

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra fyziky

Conceptual 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 tienenie detektoru
Jana Fodorová
Lukáš Kramárik

Elektronika, koincidenčná jednotka
Radek Novotný
Vojtěch Pacík

Obsah

Úvod	4
1 Kozmické žiarenie	5
1.1 Vznik a tok kozmického žiarenia	5
1.2 Detekce kosmického záření	6
1.3 Scintilační detektor	6
2 Simulace scintilačního procesu	7
2.1 Geometrie scintilátoru	7
2.2 Světlovod	8
2.3 Průchod mionů detekční částí	9
2.4 Průběh signálu	10
3 Opracování scintilátoru a jeho připojení na fotonásobič	12
4 Elektronika pro TOF kosmických mionů	13
4.1 Koincidence	13
4.2 Testování aparatury	15
4.3 Obvod doby letu	15
4.3.1 TDC	16
4.3.2 FPGA	16
5 Konštrukcia detektoru doby letu	17
5.1 Nosné časti detektoru	17
5.2 Upevnenie detekčných dielov	17
5.3 Tienenie	19
Záver	22

Úvod

Táto práca predstavuje koncepčný dizajn Detektoru doby letu (*Time of flight* - TOF) kozmických miónov. Takéto detektory sa používajú na viacerých veľkých experimentoch jadrovej a časticovej fyziky (napr. ALICE a DIRAC v CERN, CDF v FERMILAB). Náš detektor bude schopný merať vlastnosti kozmických miónov, ktoré sú najzastúpenejšou zložkou kozmického žiarenia a dosahujú vysoké energie, najčastejšie na úrovni až 4 GeV [1].

V tomto texte je popísaný návrh zhotovenia jednotlivých prvkov detektoru. V prvej časti je teoretický úvod k sekundárnemu kozmickému žiareniu, spolu s podrobnejším odôvodnením merania práve miónov. Takisto je predstavený princíp fungovania scintilačných detektorov typu TOF.

V ďalšej kapitole sú zhrnuté výsledky našich simulácií, ktoré tvoria teoretický podklad pre samotné zostrojenie detektoru, najmä čo sa týka rozmerov scintilačnej oblasti.

Výsledky tejto simulácie sú použité pri opracovaní scintilátoru a jeho napojení na fotonásobič. Popis výslednej geometrie scintilátora, pre ktorú sme sa rozhodli je v ďalšej časti.

Posledným, prvkom priamo pripojeným na detekčnú časť je koincidenčný obvod, ktorého prvky sú popísané v ďalšej kapitole.

Nakoniec uvedieme náš plán konštrukcie, na ktorú bude detektor pripevnený, ale ktorá slúži aj na tienenie voči nežiadúcemu pozadiu a musí byť dostatočne odolná pri presunoch alebo výmenách jednotlivých komponentov detektoru.

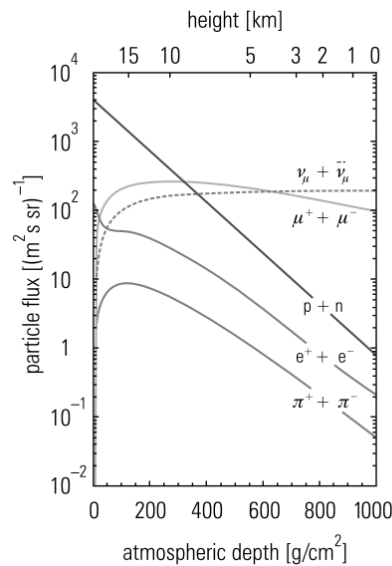
Kapitola 1

Kozmické žiarenie

1.1 Vznik a tok kozmického žiarenia

Sekundárne kozmické žiarenie je sprška (prúd) častíc v zemskej atmosfére, ktoré vznikli ako dôsledok interakcií častíc primárneho kozmického žiarenia s atmosférou. Práve kvôli tejto závislosti energetické a časticové spektrum sekundárneho silne závisí na spektre primárneho žiarenia. Väčšina častíc primárneho žiarenia sú protóny. Ich interakcia s časticami atmosféry vyvoláva tzv. hadrónové kaskády. Pri nich sú produkované najmä ľahké mezóny, tj. pióny a kaóny. Neutrálne pióny sa rozpadajú na 2 fotóny, ktoré iniciujú elektromagnetické kaskády (spršky) v atmosfére. Táto komponenta sekundárneho žiarenia patrí medzi jej mäkkú zložku (soft component). Rozpady ostatných častíc prebiehajú nasledovne: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$, $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$, $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ a $K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$. Mióny z týchto rozpadov sa môžu takisto ďalej rozpadáť, a prispievať tak do mäkkej komponenty sekundárneho žiarenia.

