

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra fyziky

# Technical design report

Detektor doby letu

Praha, 2015

# Zloženie kolaborácie

*Fyzikálny koordinátor*

**Lukáš Kramárik**

*Hovorca projektu*

**Vojtěch Pacík**

*Simulácie, teoretické požiadavky*

**Renata Kopečná**

*Opracovanie scintilačného materiálu, jeho napojenie na fotonásobič*

**Jindřich Lidrych**

**Marek Matas**

*Konštrukcia, uchytenie a tinenie detektoru*

**Jana Fodorová**

**Lukáš Kramárik**

*Elektronika, koincidenčná jednotka*

**Radek Novotný**

**Vojtěch Pacík**

# Obsah

|                                                                       |           |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Úvod</b>                                                           | <b>4</b>  |
| <b>1 Kosmické záření a způsoby jeho detekce</b>                       | <b>5</b>  |
| 1.1 Kosmické záření . . . . .                                         | 5         |
| 1.2 Způsoby detekce . . . . .                                         | 5         |
| <b>2 Simulace scintilačního procesu</b>                               | <b>7</b>  |
| 2.1 Geometrie scintilátoru . . . . .                                  | 7         |
| 2.2 Průchod mionů detekční částí . . . . .                            | 8         |
| 2.3 Průběh signálu . . . . .                                          | 8         |
| <b>3 Konštrukcia detektora doby letu</b>                              | <b>10</b> |
| 3.1 Odtienenie svetlocitlivých částí detektoru . . . . .              | 11        |
| 3.2 Opracování scintilátoru a jeho připojení na fotonásobič . . . . . | 11        |
| 3.3 Nosné části detektoru . . . . .                                   | 13        |
| 3.4 Upevnenie detekčních částí . . . . .                              | 13        |
| <b>4 Elektronika pro TOF kosmických mionů</b>                         | <b>15</b> |
| 4.1 Koincidence . . . . .                                             | 15        |
| 4.2 Obvod doby letu . . . . .                                         | 17        |
| <b>Záver</b>                                                          | <b>21</b> |
| <b>Literatúra</b>                                                     | <b>22</b> |

# Úvod

Cieľom tohoto textu je popis konštrukcie Detektoru doby letu (*Time of flight* - TOF). Detektory typu TOF sú používané na viacerých experimentoch jadrovej a časticovej fyziky, ich forma a zostrojenie závisí na meraní, pre ktoré boli vytvorené. Nami zostrojený detektor slúži na meranie vlastností miónov, prichádzajúcich v kozmickom žiarení. Tok takýchto miónov je dostatočný na to, aby takéto meranie mohlo prebiehať na ľubovoľnom mieste na Zemskom povrchu.

Prvá kapitola v krátkosti teoreticky popisuje kozmické žiarenie a akým spôsobom propaguje až na zemský povrch. Takisto sú tu popísané základné vlastnosti kozmických miónov.

Ďalej sú popísané naše simulácie, ktoré pomohli pri stavbe detektoru. Informácie z nich získané boli použité nielen pri konštrukcii detektoru, úprave scintilačnej oblasti detektoru, ale boli brané aj ako základné požiadavky na elektroniku detektoru.

Nasledujúca kapitola popisuje už konkrétne opracovanie scintilátoru, ktorý je veľmi podstatnou súčasťou detektoru. Slúži na vytvorenie fotónového záblesku, ktorý musí byť ďalej zachytený fotonásobičom. Práve spoj medzi týmito dvoma objektmi musí byť spracovaný dostatočne dôsledne, aby nedochádzalo k zbytočným stratám alebo tlmeniu signálu. Keďže ide o detektor typu TOF, scintilátory, podobne ako fotonásobiče, sú dva.

V štvrtej kapitole je ukázané, akým spôsobom boli tieto dve definitívne upravené detekčné jednotky pripevnené na kovovej konštrukcii, ktorá slúži ako stabilizácia polohy týchto dielov. Ich vzájomná poloha by sa nemala meniť ani v prípade presunov celej konštrukcie.

V poslednej kapitole je podrobne popísaná elektronika vyčítania signálu z fotonásobičov. Cieľom je dostať údaj nielen o tom, že oboma scintilátormi preletel kozmický mión, ale aj o čase, za ktorý prešiel vzdialenosť medzi scintilátormi. Práve preto musí byť vyčítacia elektronika dostatočne rýchla a presná.

# Kapitola 1

## Kosmické záření a způsoby jeho detekce

### 1.1 Kosmické záření

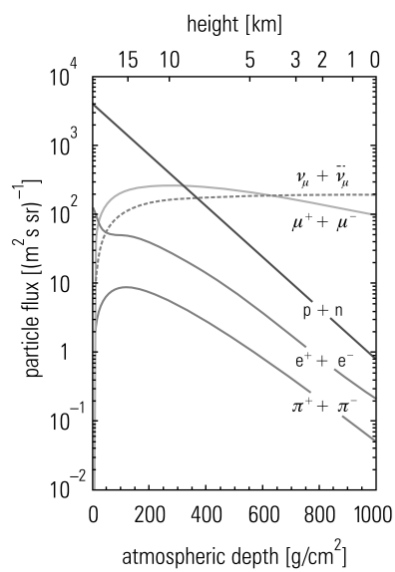
Sekundární kosmické záření je sprška částic v zemské atmosféře vznikající jako důsledek interakcí částic primárního kosmického záření s atmosférou. Hlavní složkou primárního kosmického záření jsou protony a právě jejich interakcí s atmosférou jsou produkovány především lehké mesony, tj. piony a kaony, které se následně rozpadají. Neutrální piony se rozpadají na dva fotony, které vyvolají další elektromagnetické spršky v atmosféře. Na rozdíl od nich, nabité piony a kaony se rozpadají na pár mion a neutrino.

