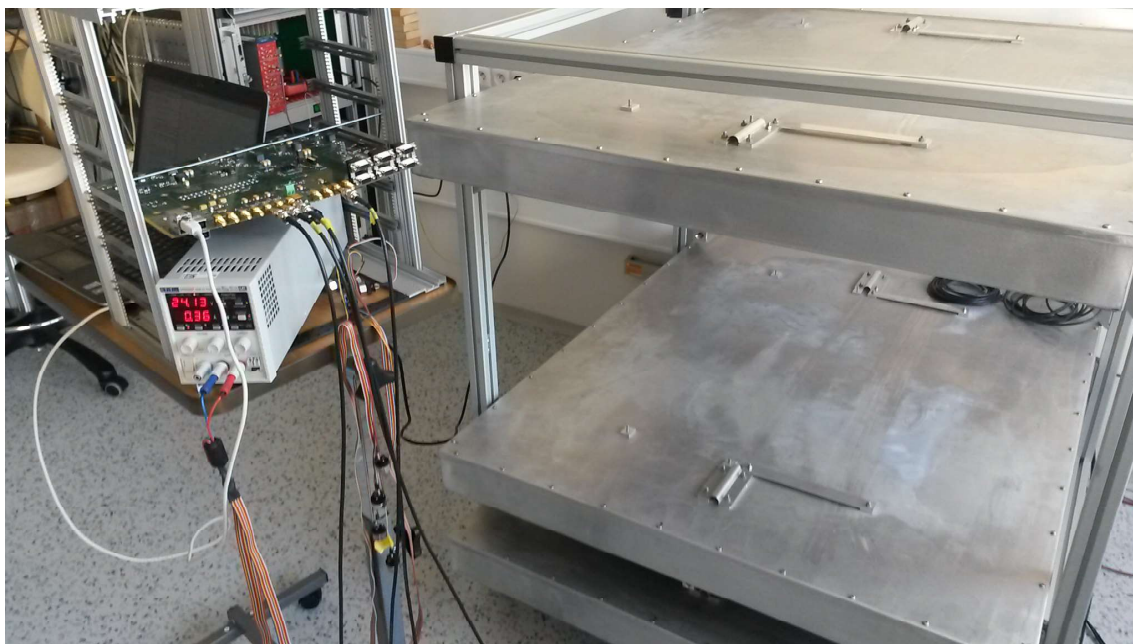
4.2 Meranie šumu

Šum v našom kontexte znamená nežiadúci signál, ktorý vytvára každá elektronická súčiastka. Pri detekcii častíc je potrebné, aby bol tento šum dobre rozlíšiteľný od signálu, čiže nízky, aby sa žiadúci signál v ňom nestratil.

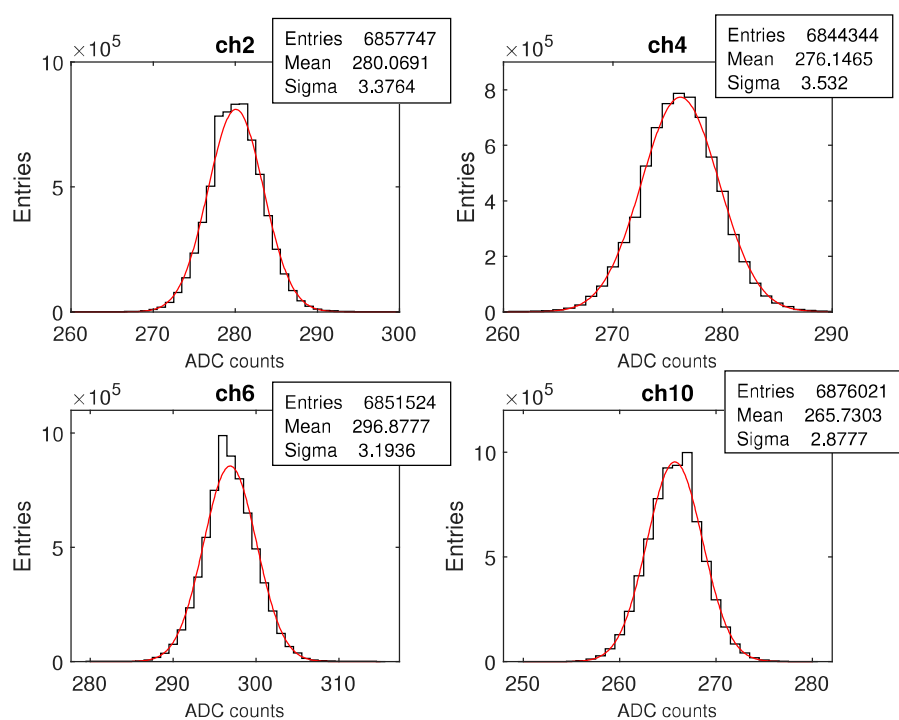
Pri meraní bola najprv použitá konfigurácia s generátorom pulzov a distribučnou jednotkou. Do všetkých kanálov karty boli teda posielané pulzy, ktoré sa zaznamenávali na počítači. Nameraných bolo 100 súborov. Spúšťač je nastavený tak, že signál prichádza po určitom časovom intervale. Z dát som teda v každom súbore pre každý kanál vybrala prvých 500 hodnôt (tu sa poslaný signál nenachádzal). Tieto hodnoty sú teda pedestal. Z týchto dát som spravila histogram, aby bola vidno hodnota pedestalu a jeho fluktuácia. Histogram je na Obr. 4.5.

Rovnakú analýzu som spravila aj pre konfiguráciu, kedy mala karta otvorené všetky analógové vstupy (odpojil sa generátor aj distribučný modul). Histogram je na Obr. 4.6.