Energetická strata miónov, ktoré sa nerozpadnú v atmosfére je na úrovni 1,8 GeV. Na úrovni mora tvoria takéto mióny 80% všetkých nabitých častíc sekundárneho žiarenia. Zvyšok sú spomínané sekundárne hadróny. Na Obr. 1.1 môžeme vidieť tok sekundárnych častíc s energiou väčšou ako 1 GeV v atmosfére. Pozorujeme, že tok neutrín je jediným, ktorý stúpa. Je to dôsledkom ich vysokej prenikavosti, ako i tým, že vznikajú vo všetkých vyššie uvedených rozpadoch. Do výšky cca 9 km dokonca prevládajú primárne nukleóny s vysokými energiami nad miónmi, potom už prevládajú len mióny. Elektromagnetická a hadrónová komponenta sú oproti tej miónovej silne potlačené.



Obr. 1.1: Závislosť toku jednotlivých častíc sekundárneho žiarenia na atmosferickej výške a hĺbke. Prevzaté z [1].

Na Obr. 1.1 takisto sledujeme toky jednotlivých druhov častíc na Zemskom povrchu. Pozorujeme, že najvyšší je tok neutrín. Tie sú, kvôli ich vysokej prenikavosti, pre nás technicky nedetekovateľné. Tok nukleónov je na úrovni $1 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, pre elektróny, pozitróny a nabité pióny je to približne $0.1 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Detekcia týchto častíc je sťažená naopak kvôli ich typicky krátkym interakčným dĺžkam v materiáloch. My sa obmedzíme na detekciu miónov, ktorých tok je až $100 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ a majú dobrú prenikavosť v materiáloch. Ostatné častice kozmického žiarenia budú tvoriť pozadie merania, ktoré sa budeme snažiť odtieniť.

1.2 Detekce kosmického záření

Existuje niekoľko spôsobů, jak detekovat kosmické záření. Registrace a měření kosmického záření lze provést např. pomocí:

- detekce fluorescenčního světla vznikajícího v atmosféře
- Čerenkovova detektoru měřit Čerenkovovo záření, které vzniká v atmosféře
- scintilačního detektoru
- kosmických sond a baloných experimentů.

V našem případě, budeme detektorem měřit dobu letu mionů. V případě detektoru typu TOF se jako nejvýhodnější jeví ho postavit na principu scintilačního detektoru.

1.3 Scintilační detektor

Metoda detekce je založena na principu převodu absorbované energie ionizujícího záření na energii fotonů z oblasti viditelného záření. Převod probíhá právě pomocí scintilačního materiálu. Takto vzniklé fotony jsou poté světlovodem odvedeny na fotocitlivý prvek, což je v našem případě fotonásobič. Fotonásobič sebrané fotony převede na impulzní elektrický signál, který následně jde do vyčítací elektroniky.

Podle použitého scintilačního materiálu lze scintilátory dělit na organické a anorganické. Scintilace v organickém materiálu, který používáme pro konstrukci našeho detektoru, je založena na emisi fotonů při deexcitaci π -elektronů. Tento jev se nazývá luminiscence a lze ho pozorovat u aromatických molekul.