A právě miony tvoří 80% nabitých částic sekundárního záření. Na Obr. 1.1 můžeme vidět toky jednotlivých druhů částic na Zemském povrchu. Porovnáme-li toky jednotlivých částic, jeví se miony jako ideální částice pro měření. Ostatní částice kosmického záření tvoří pozadí měření, které se budeme snažit odstínit.

### 1.2 Způsoby detekce

Je několik možných způsobů detekce kosmického záření jako např. pomocí Čerenkovova detektoru, detekce fluorescenčního světla vznikajícího v atmosféře, scintilačních detektorů a kosmickým sond.

Scintilační detektor se skládá z následujících komponentů: scintilační materiál, světlovod, fotonásobič a vyčítací elektronika. Metoda detekce je založena na principu převodu absorbované energie ionizujícího záření na energii fotonů z oblasti viditelného záření. Převod probíhá pomocí scintilačního materiálu. Podle použitého materiálu dělíme scintilátory na organické a anorganické. V případě organického materiálu scintilaci pozorujeme pouze u aromatických molekul jako je např. benzen, naftalen a je způsobena luminiscencí. Luminiscence je jev, při kterém jsou emitovány fotony při deexcitaci  $\pi$ -elektronů. Takto



Obr. 1.1: Závislost toku jednotlivých částic sekundárního žiarenia na atmosferickej výške a hĺbke [1].

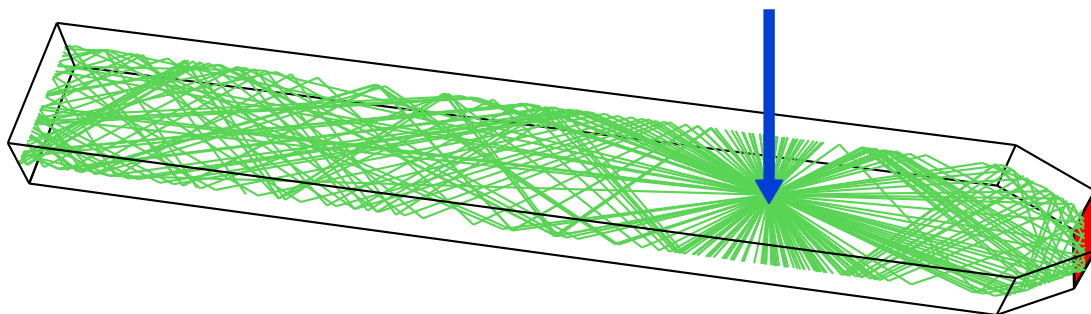
emitované fotony jsou scintilačním materiálem převedeny na energii fotonů z oblasti viditelného záření. Ty jsou poté odvedeny na fotonásobič, který je nakonec převede na elektrický signál.

## Kapitola 2

# Simulace scintilačního procesu

### 2.1 Geometrie scintilátoru

Pomocí simulace v programu ROOT [2] jsme zkoumali chování světla ve scintilátoru. Ilustrace průchodu světla je na Obr. 2.1. Na stejném obrázku můžeme vidět i tvar scintilátoru, ke kterému je přiložen fotonásobič (červená plocha). Program generuje fotony v náhodném směru (uniformě v celém rozsahu  $2\pi$ ) a zaznamenává, kolik částic nakonec dosáhlo červené plochy a počítá čas, za který tam foton dorazí. K tomu program využívá zákon odrazu a dopadu, kdy pro každý foton program počítá dráhu a kontroluje, zda došlo k odrazu od stěny, tj. či foton nepřekročil mezní úhel a tedy nevyletěl ze scintilátoru. Předpokládali jsme, že se fotony v prostředí pohybují rychlostí  $3 \cdot 10^8$  m/s. Dolet fotonu ve scintilátoru jsme stanovili na jeden metr.



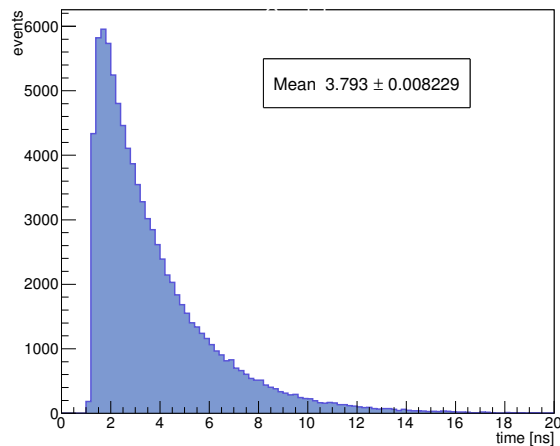
Obr. 2.1: Ilustrace průchodu světla scintilátorem. Modrá šipka označuje bod, ve kterém došlo k průletu mionu.