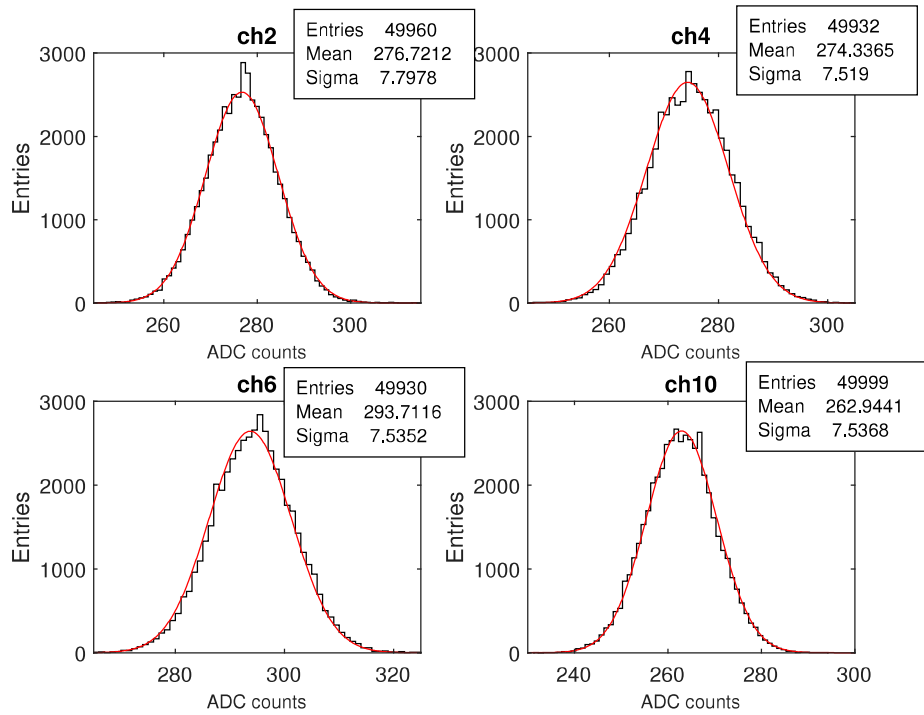
V usporiadaní so scintilátormi bolo nameraných 11 463 sprášiek. Z každého kanálu som vybrala prvých 600 hodnôt, pretože signál sprášky bol zaznamenaný neskôr. Pre všetky kanály som opäť urobila histogramy týchto hodnôt, ktoré sú na Obr. 4.4.



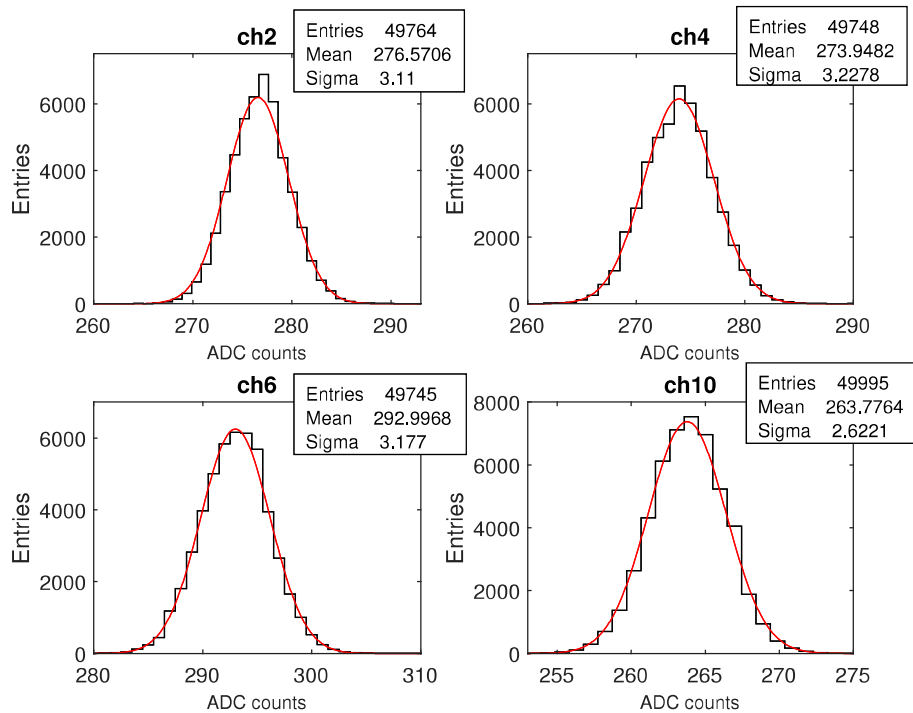
Obr. 4.3: Usporiadanie s tromi scintilátormi v stojane nad sebou, z ktorých výstupy sú napojené na našu UUB.



Obr. 4.4: Histogramy šumu pri meraní kozmických spŕšok scintilátormi pre jednotlivé kanály chi, kde i je číslo kanálu.



Obr. 4.5: Histogramy šumu pre jednotlivé kanály chi, kde i je číslo kanálu. Konfigurácia s distribučným modulom a generátorom.



Obr. 4.6: Histogramy šumu pre jednotlivé kanály chi, kde i je číslo kanálu. Konfigurácia kedy sú analógové vstupy otvorené.

4.2.1 Diskusia

Vidíme, že pri konfigurácii s generátorom a distribučným modulom (Obr.4.5) máme štandardnú deviačnú odchýlku celkom vysokú a to okolo 7.5 ADC jednotiek na všetkých high-gain kanáloch. Tieto zariadenia nám do signálu pridávali šum.