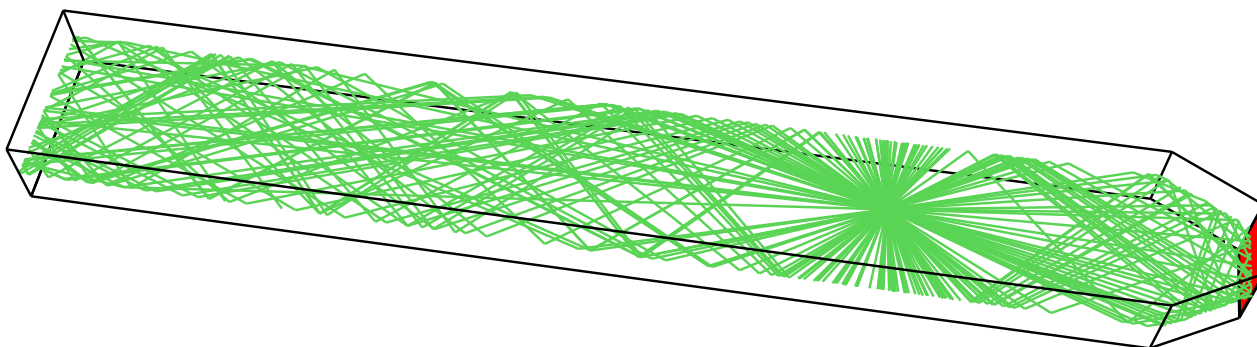
Kapitola 2

Simulace scintilačního procesu

2.1 Geometrie scintilátoru

Geometrii světlovodu jsme simulovali pomocí programu ROOT. 2D simulace nám umožnila zkoumat vliv rozměrů scintilační části na její účinnost. Důležitou roli při rozhodování o geometrii scintilátoru sehrály vlastnosti PMMA. Jde o Monte Carlo simulaci, jež jsme převzali z ?? a upravili. V simulaci definujeme tvar scintilátoru, počet generovaných částic a pevný počet vygenerovaných fotonů. Částice jsou generovány buď náhodně nebo v pevných bodech, fotony vylétávají do všech směrů se stejnou pravděpodobností. Program sleduje dráhu fotonů, určuje, zda a pod jakým úhlem se fotony odrazí od stěny, a počítá, kolik jich dorazilo do části napojené na světlovod. Dále zapisuje do histogramu čas, za který fotony dorazí do detektoru.

V simulaci nejprve nadefinujeme tvar scintilátoru. Poté začne cyklus přes všechny částice. V jednom kroku tohoto cyklu nadefinujeme bod, kde částice proletí scintilátorem a poté se spustí cyklus přes všechny fotony. Jednotlivé fotony vylétávají pod náhodným úhlem. Pro každý foton následuje cyklus odrazů. Při každé změně směru dráhy letu fotonu (odrazu od stěny) se kontroluje, zda-li foton nevyletěl ze scintilátoru. To nastává, pokud foton překročí mezní úhel. Dále se kontroluje, zda nepřekročil dolet ve scintilátoru jeden metr (v těchto případech cyklus přes tento foton končí) a zda nedorazil do okénka fotonásobiče (foton se započítá jako došlý do fotonásobiče). Pokud tyto všechny podmínky splnil, foton se odrazí od stěny a cyklus se opakuje.

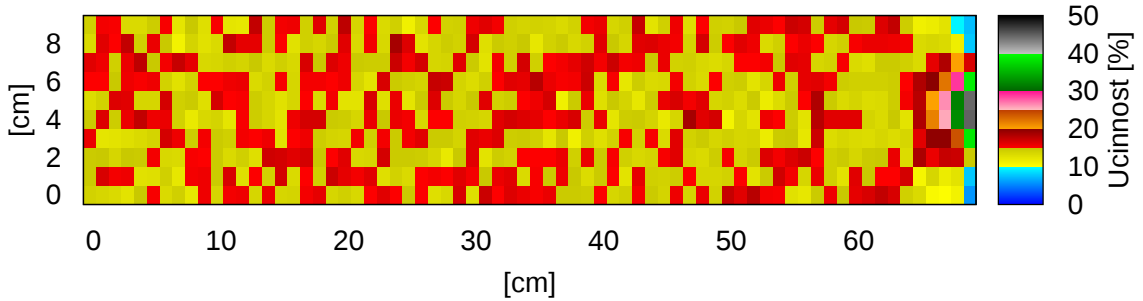


Obr. 2.1: Ilustrace průchodu fotonů scintilátorem o rozměrech $70 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$.