## 2.2 Průchod mionů detekční částí

Množství energie, kterou miony zanechají ve scintilátoru, jsme zkoumali pomocí simulace v programu Geant4 [3], [4]. Simulovali jsme průlet mionů o energii 4 GeV [5]. Miony byly generovány ve směru kolmém k povrchu scintilátoru jako na Obr. 2.1 ve středu scintilátoru. Výsledkem je střední deponovaná energii ve scintilátoru  $11,95 \pm 0,03$  MeV na jeden mion.

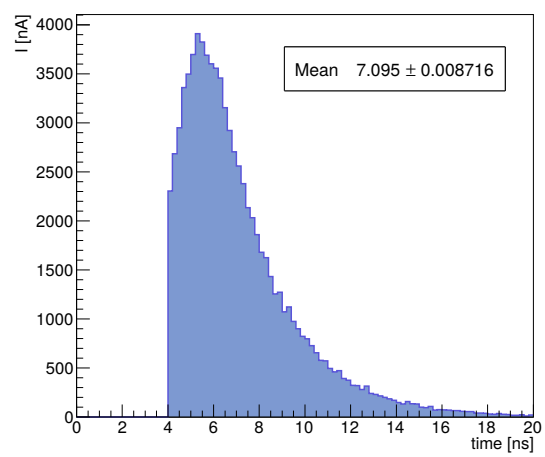
## 2.3 Průběh signálu

Deponovaná energie 11,95 MeV je přeměněna na fotony s účinností asi 20% [6]. Tyto fotony mají vlnovou délku 430 nm [7]. Doba dosvitu scincilátoru  $\tau$  je 2,5 ns. V programu ROOT jsme tedy nejprve stanovili dobu, za kterou fotony dorazí do fotónásobiče (Obr. 2.2). Z této doby jsme stanovili tvar signálu: pro proud  $I$  platí  $I = \text{náboj}/\text{čas}$ , kvantová účinnost katody je 25%, zesílení fotonásobiče je  $10^6$  [8]. Dále ve fotonásobiči dojde ke gaussovskému rozmazání se střední kvadratickou odchylkou  $\sigma = 1,27$  ns [8]. Průběh signálu je na Obr. 2.3.



Obr. 2.2: Distribuce doby, za kterou fotony dorazí do fotonásobiče.





Obr. 2.3: Simulace tvaru signálu.

## Kapitola 3

# Konštrukcia detektora doby letu

V tejto kapitole uvádzame postup, akým sme vyhotovili konštrukciu detektora doby letu. Postup sme rozdelili do troch častí, ktoré sú zoradené v poradí, v akom jednotlivé konštrukčné otázky boli riešené. Pri konštrukcii sme sa zaoberali odtienením svetlocitlivých častí detektoru, zostavením nosných častí detektoru a pevným umiestnením častí detektora na nosnú konštrukciu. Celá konštrukcia detektoru je na Obr. 3.1.



Obr. 3.1: Konštrukcia detektoru kozmických miónov.

### 3.1 Odtienenie svetlocitlivých částí detektoru

Nejčastějšími částicemi pocházejícími z kosmického záření na povrchu Země jsou miiony [5]. Další nejčetnější složku tvoří elektrony, pozitrony a fotony. Zaměřili jsme se tedy na zkoumání vlivu těchto částic na naše měření.

Pro radiační délku elektronů  $X_0$  platí přibližný vztah [9]

$$X_0 = \frac{716.4}{Z(Z+1)^{\frac{287}{\sqrt{Z}}}} \text{ g cm}^{-3}. \quad (3.1)$$

Pro stínění tedy potřebujeme co nejtěžší materiál. Jedním z nejdostupnějších materiálů je ocel, zaměřili jsme se tedy na železo. Pomocí simulace v programu Geant4 jsme zjistili, že elektrony, které zanechají energii v obou scintilátorech, jsou elektrony o energii řádově 100 MeV.

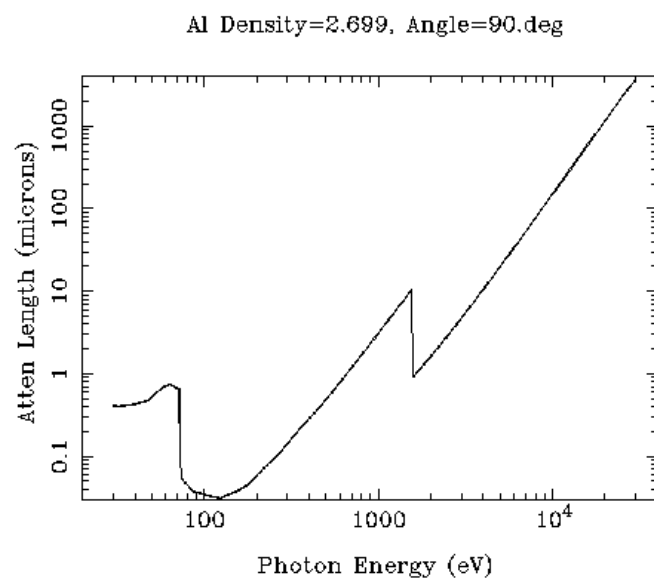
Radiační délka je definovaná jako délka, na níž elektron ztratí  $1/e$  ze své energie. Radiační délka železa je 1,757 cm [10]. Abychom snížili energii elektronů z 1 GeV na 10 MeV, potřebovali bychom asi 8,1 cm silný ocelový plát. Pokud bychom se rozhodli jako stínění použít alobal, tedy hliník, potřebovali bychom 41 cm silnou vrstvu. Vzhledem k četnosti vysokoenergetických elektronů [5] a potřebě velkého množství materiálu, jsme se rozhodli stínění elektronů zanedbat.