Z Obr. 4.6, kde boli otvorené analógové vstupy vidíme, že tu je odchýlka omnoho menšia a to okolo 3 ADC jednotiek.

Pri konfigurácii so scintilátormi máme podobnú odchýlku ako pri predchádzajúcom usporiadaní. To znamená, že pripojené fotonásobiče majú rovnaký efekt ako keby boli vstupy otvorené.

Keďže sa meralo na UUB V1, šum je ešte stále privysoký. Reálne na dobré zaznamenanie spŕšok s nízkym signálom potrebujeme podľa špecifikácií odchýlku menšiu ako 2 ADC jednotky. V2 a V3 musia byť optimalizované tak, aby sa tento šum znížil.

4.3 Pomer kanálov s vysokým a nízkym faktorom zosilnenia.

Ďalším parametrom, ktorý bol na UUB sledovaný, je pomer kanálov s vysokým a nízkym faktorom zosilnenia. Pri zisťovaní pomeru som použila tie isté dáta ako pre určenie šumu. Prvá konfigurácia bola opäť s generátorom a distribučnou jednotkou. V získaných dátach som z každého súboru a pre každý kanál našla maximum signálu. Pozícia tohto maxima určovala pozíciu prvého píku signálu z generátora. Po tejto pozícii som vybrala ešte pár binov, aby som obsiahla celý prvý pík. Od týchto dát som odpočítala už priemernú hodnotu prvých 500 hodnôt, čiže pedestal, a následne numerickou integráciou vyrátala plochu pod píkom. Aby som toto mohla urobiť, tak som si musela overiť, že šum má normálne rozdelenie, čo je viditeľné z predchádzajúcich grafov. Hodnoty na príslušnom high-gain (kanály 2, 4, 6, 10) a low-gain (1, 3, 5, 9) som podelila a dostala pomer. Toto som urobila pre každý súbor a z výsledných 100 pomerov som urobila histogramy pre každú dvojicu kanálov. Histogramy faktoru sú na Obr. 4.7.

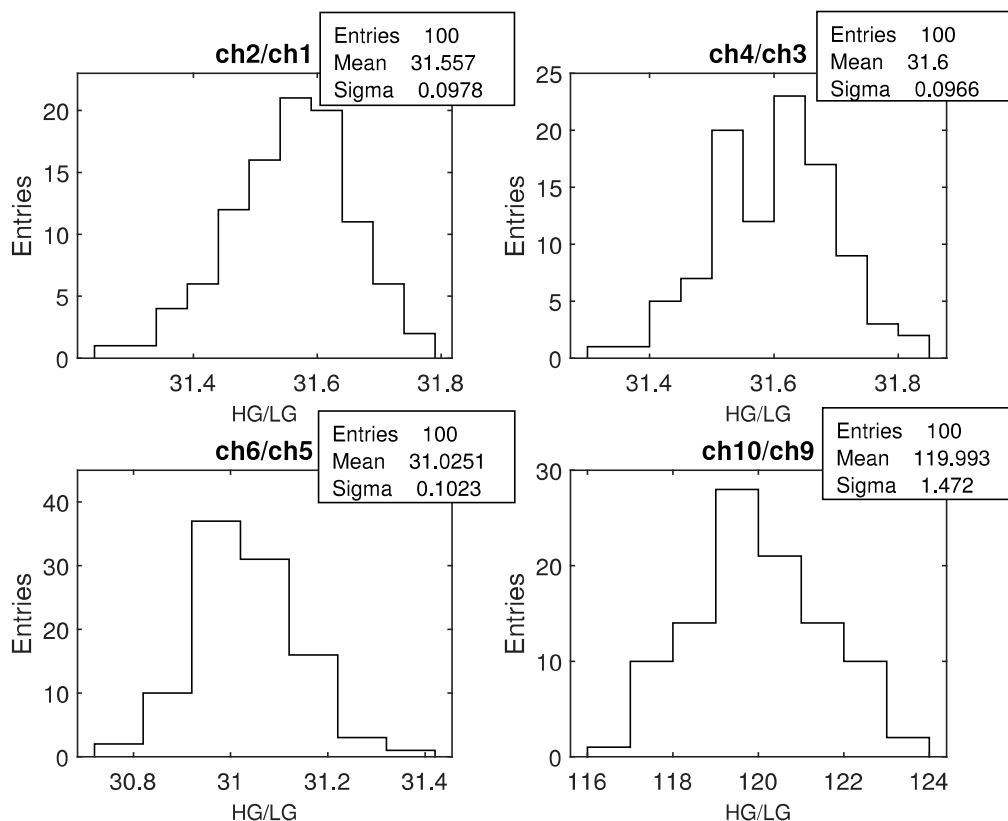
Ďalej som určovala pomer pre dáta namerané scintilátormi. Tu bolo potreba z nameraných dát vyselektovať tie, pri ktorých signál nadobúdal hodnotu 4095 ADC jednotiek. Táto hodnota je totiž maximálny výstup ADC prevodníka a teda je vysoká pravdepodobnosť, že tento signál bol satureovaný. Z počiatočných 11 463 signálov spŕšiek bolo nesatureovaných iba 26. Následne som previedla rovnakú analýzu ako v predchádzajúcej konfigurácii, našla som si prvý pík, odčítala priemernú hodnotu pedestalu a numericky zintegrovala. Histogramy faktoru zosilnenia sú na Obr. 4.8.