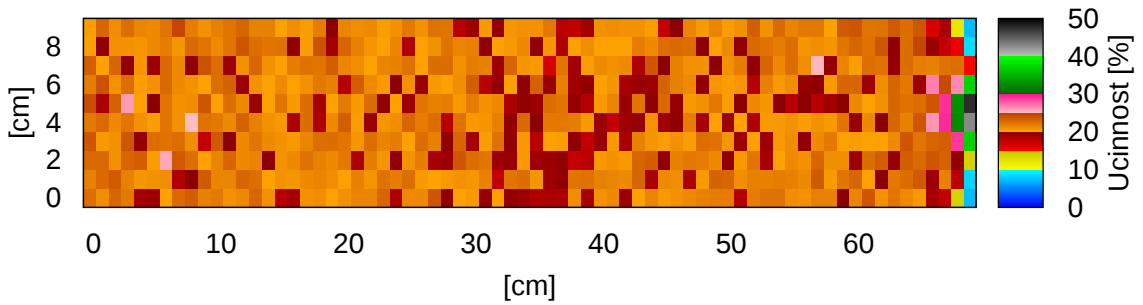
Na Obr. 2.1 je ilustrace simulace průchodu jednoho mionu o vzniku 200 fotonů scintilátorem o velikosti $70 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$. Tento počet fotonů slouží jen k ilustraci geometrie, není podložen žádnou fyzikální motivací. V tomto konkrétním případě je účinnost 10%, červeně je zvýrazněna část napojená na fotonásobič.

Zkoumali jsme, jaký je rozdíl v účinnosti scintilátoru, pokud dojde ke scintilaci v zadní části detektoru a v blízkosti fotonásobiče. Účinnost jsme brali jako podíl fotonů, které doletí do plochy

napojené na fotonásobič a celkového počtu fotonů vytvořených ve scintilátoru. Simulátor jsme rozdělili na 10×70 čtverců, v každém jsme vytvořili 750 fotonů. Jak se ukázalo (Obr. 2.2), pro tento scintilátor místo průletu mionu nehraje roli. Zkoumali jsme i případ, kdy je povrch scintilátoru opatřen dokonale odrazivou plochou. Jak je vidět na Obr. 2.3, ani v tomto případě na místě scintilace (tzn. místě průletu mionu) nezáleží. Chyba tohoto odhadu účinnosti nepřekročí 2 %.



Obr. 2.2: Efektivita scintilátoru o rozměrech $70 \times 10 \text{ cm}^2$ v závislosti na místě, kde došlo ke scintilaci.



Obr. 2.3: Efektivita scintilátoru opatřeného dokonale odrazivou plochou o rozměrech $70 \times 10 \text{ cm}^2$ v závislosti na bodu, kde došlo ke scintilaci.

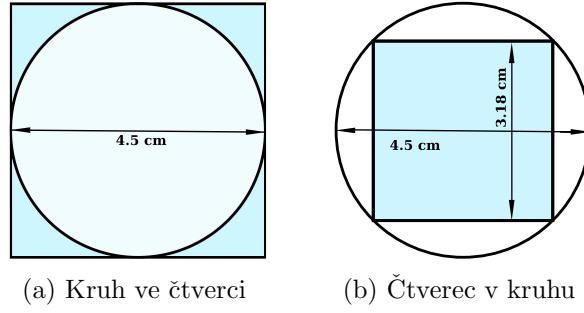
Rozměry scintilátoru jsme určili taktéž pomocí simulací v ROOTu. Na Obr. 2.5 je vykreslena závislost účinnosti scintilátoru na délce části scintilátoru nahrazující světlovod. Jak je z obrázku vidět, maximální účinnosti dosáhneme při délce opracované části zhruba 5 cm.

2.2 Světlovod

Vzhledem k omezeným rozměrům fotonásobiče (průměr vstupního okénka fotonásobiče je dle výrobce 45 mm) jsme diskutovali, zda světlo svést pomocí světlovodu přímo do fotonásobiče, nebo zda světlovod vůbec nepoužít. Simulace ukázaly, že použití světlovodu pouze sníží účinnost na maximálně asi 8%, což by vedlo pouze ke slabšímu signálu, jehož šířku by použití světlovodu nezlepšilo. V těchto simulacích jsme uvažovali rozměry scintilátoru $70 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$. K němu jsme přidali světlovod a započítali vliv lomu světla na rozhraní scintilátoru a světlovodu.