V případě fotonů je vliv na koincidenci zanedbatelný. Mohou ovšem snadno způsobit šum v obou scintilátorech. Atenuační koeficienty pro železo a hliník v závislosti na energii fotonů jsou na Obr.3.2 a na Obr.3.3. Je zřejmé, že atenuační délka se pohybuje v řádu mikrometrů až milimetrů.

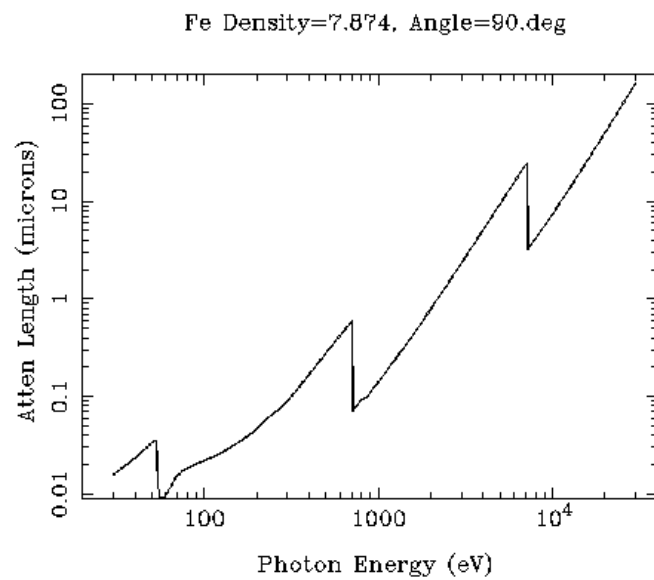
Pro pokles intenzity dopadajících částic na 10% původního počtu by tedy bylo v případě fotonů o energii několika keV potřeba 2,3 mm silný plát železa či 23 mm silnou vrstvu alobalu. Vzhledem k požadavkům na přenosnost scintilátoru a cenu použitého materiálu jsme se rozhodli stínění celé konstrukce nepoužít. Zaměřili jsme se pouze na odstínění fotonového záření u jednotlivých detekčních modulů, a to na povrchu scintilátoru a dále v místě mezi scintilátorem a fotonásobičem.

### 3.2 Opracování scintilátoru a jeho připojení na fotonásobič

Jako výchozí pro sestavení scintilátoru byl použit scintilátorový blok o rozměrech  $700 \times 100 \times 50 \text{ mm}^3$ . Jeho úpravy probíhaly v souladu s výsledky simulace. Na pásové pile bylo zkoseno posledních 50mm délky tak, aby čtvercová plocha scintilátoru právě obsáhla kruhový vstup fotonásobiče. Přesahující materiál okolo fotonásobiče byl poté odbroušen pilníkem tak aby kruhový fotonásobič co nejpřesněji naléhal na scintilátor a celá plocha scintilátoru byla obroušena vibrační bruskou různými hrubostmi brusného papíru od hrubosti 80 postupně až na 1200. Plocha byla poté leštěna vibrační bruskou s použitím leštící pasty a plstěné hlavice až do úplné čirosti.



Obr. 3.2: Atenuační délka pro hliník v závislosti na energii fotonů.



Obr. 3.3: Atenuační délka pro železo v závislosti na energii fotonů.

Pro zlepšení odrazových vlastností ploch scintilátoru byl celý scintilátor potřen optickou pastou. Následně byl povrch pokryt alobalem. Abychom zabránili případnému poškození alobalu při další manipulaci, byl celý scintilační blok přelepen neprůhlednou izolepovou páskou. Tímto jsme zároveň odstínili scintilátor od paprsků viditelného světla. Takto jsme upravili celý povrch scintilátoru kromě plochy, kde je scintilátor spojen s fotonásobičem. Tu jsme pouze potřeli optickou pastou, která díky indexu lomu blízkému indexu lomu skla a scintilátoru sníží ztráty při prostupu světla. Spoj scintilátor-fotonásobič byl také odstíněn za pomoci lepící pásky.

Takto sestavená scintilační jednotka mohla být poté připevněna na nosný regál.

### 3.3 Nosné části detektoru

Na základě požadaviek kladených na konštrukčné vyhotovenie detektoru doby letu sme ako základný nosník celej konštrukcie zvolili policový regál vyrobený z plechu z pozinkovanej ocele.

Regál pozostáva zo 4 stojok dĺžky 1576 mm a troch výškovo nastaviteľných políc s rozmermi  $1050 \times 320 \text{ mm}^2$ , jeho celková hmotnosť je 12,39 kg. Pre zlepšenie stability regálu sú jeho stojky spevnené priečnymi lištami.

### 3.4 Upevnenie detekčných častí

Pri upevnení scintilátorov s fotonásobičmi na police regálu sme museli zobrať do úvahy, že povrch políc nie je hladký, a že výška, v ktorej má byť položený scintilátor, je vyššia ako tá, v ktorej má byť položený fotonásobič. Preto sme pod scintilátor a fotonásobič položili niekoľko vrstiev gumovej podložky vhodnej hrúbky, pričom rozdielny počet vrstiev pod scintilátorom a pod fotonásobičom zabezpečil, že "vývodná časť" scintilátoru smerovala priamo do okienka fotonásobiča. Pod scintilátorom je podložená guma hrúbky 10 mm, v prípade fotonásobiča sú to 2 mm.