4.3.1 Diskusia

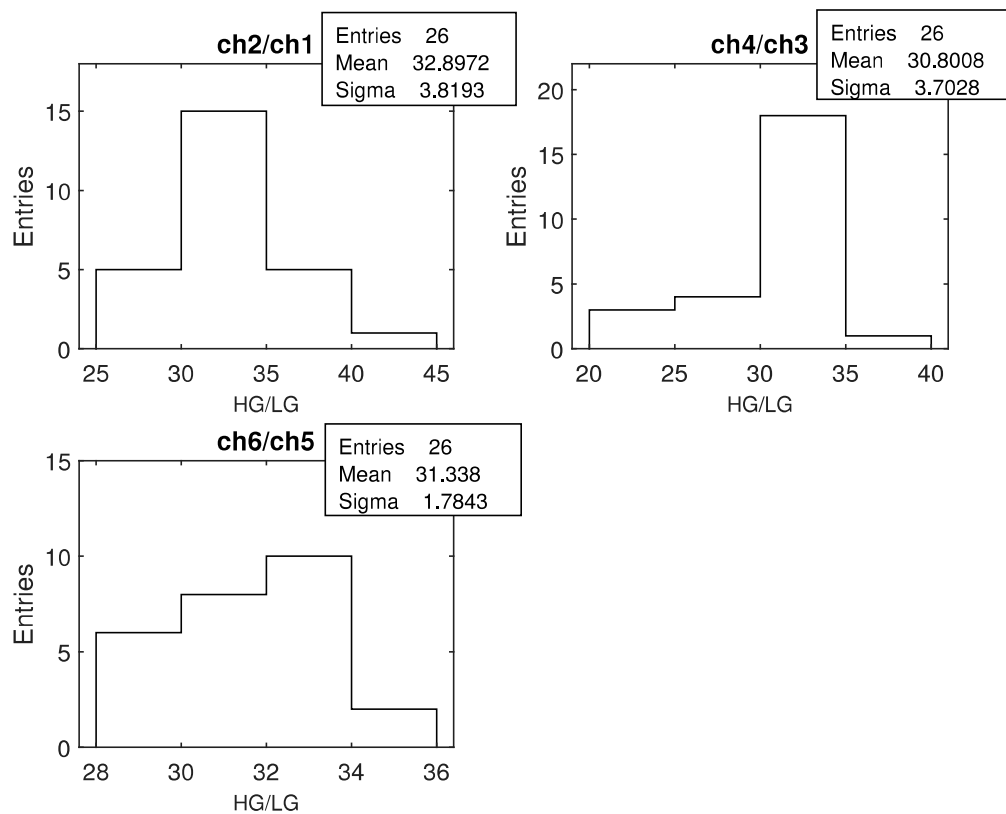
Pomer zosilnenia pre dvojice kanálov vyšli trochu nižšie ako je uvedené v dokumentácii. Udávaná hodnota je pre prvé tri 32 a mne vyšlo približne 31. Faktor zosilnenia poslednej dvojice mal výjsť 128 a mne vyšiel okolo 119. K rozdielnostiam mohlo dôjsť pri rôznych spracovávaniach dát. Pri hľadaní plochy prvého píku stačí zájsť trochu

viac do šumu, ktorý za ním nasledujeme a už je výsledok rozdielny.

Pri meraní so scintilátormi vychádzali pomery zosilnenia s vyššou odchýlkou ako pri použití generátora. Z kanálov 9 a 10 sa mi nepodarilo určiť tento pomer, pretože spúšťač vyžadoval koincidienciu medzi prvými tromi analógovými vstupmi, ale nie na poslednom vstupe. Zachytených bolo teda málo vhodných spříšiek na dobrú štatistiku. Pri tomto meraní sa všetky hodnoty s chybovým intervalom zmestili do predpokladanej hodnoty 32, tento chybový interval je však príliš veľký.



Obr. 4.7: Pomer kanálov s vysokým a nízkym faktorom zosilnenia pri použití generátora pulzov s distribučným modulom, chi je názov i-teho kanála.



Obr. 4.8: Pomer kanálov s vysokým a nízkym faktorom zosilnenia pri meraní kozmických spŕšok scintilátormi, chi je názov i-teho kanála.

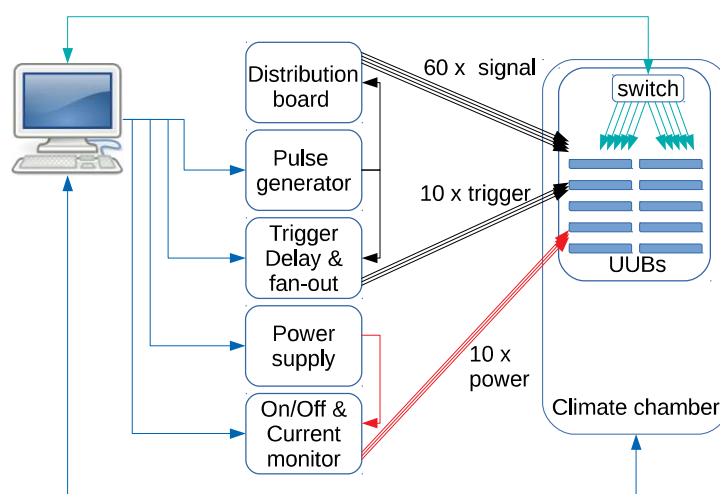
Kapitola 5

Štúdium sezónnych závislostí

Detektory a elektronika sú umiestnené v Argentínskej pampe, kde musia prežiť veľký rozdiel teplôt, pretože sú takmer nechránené od prostredia. UUB je preto vopred testovaná v laboratóriu, aby sme vedeli, ako sa pri rozdielnych teplotách chová.