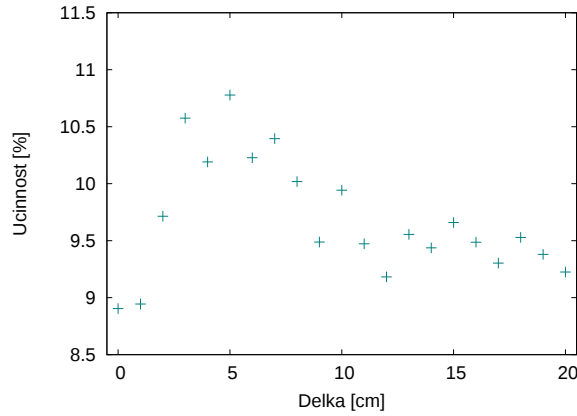
Samotný scintilační materiál upravíme do tvaru jako na Obr. 2.1. Při tomto designu jsme diskutovali dvě možnosti napojení na fotonásobič, znázorněných na Obr. 2.4), tedy geometrie, kdy scintilátor překrývá okénko fotonásobiče a kdy je tomu naopak.

Pro jednoduchost jsme předpokládali, že paprsky doletí homogenně do červené plochy na Obr. 2.1. Jak je vidět z Obr. 2.5, kde jsme předpokládali výšku scintilátorového okénka dokonce 5 cm jako v

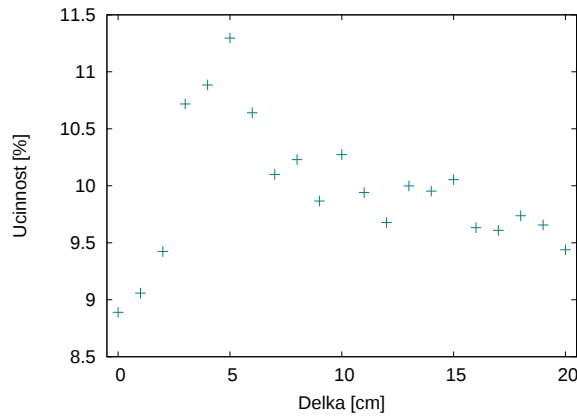


Obr. 2.4: Geometrie napojení scintilátoru na fotonásobič.

případě na Obr.2.4a, a z Obr.2.6, kde jsme použili geometrii z Obr.2.4b, rozdíl v účinnostech je minimální. Z těchto důvodů byla zvolena geometrie na Obr.2.4a.



Obr. 2.5: Efektivita scintilátoru o rozměrech $70 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$ v závislosti na délce světlovodné části scitilátoru při použití geometrie na Obr.2.4a.



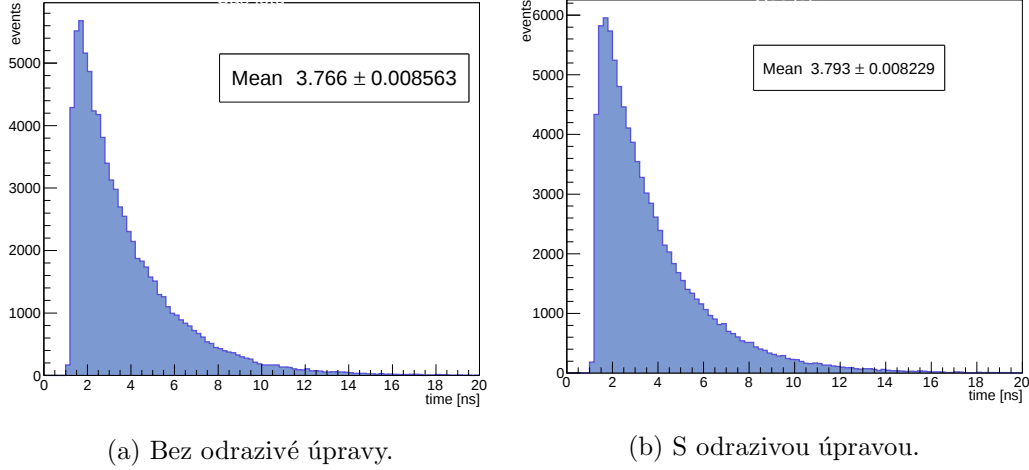
Obr. 2.6: Efektivita scintilátoru o rozměrech $70 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$ v závislosti na délce světlovodné části scitilátoru při použití geometrie na Obr.2.4b.