Detekčné časti sme upevnili o regálové police pomocou dierovaných oceľových pásov opatrených gumovou vložkou, ktoré sme ohli do požadovaného tvaru, aby obopínali fotonásobič a scintilátor. Spôsob pripevnenia detekčných častí k polici je vyfotený na Obr. 3.4.



Obr. 3.4: Umiestnenie a pripevnení detekčných častí k regálovej polici.

## Kapitola 4

# Elektronika pro TOF kosmických mionů

Návrh elektroniky, jejíž cílem je nejen statistické určení počtu mionů, které proletí detektorem, ale i určení doby letu TOF (*time-of-flight*), je rozdělen na dvě části.

První z nich je koincidence, jejíž účelem je zaznamenání průletu mionu oběma scintilátory a rozlišení těchto událostí od situací, kdy mion proletí pouze jedním ze scintilátorů, tj. těch, které tvoří nechtěné pozadí pro určení doby letu detekovaných částic.

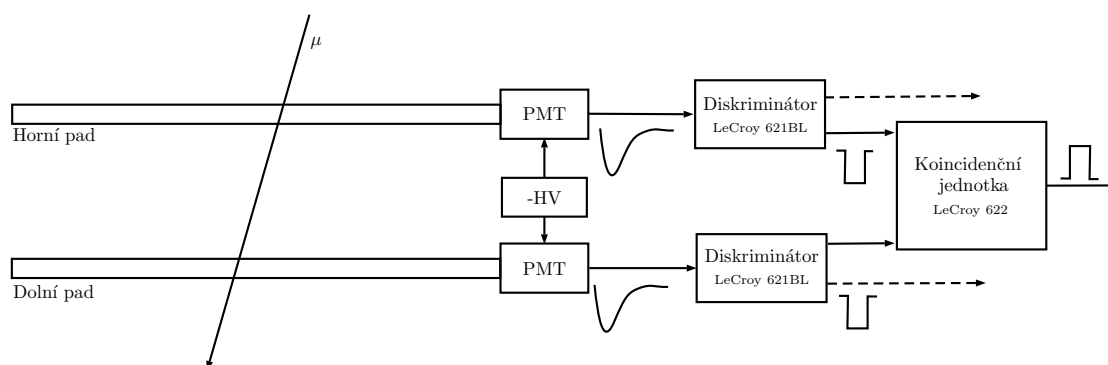
Druhou částí je pak samotný obvod určující dobu letu částic. Tento obvod musí být schopen zaznamenat průlet mionu jednotlivými scintilátory a přiřadit k těmto událostem časový údaj. Zde hraje důležitou roli výstup koincidenčního obvodu, který slouží jako ukazatel (*trigger*) toho, že měříme dobu průletu jednoho identického mionu oběma scintilátory.

### 4.1 Koincidence

Schéma koincidenčního obvodu je zachyceno na Obr. 4.1. Při průletu mionu scintilátorem dojde k vytvoření spršky fotonů, které jsou zachyceny fotokatodou a prostřednictvím fotonásobiče (PMT) převedeny na elektrický signál.

Napájecí patice je v podstatě napěťový dělič sloužící k napájení elektrod fotonásobiče kaskádně rosoucím napětím, což způsobuje zesilovací efekt. Rozměry fotonásobiče jsou zachyceny na Obr. 4.2. Níže uvádíme některé důležité technické parametry fotonásobiče.

- Zesílení:  $10^5 - 10^6$
- Napájecí napětí: 1,3 kV
- Maximální proud tekoucí anodou:  $100 \mu A$



Obr. 4.1: Blokové schéma koincidenčního obvodu. Přerušované šipky označují oddělený výstup z diskriminátorů vstupující do druhé části obvodu měřícího dobu letu.

- Náběhová doba jednoho detekovaného elektronu: 2 ns
- FWHM šířka jednoho detekovaného elektronu: 3 ns

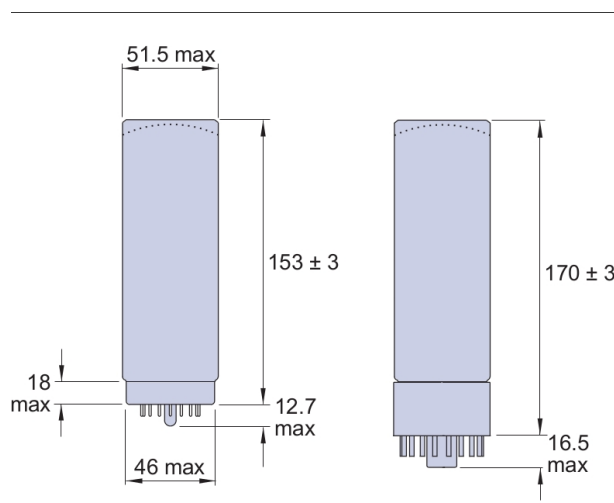
Fotonásobiče jsou napájeny pomocí zdroje vysokého napětí s maximální hodnotou výstupního proudu 1 mA. Signál je na tomto vysokém napětí modulován, proto musí být vyčítán skrze oddělovací kondenzátor, jehož schéma je zachyceno na Obr. 4.3. Velikost kapacity kondenzátoru úzce souvisí s rychlostí odezvy celé aparatury na příchozí signál. Vzhledem k tomu bylo nutné tento oddělovací kondenzátor sestavit a zabudovat jej do krabičky kompatibilní s napájecím rackem. Výsledný modul s dvojicí oddělovacích kondenzátorů je zachycen na Obr. 4.4.