5.1 Testovanie UUB

Aparatúra na testovanie funkčnosti UUB pri rôznych teplotách sa skladá z teplotnej komory, v ktorej sa nachádza desať kariet, generátora pulzov, ktorý je pomocou distribučného modulu napojený do 60 kanálov. Aparatúra ďalej obsahuje zariadenie, ktoré monitoruje aký ide prúd do každej jednej karty a jednotku, ktorá posiela spúšťač signál z generátora do všetkých kariet s nastaviteľným omeškaním. Táto schéma je znázornená na Obr. 5.1. Pri testovaní sa karty vložia do teplotnej komory, v ktorej je generovaná teplota od -20°C do 70°C v cykloch. Počas týchto zmien teplôt sa monitorujú vlastnosti karty.



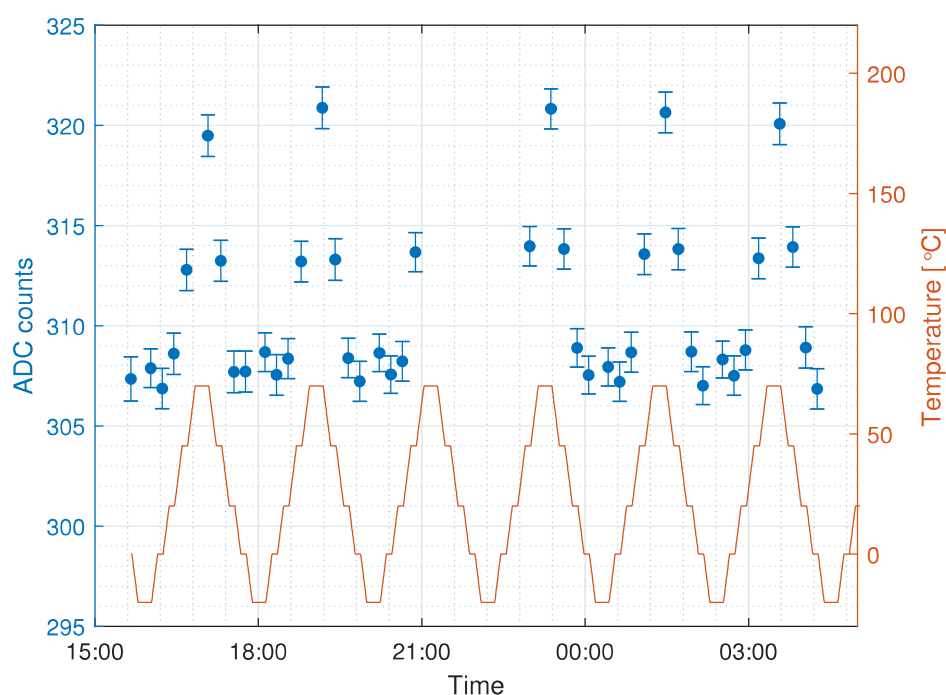
Obr. 5.1: Schéma testovania UUB v laboratóriu. Prevzaté z [31].

Týmto spôsobom bola nameraná závislosť šumu na teplote, ktorú som spracovávala. Počas teplotných zmien bolo v komore nameraných 4200 súborov, z ktorých každý obsahoval 2048 ADC hodnôt pre všetkých 10 kanálov. Frekvencia merania je 250 MHz a teda jedna hodnota je nameraná za 4 ns. Namerať 2048 hodnôt teda trvá 8.192 ms. Pre moju prácu som si vybrala kanál 6.

Každých 100 súborov bolo nameraných v rovnakom čase a rovnakej teplote. Celkovo bolo teda 42 bodov.

Z každých 100 súborov som vypočítala hodnotu pedestálu a vykreslila v závislosti na čase. Celý graf som preložila teplotnou krivkou, ktorá znázorňuje priebeh teploty v komore. Graf je na Obr.5.2.

Následne som si pre každý súbor vypočítala štandardnú deviačnú odchýlku pedestálu, teda šum a z každých 100 urobila priemer. Graf je na Obr.5.3.



Obr. 5.2: Priemerná hodnota pedestálu v závislosti na teplote pri meraní v teplotnej komore.

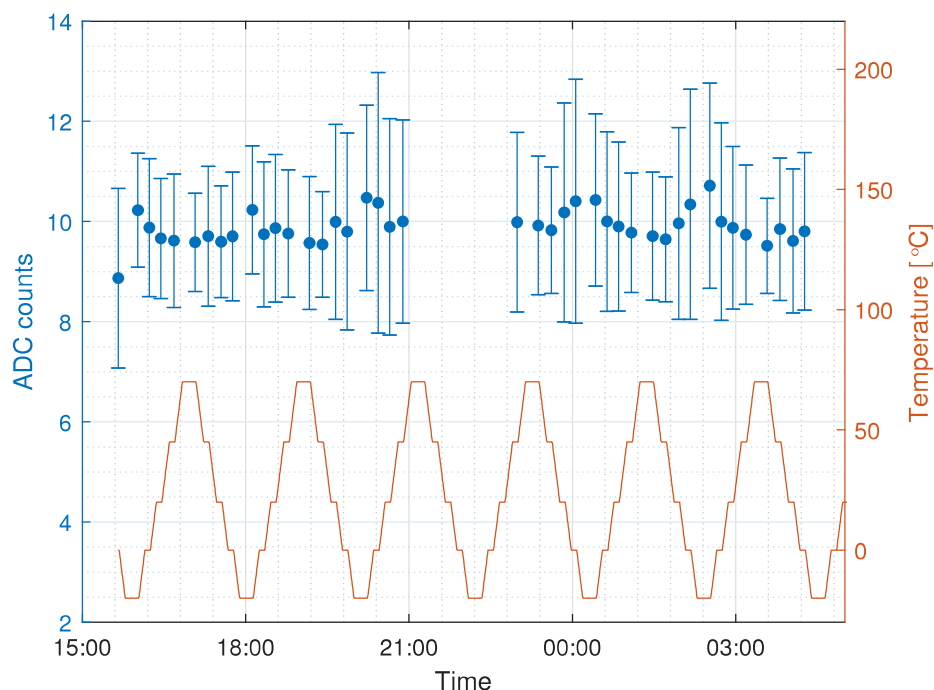
5.2 Teplotná závislosť pre dáta z Observatória