2.3 Průchod mionů detekční částí

Pomocí programu Geant4 [3], [4] jsme zkoumali energii deponovanou ve scintilátoru. Pro dopadající miony o střední energii 4 GeV závisí množství deponované energie lineárně na tloušťce scintilátoru a

Tloušťka detektoru [mm]	Střední deponovaná energie [MeV]
25	$5,96 \pm 0,02$
30	$7,11 \pm 0,02$
40	$9,44 \pm 0,02$
50	$11,95 \pm 0,03$

Tabulka 2.1: Střední deponovaná energie z mionu o střední energii 4 GeV pro různé tloušťky scintilátoru.



Obr. 2.7: Doba letu za kterou foton doletí do fotonásobiče.

tedy ovlivňuje výsledný signál. Srovnání deponované energie pro různé tloušťky je v Tab.2.1. Tyto simulace dále ukázaly, že vzhledem k dostatečně velké energii nalétávajících mionů je střední deponovaná energie v obou částech scintilátoru stejná bez ohledu na vzdálenost mezi bloky scintilátoru.

2.4 Průběh signálu

Pomocí Geant4 jsme určili střední deponovanou energii ve scintilátoru na $11,95 \pm 0,03$ MeV. Pětina této energie je skutečně přetvořena na fotony o délce 430 nm [10]. Použitím vztahu pro energii fotonu E

$$E = \frac{hc}{\lambda},$$

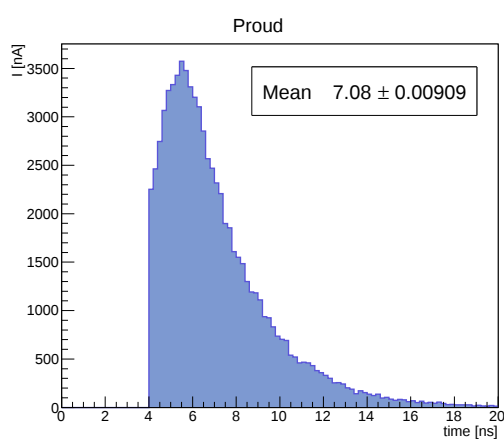
kde h je Planckova konstanta, c rychlost světla ve vakuu a λ vlnová délka, dostaneme zhruba 830 000 fotonů na průlet jedné částice.

Dle [2] platí pro časovou závislost intenzity vztah

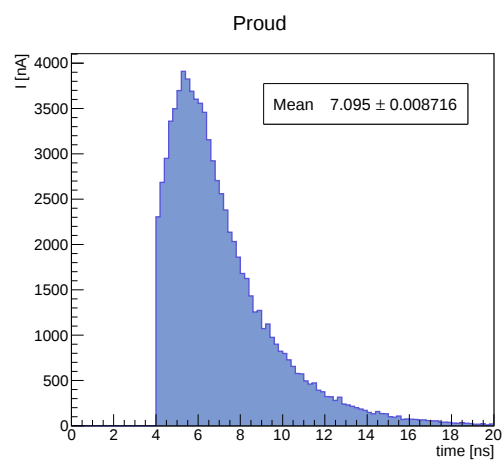
$$I \propto e^{-t/\tau},$$

kde τ značí dobu dosvitu scintilátoru, tedy dobu mezi ukončením excitace a vyzářením fotonu. V případě PMMA je $\tau = 2,5$ ns. Na Obr.2.7 vidíme výsledný histogram doby, za kterou částice doletí do fotonásobiče. Dobu, za kterou foton dorazí do fotonásobiče, jsme vypočítali z délky dráhy letu fotonů a z předchozího vztahu. Předpokládali jsme, že fotony se v PMMA pohybují rychlostí $3 \cdot 10^8$ m/s.

Kvantová účinnost fotokatody je stanovena na 25% [6] zesílení fotonásobiče je 10^6 [6]. Pomocí základního vztahu pro proud $I = \text{náboj}/\text{čas}$ tedy můžeme z doby letu fotonu vypočítat předpokládaný průběh signálu. Ve fotonásobiči dojde ke zpoždění signálu a ke gaussovskému rozmazání se střední kvadratickou odchylkou $\sigma = 1,27$ ns. Výsledné tvary signálu pro povrch bez a s odrazivou úpravou jsou na Obr.2.8. Výsledný tvar může být ovlivněn použitím pouze 2D simulace. Doba náběhu signálu navíc záleží na místě, kde došlo ke scintilaci.