Signál z fotonásobiče dále putuje skrze velmi citlivý a rychlý diskriminátor s maximální frekvencí 110 MHz, tresholdem 30 mV a rozlišovací schopností dvou pulzů 9 ns, který po překročení prahového napětí vygeneruje obdélníkový pulz. Ten je následně přiveden na čtyřkanálovou koincidenční jednotku s frekvencí 110 MHz a prodlevou 9,5 ns mezi vstupem a výstupem. V případě, kdy se na jejím vstupu objeví dva takto vygenerované pulzy v překryvu, pak je výstupem obdélníkový pulz konstantní délky signalizující, že došlo ke koincidenční.

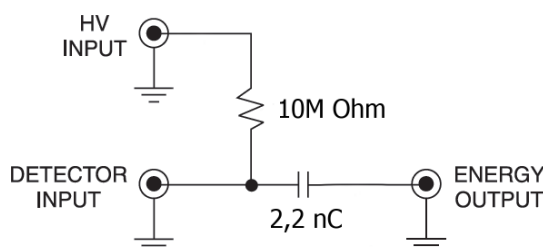
Pro potřeby měření doby letu mionů, tj. přesného určení časových údajů okamžiků průletu mionu jednotlivými scintilátory, je nutné rozdělit výstup z diskriminátorů na dva signály, kdy vždy jeden z nich slouží jako vstup do obvodu pro určení TOF (na schématu znázorněn přerušovanou šipkou).

Výstup koincidenční jednotky a jednotlivých signálů z diskriminátoru je zpracován vývojovou deskou s FPGA čipem, která slouží k výpočtu doby letu a počtu hitů za jednotku času. Při konstrukci se však vyskytl problém při přenosu logického pulzu z jednoho zařízení do druhého. Zatímco jak diskriminátor tak koincidenční jednotka pracuje se standardem NIM logických signálů tak FPGA jednotka a veškeré její alternativy pracují s 3,3 V TTL signálem. Pro to aby ta tato zařízení spolu mohla komunikovat je třeba použít převodník NIM to TTL.





Obr. 4.2: Rozměry fotonásobiče (v mm). Vlevo náčrtek bez napájecí patice, vpravo s připojenou paticí [8].

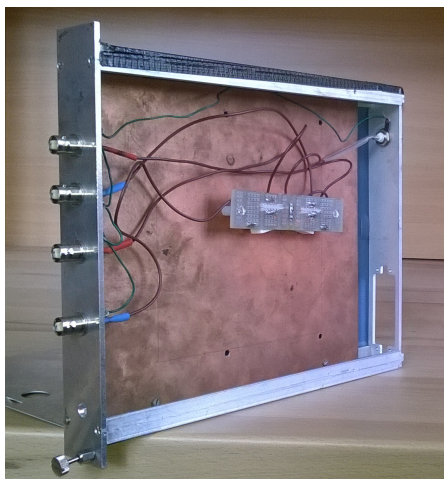


Obr. 4.3: Schéma napájecího členu s kondenzátorem sloužícího pro odělení signálu od vysokého napětí.

## 4.2 Obvod doby letu

Důležitou roli při určení doby letu je výstup z výše diskutovaného koincidenčního obvodu. Ten slouží jako tzv. busy logic, kdy je po dobu výstupního pulzu zabráněno nabírání dalších eventů, což by mělo zabránit špatné interpretaci měřených událostí a výsledků. Příkladem nesprávně určené doby letu je situace, kdy by došlo k průletu dvou různých mionů pouze jedním scintilátorem s malým časovým rozestupem.

Převodník doby letu je založen na vývojové desce DE0 Nano od společnosti terasIC. Tato vývojová deska používá FPGA pole Altera Cyclone IV, jež má sloužit jako hlavní výpočetní jednotka. Pro výpočet, bylo potřeba naprogramovat tzv. delay line, jež porovnává příchozí signál s drobným časovým spožděním. Pro naprogramování byl použit programovací jazyk VHDL a jako vývojové prostředí bylo použito Quartus 14. Obrovskou nevýhodou tohoto prostředí je, že nepodporuje tzv. sensitivity listy, které zajišťují citlivost a odezvu FPGA vůči změně na vstupním signálu a proto bylo dosažení výsledku