Pre porovnanie teplotnej závislosti karty UUB V1 a V2 som ďalej spracovávala dáta z Observatória Pierra Augera, zo stanice č.1737 (Peru).

Vyselektované boli dáta pre január, marec a jún. Každý z dátových súborov bol nameraný v inom dátume a čase. Opäť som si pre porovnanie vybrali kanál 6.

Z každého dátového súboru som vybrala prvých 500 hodnôt pred príchodom spŕšky a vyrátala z nich priemernú hodnotu a štandardnú deviačnú odchýlku.

Hodnoty som preložila teplotnou krivkou od januára do júna, ktorej dáta boli získané



Obr. 5.3: Šum v závislosti na teplote pri meraní v teplotnej komore.

z meteorologickej stanice v Observatóriu.

Graf závislosti pedestálu na čase a teda aj na teplote je na Obr. 5.4 a graf odchýlky, teda šumu je na Obr. 5.5.

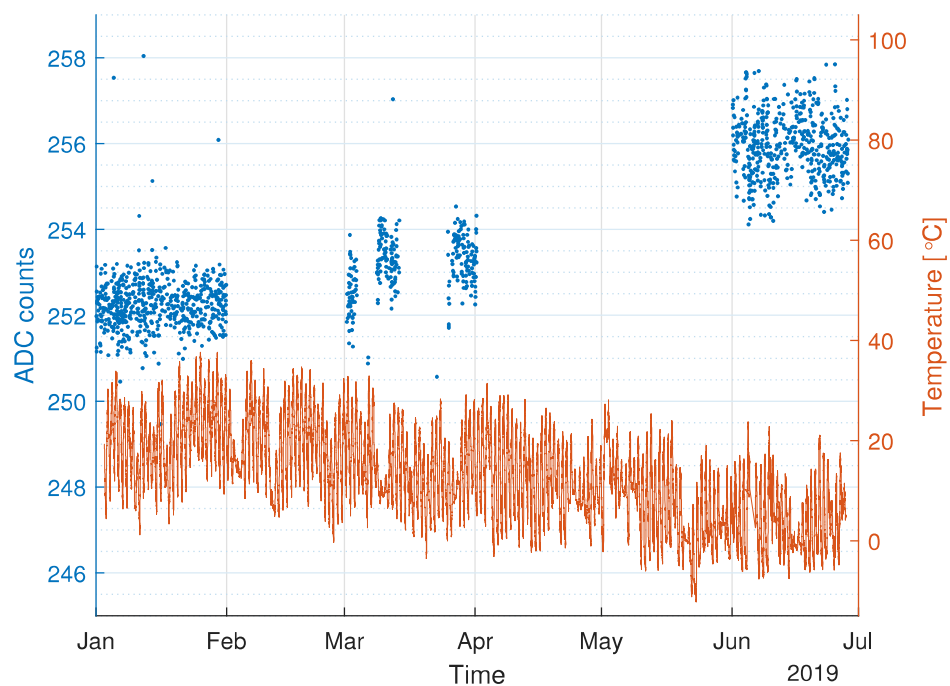
5.3 Diskusia

Pre meranie v laboratóriu na karte V1 vyšli nasledujúce hodnoty pedestálu. Pri teplotách do 20 °C mi vyšiel (307.6 ± 0.6) ADC jednotiek. Pri teplotách nameraných v 45 °C (313.5 ± 0.6) ADC jednotiek a v 70 °C (320.4 ± 0.5) ADC jednotiek.

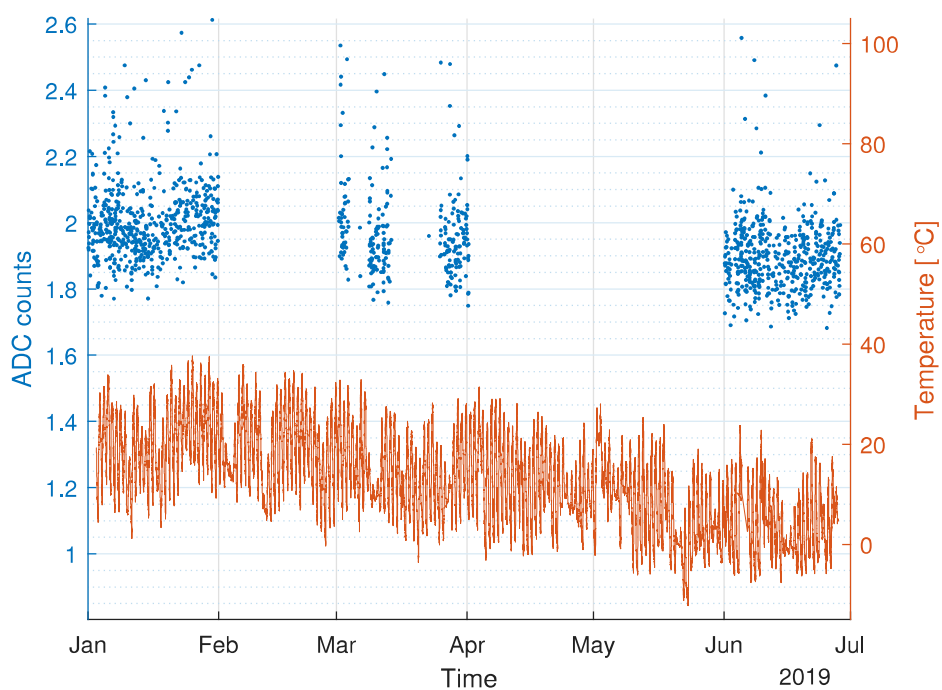
Hodnota šumu sa s meniacou sa teplotou nemenila a jej hodnota bola v priemere (9.8 ± 0.3) .