(a) Bez odrazivé úpravy.



(b) S odrazivou úpravou.

Obr. 2.8: Výsledný průběh signálu $I = I(time)$.

Kapitola 3

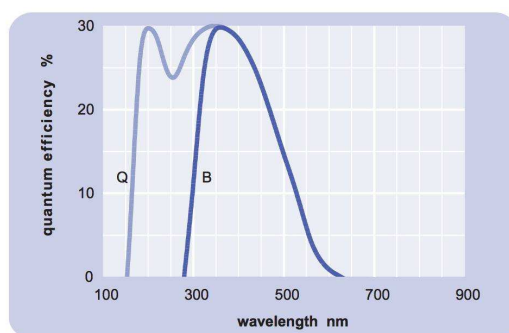
Opracování scintilátoru a jeho připojení na fotonásobič

Volba organického materiálu byla provedena z důvodu možností jeho opracování na požadované rozměry, které jsme získali z provedených simulací. Pro detektor je použit scintilátor od společnosti ENVINET[5] vyrobený z materiálu, který je označován jako SP32[5]. Technické parametry tohoto materiálu jsou uvedené v Tab.3.1.

Hustota	1,03g/cm ³
Index lomu	1,57
Bod měknutí	70°C až 75°C
Světelný výkon	65%ns
Doba dosvitu	2,5ns
Vlnová délka max.	vyzařování 420 až 440nm

Tabulka 3.1: Technické vlastnosti scintilačního materiálu SP32 (PMMA). Převzato z [5].

Jako fotonásobič je použit výrobek nesoucí označení 9813BQ [6]. Okénko s indexem lomu 1.46 tohoto fotonásobiče má aktivní poloměr 46mm. Okénko, jak je zobrazeno na Obr.3.1, je transparentní pro fotony s vlnovou délkou 160 - 630 nm. Podrobnější technický popis lze nalézt v [6].



Obr. 3.1: Spektrální účinnost fotonásobiče. Převzato z [6].

Jako výchozí pro sestavení scintilátoru bude použit scintilátorový blok o rozměrech 70×10×5 cm³. Jeho úpravy budou probíhat v souladu s výsledky simulace. Plocha scintilátoru bude spojena s plochou fotonásobiče optickou pastou, která díky indexu lomu blízkému indexu lomu skla a scintilátoru sníží ztráty při prostupu světla. Ostatní části povrchu scintilátoru budou navíc obaleny hliníkovou folií tak aby byly dále sníženy ztráty světla vzniklého průletem nabitě částice při jeho odrazech.

Kapitola 4

Elektronika pro TOF kosmických mionů

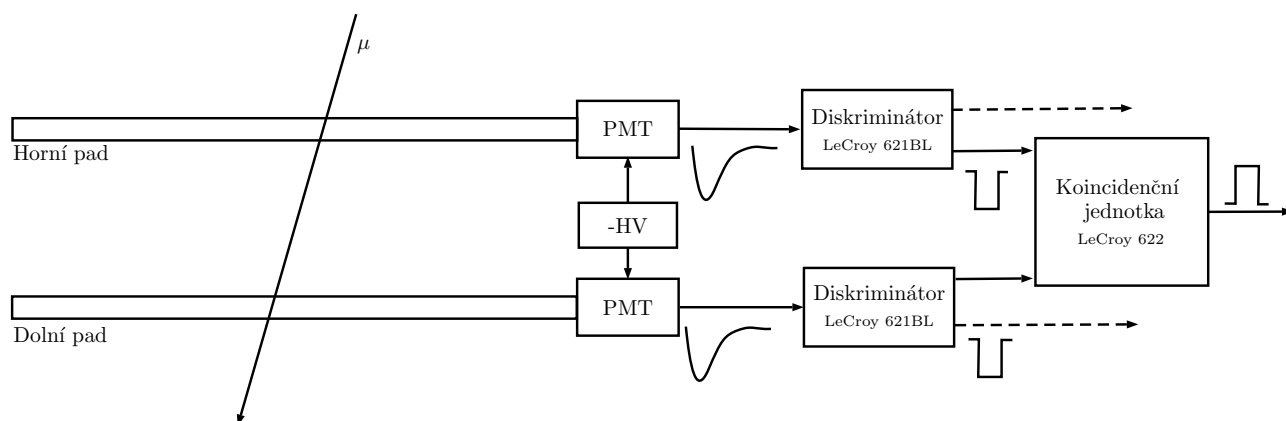
Návrh elektroniky, jejíž cílem je nejen statistické určení počtu mionů, které proletí detektorem, ale i určení doby letu TOF, je rozdělen na dvě části.