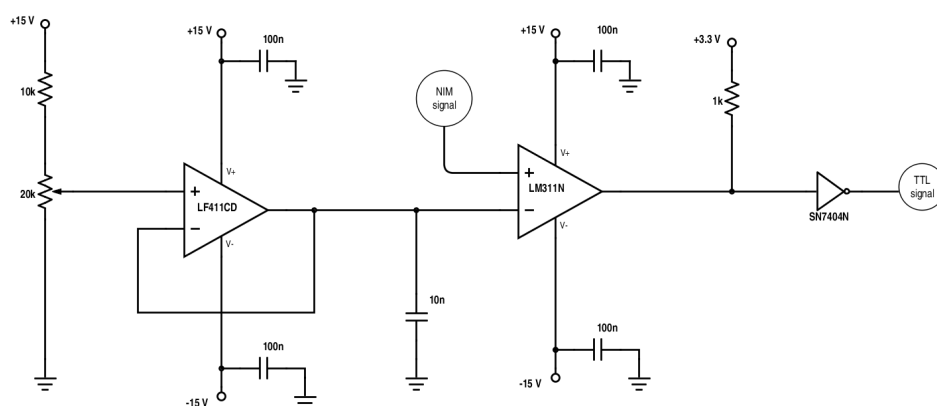
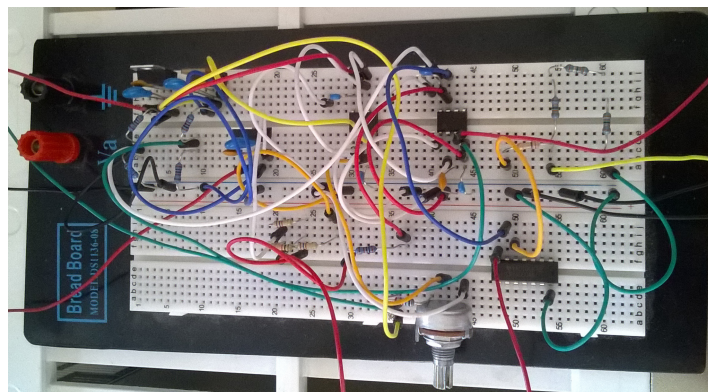


Obr. 4.4: Konstrukce modulu s dvojicí oddělovacích kondenzátorů (dle schématu na Obr. 4.3 sloužící jednak k napájení fotonásobičů, ale také k přenosu signálu z fotonásobičů.

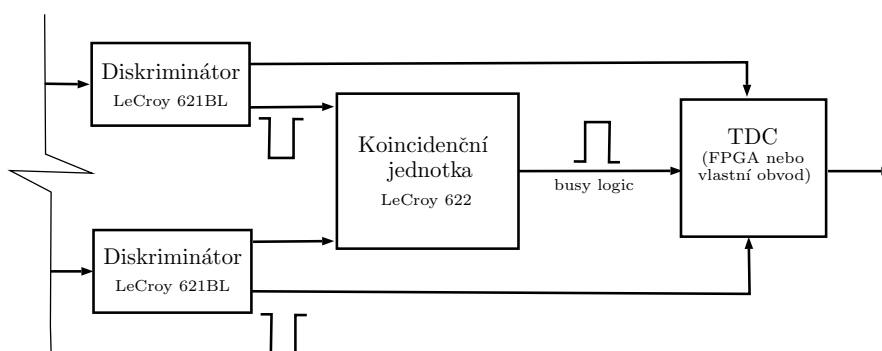
mnohem složitější.

Na Obr. 4.7 je zachycena finální modulární realizace elektroniky detektoru zapojená v napájecím racku, který slouží jako zdroj napětí pro jednotlivé moduly i vysoké napětí potřebné pro napájení fotonásobičů.

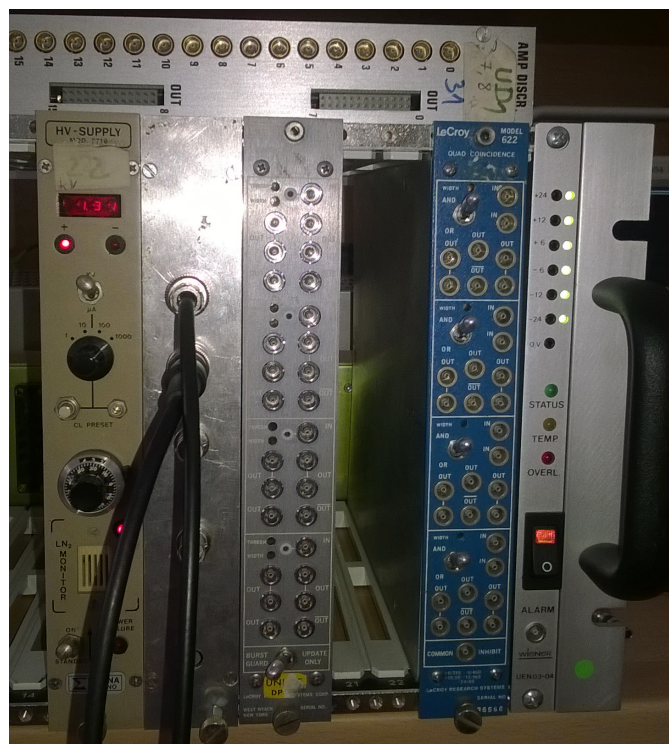
Na Obr. 4.8 je snímku osciloskopu zachycena typický výstup a vstup použité koincidenční jednotky při koincidenci.