V pampe bola priemerná hodnota teploty v januári (20 ± 6) °C, v marci (14 ± 6) °C a v júni (5 ± 6) °C. Úroveň pedestálu na V2 bola pre január (252.3 ± 0.8) ADC jednotiek, pre marec (253.2 ± 0.9) ADC jednotiek a pre jún (256 ± 1) ADC jednotiek. Šum bol pre január (2 ± 3) ADC jednotiek, pre marec (2 ± 2) ADC jednotiek a pre jún (2 ± 4) ADC jednotiek.

Z výsledkov vidíme, že UUB V2 má oproti V1 výrazne nižší šum. Taktiež má nižší pedestál.



Obr. 5.4: Pedestál v závislosti na teplote z dát z Observatória Pierra Augera, stanice 1737.



Obr. 5.5: Šum v závislosti na teplote z dát z Observatória Pierra Augera, stanice 1737.

Záver

Práca sa zaoberá štúdiom vlastností elektroniky, ktorá je súčasťou modernizácie Observatória Pierra Augera.

V úvode bola zrealizovaná rešeršná časť týkajúca sa kozmického žiarenia a jeho vlastností, detekčných techník, Observatória Pierra Augera a jeho modernizácie AugerPrime. Súčasťou bol aj opis novej základnej dosky nazývanej UUB, na ktorej sme sledovali vybrané vlastnosti.

Jednou z vybraných vlastností bol šum, čiže nežiadúci elektronický signál. Šum som sledovala na kanáloch s vyšším faktorom zosilnenia, pretože tieto kanály zaznamenávajú spršky so slabším signálom. V laboratóriu na FZÚ sme merali šum na staršej verzii karty UUB, V1. Ten tu vychádzal okolo 3 ADC jednotiek pre usporiadanie s otvorenými analógovými vstupmi karty a tiež pre usporiadanie s napojenými fotónásobičmi scintilátorov pri meraní kozmických spršiek. Hodnota pre konfiguráciu s napojeným generátorom pulzov a distribučným modulom, ktorý nám signál rozdelil do všetkých kanálov kariet sa značne líšila a vychádzala až okolo 7 ADC jednotiek. Podľa špecifikácií by táto hodnota mala vychádzať menej ako 2 ADC jednotky, aby sa slabšie signály v šume nestratili.

Ďalšou sledovanou vlastnosťou bol pomer kanálov s vysokým a nízkym faktorom zosilnenia. UUB obsahuje kanály usporiadané v pároch, kde jeden je s nízkym a druhý s vysokým faktorom zosilnenia. Tento pomer slúži na to, aby elektronika zachytila väčšie rozpätie signálu. Udávaný pomer je pre prvé 3 páry kanálov 32 a pre posledný 128. Pomer som určovala v dvoch konfiguráciách, jednou s generátorom pulzov a distribučným modulom a následne so scintilátormi. Tieto pomery vyšli pre prvé tri kanály okolo 31 pri oboch usporiadaniach, pri poslednom páre však vyšiel pomer 119 pre konfiguráciu s generátorom pulzom a pri použití scintilátoru som vôbec nebola schopná tento pomer určiť, pretože neboli zachytené vhodné spršky na dobrú štatistiku.

V poslednej časti som študovala závislosť šumu jednotlivých kanálov karty na teplote. Najprv boli vložené UUB (V1) do teplotnej komory, kde boli generované teploty od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ v cykloch a sledovala som pedestal a jeho štandardnú deviačnú odchýlku. Zistila som, že pedestal je viditeľne závislý na teplote. Čím vyššia teplota, tým vyšší pedestal. Šum sa však počas striedania teplôt výrazne nemenil. Následne som analyzovala dáta z Observatória Pierra Augera. Vybrala som si jednu stanicu, na ktorej už bola implementovaná novšia verzia UUB, V2. Vyselektované boli dáta za mesiace január, marec a jún. Teplota z týchto mesiacov bola zistená pomocou údajov z meteorologickej stanice, ktorá sa v observatóriu nachádza. Pri sledovaní závislosti šumu som zistila, že je na V2 o zäz nižší ako na V1 a to niečo viac ako je požadovaná hodnota 2. Pedestal nemal viditeľnú závislosť na teplote medzi dňom a

nocou, štandardná deviačná odchýlka sa opäť v čase výrazne nemenila.

V budúcnosti by som rada otestovala verzie V2 aj V3 v laboratóriu a porovnala šum s hodnotami pre V1. Taktiež by bolo zaujímavé sa pozrieť na dáta z observatória na dlhší časový úsek ako iba tri mesiace, aby sme videli celkový trend.