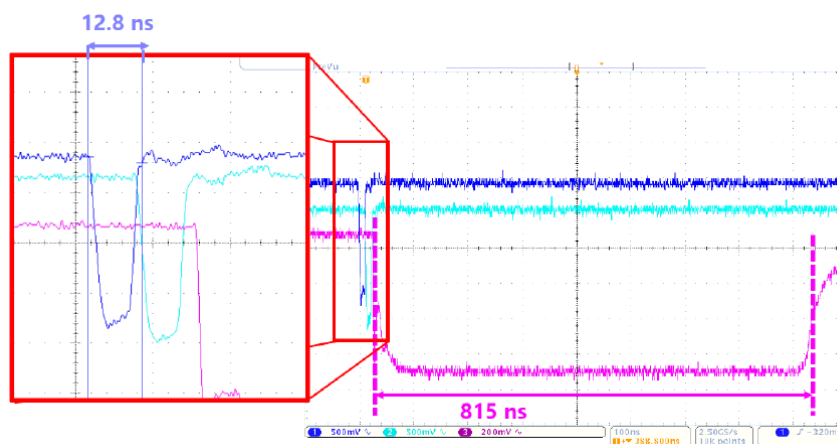
Obr. 4.5: Realizace převodníku signálu (nahore) mezi logickými signály NIM a TTL dle schématu (dole).



Obr. 4.6: Blokové schéma obvodu doby letu.



Obr. 4.7: Modulární realizace elektroniky v napájecím racku. Zleva zdroj vysokého napětí 1,3 kV, modul s dvojicí oddělovacích kondenzátorů, čtyřkanálový diskriminátor a koincidenční jednotka.



Obr. 4.8: Snímek vstupu (tmavě a světle modrá) a výstupu (fialová) koincidenční jednotky zachycený na osciloskopu.

# Záver

V tejto práci bol popísaný spôsob zhotovenia detektoru typu TOF na meranie kozmických miónov. Je zložený z troch podstatných častí: scintilátora, fotonásobiču a vyčítacej elektroniky. Dôležité otázky ohľadom prípravy týchto troch častí boli riešené pomocou rôznych simulácií, uvedených už v CDR [11].

Scintilátor bol po odrezaní do žiadaného tvaru vyleštený na maximálnu dostupnú hladkosť. Potom bol namazaný svetlovodivou pastou a obalený do dostatočnej vrstvy nepriehľadnej pásky, aby odtienil fotónové pozadie. Následne bol položený na pripravenú policu a presne spojený s oknom fotonásobiča. Takáto detekčná jednotka bola pripevnená k polici kovovými prúžkami. Celé toto pripevnenie je urobené tak, aby sa minimalizovali pohyby detektoru aj pri prenose celého regálu, na ktorom je umiestnený.

Elektronika má za úlohu vyčítať signály z dvoch fotonásobičov a porovnávať čas, v ktorom prišli. Žiaľ, pri testoch bol skratom zničený diskriminátor. Tento skrat pravdepodobne nebol zapríčinený osobami obsluhujúcimi detektor, ale vnútornou vadou napájania fotonásobiča. Bol natoľko obsiahli, že pri ňom bol zničený aj jeden z fotonásobičov. Posledné pokusy o opravu zlyhali z dôvodu nedostatočného vybavenia súčastiek. Takisto väčší vek diskriminátoru a ostatných súčastí komplikuje prístupnosť k informáciám, ktoré by dopomohli k ich oprave.

Avšak zvyšok detektoru je postavený a pripravený na prípadné použitie s inou elektronikou. Takto dokončený detektor môže ponúknuť zaujímavé merania komických miónov, najmä ich energií alebo uhlového rozdelenia ich toku.

# Literatúra

- [1] Grupen, C., *Astroparticle Physics*, ISBN-13 978-3-540-25312-9, 2005, Springer.
- [2] ROOT: Data Analysis Framework, <https://root.cern.ch>.
- [3] Allison, J. et. al., Geant4 developments and applications, *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, Volume 53, Issue 1, 10.1109/TNS.2006.869826, 2006.
- [4] Agostinelli, S. et. al., Geant4 — a simulation toolkit, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, Volume 506, Issue 3, 1 July 2003.
- [5] K.A. Olive et al. (Particle Data Group), *2014 Review of Particle Physics*, *Chin. Phys. C*, 38, 090001 (2014).
- [6] KF FJFI ČVUT v Praze: Projektové praktikum, (2015). *Technical Design Report: Detektor doby letu*. [online]  
[http://kf.fjfi.cvut.cz/images/files/predmety/02PPRA/Docs/tdr\\_2013-14.pdf](http://kf.fjfi.cvut.cz/images/files/predmety/02PPRA/Docs/tdr_2013-14.pdf) [Accessed 17 Dec. 2014].
- [7] [www.envinet.cz](http://www.envinet.cz), [online] <http://www.envinet.cz> [Accessed 15 Aug. 2015].
- [8] My.et-enterprises.com, (2015). *51 mm (2") photomultiplier, 9813B series data sheet*. [online]  
<http://my.et-enterprises.com/pdf/9813B.pdf> [Accessed 10 Jan. 2015].
- [9] Gupta, M., Calculation of radiation length in materials, PH-EP-Tech-Note-2010-013.- Geneva: CERN, 2010.
- [10] *Atomic and nuclear properties of materials*, [online]  
<http://pdg.lbl.gov/2009/AtomicNuclearProperties/> [Accessed 6 Sep. 2015].
- [11] KF FJFI ČVUT v Praze: Projektové praktikum, (2015). *Conceptual Design Report: Detektor doby letu*. [online]  
[http://kf.fjfi.cvut.cz/images/files/predmety/02PPRA/Docs/cdr\\_2014-15.pdf](http://kf.fjfi.cvut.cz/images/files/predmety/02PPRA/Docs/cdr_2014-15.pdf) [Accessed 17 Sep. 2015].