Literatúra

- [1] Pierre Auger Collaboration. The Pierre Auger cosmic ray observatory. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 798 (2015): 172-213.
- [2] De Angelis, Alessandro, and Mário João Martins Pimenta. Introduction to particle and astroparticle physics: questions to the Universe. Springer, 2015.
- [3] Hörandel, Jörg R. Early cosmic-ray work published in German. AIP Conference Proceedings. Vol. 1516. No. 1. AIP, 2013.
- [4] Wikimedia Commons. Cosmic rays: Increase of ionization with height as measured by Hess in 1912 and by Kolhörster in 1913 and 1914. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/11/HessKol.jpg>
- [5] Hess, Victor. On the Observations of the Penetrating Radiation during Seven Balloon Flights. arXiv preprint arXiv:1808.02927 (2018).
- [6] D.H. Perkins, Particle Astrophysics, Second Edition, Oxford Master Series in Physics (2009).
- [7] Berezhinsky, V. Extragalactic cosmic rays and their signatures. Astroparticle Physics 53 (2014): 120-129.
- [8] Coan T.E, Ye J. Muon Physics. <http://advancedlab.physics.gatech.edu/labs/Muons/Muons.pdf>
- [9] Leo, William R. Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how-to approach. Springer Science and Business Media, 2012.
- [10] Olive, Keith A., et al. Review of particle physics. Chinese physics C 38.9 (2014): 090001.
- [11] Jelley, J. V. Cerenkov radiation and its applications. British Journal of Applied Physics 6.7 (1955): 227.
- [12] Grootendorst, M. R., et al. Cerenkov luminescence imaging (CLI) for image-guided cancer surgery. Clinical and translational imaging 4.5 (2016): 353-366.
- [13] Knoll, Glenn F. Radiation detection and measurement. John Wiley and Sons, 2010.

- [14] Schröder, Frank G. Radio detection of high-energy cosmic rays with the Auger Engineering Radio Array (PISA 2015). arXiv preprint arXiv:1601.00462 (2016).
- [15] Aab, Alexander, et al. The Pierre Auger Observatory upgrade-preliminary design report. arXiv preprint arXiv:1604.03637 (2016).
- [16] Allekotte, Ingo, et al. The surface detector system of the Pierre Auger Observatory. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 586.3 (2008): 409-420.
- [17] Abraham, J., et al. The fluorescence detector of the Pierre Auger Observatory. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 620.2-3 (2010): 227-251.
- [18] Huege, Tim. Radio Detection of Cosmic Rays—Achievements and Future Potential. Proceedings of 2016 International Conference on Ultra-High Energy Cosmic Rays (UHECR2016). 2018.
- [19] Salazar, Humberto, et al. Surface detector calibration for the Auger Observatory. International Cosmic Ray Conference. Vol. 2. 2001.
- [20] Ahmed, Syed Naeem. Physics and engineering of radiation detection. Academic Press, 2007.
- [21] Meurer, C., and N. Collaboration. HEAT-a low energy enhancement of the Pierre Auger Observatory. arXiv preprint arXiv:1106.1329 (2011).
- [22] Aab, Alexander, et al. Prototype muon detectors for the AMIGA component of the Pierre Auger Observatory. Journal of Instrumentation 11.02 (2016): P02012.
- [23] Wikiskripta. Interakce ionizujícího záření. https://www.wikiskripta.eu/w/Interakce_ionizuj%C3%ADc%C3%ADho_z%C3%A1%C5%99en%C3%AD
- [24] Schröder, Frank G. Radio detection of cosmic-ray air showers and high-energy neutrinos. Progress in Particle and Nuclear Physics 93 (2017): 1-68.
- [25] C. Amsler et al. (Particle Data Group). Physics Letters, B667(1), 2008 and 2009 partial update for the 2010 edition.
- [26] Wikimedia Commons. Schematic view of a photomultiplier coupled to a scintillator, illustrating detection of gamma rays. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e8/PhotoMultiplierTubeAndScintillator.svg>
- [27] Haungs, Andreas. Cosmic Rays from the Knee to the Ankle. Physics Procedia 61 (2015): 425-434.
- [28] Vítezslav Jarý, Ján Pejchal. Scintilátory kolem nás. Praha : Středisko společných činností AV ČR, 2017.
- [29] Daniel, B., and Pierre Auger Collaboration. "The AMIGA enhancement of the Pierre Auger Observatory." Journal of Physics: Conference Series. Vol. 632. No. 1. IOP Publishing, 2015.

- [30] Brandt Daniel, Aglietta Marco et al. New electronics for the surface detectors of the Pierre Auger Observatory. Proceedings of Science. The 34th International Cosmic Ray Conference. 2015.
- [31] Martina Boháčová, Pierre Auger colaboration. Test benches for the upgrade of the Pierre Auger Observatory electronics. PoS(ICRC2019)434. 2019
- [32] Jakub Vícha, Jiří Chudoba, and Pierre Auger Collaboration. "Data Processing at the Pierre Auger Observatory."Journal of Physics: Conference Series. Vol. 608. No. 1. IOP Publishing, 2015.
- [33] Castellina, Antonella. AugerPrime: the Pierre Auger Observatory Upgrade. EPJ Web of Conferences. Vol. 210. EDP Sciences, 2019.
- [34] Bjarni Pont, Pierre Auger Collaboration. A Large Radio Detector at the Pierre Auger Observatory. PoS(ICRC2019)395. Madison, USA. 2019.
- [35] Kascade-Grande. <https://web.ikp.kit.edu/KASCADE/>
- [36] Aab, A., et al. "Depth of maximum of air-shower profiles at the Pierre Auger Observatory. II. Composition implications."Physical Review D 90.12 (2014): 122006.