První z nich je koincidence, jejíž účelem je zaznamenání průletu mionu oběma scintilátory a rozlišení těchto událostí od situací, kdy částice 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 toho, že měříme dobu průletu jednoho identického mionu mezi dvěma scintilátory.

4.1 Koincidence

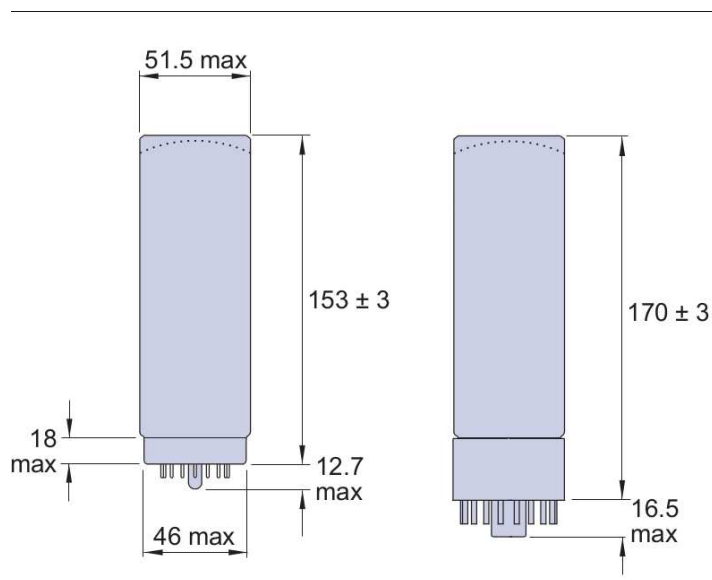
Schéma koincidenčního obvodu je zachyceno na Obr. 4.1. Při průletu mionu scintilátorem dojde k vytvoření spršky fotonů, které jsou zachyceny fotokatodou a prostřednictvím fotonásobiče (PMT) převedeny na elektrický signál.



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

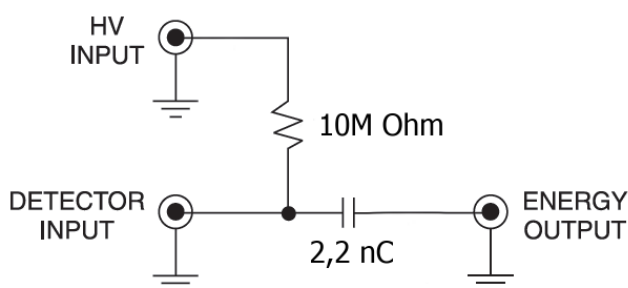
Přesnost fotonásobičů velmi ovlivňuje rozlišovací schopnost celé aparatury. Zde je použit fotonásobič 9813BQ [6], který dodává firma Envinet spolu s napájecí paticí. Napájecí patice je v podstatě napěťový dělič sloužící k napájení elektrod fotonásobiče kaskádně rostoucím napětím, což způsobuje zesilovací efekt. Rozměry fotonásobiče jsou zachyceny na Obr. 4.2. Níže uvádíme některé důležité technické parametry fotonásobiče.

- Zesílení: $10^5 - 10^6$
- Napájecí napětí: 1.2 kV
- Maximální proud tekoucí anodou: $100 \mu A$
- Náběhová doba jednoho detekovaného elektronu: 2 ns
- FWHM šířka jednoho detekovaného elektronu: 3 ns



Obr. 4.2: Rozměry fotonásobiče v mm. Vlevo náčrtek bez napájecí patice, vpravo s připojenou paticí [6].

Fotonásobiče jsou napájeny pomocí zdroje vysokého napětí Bertan 225 [7] od firmy Spellman. 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.



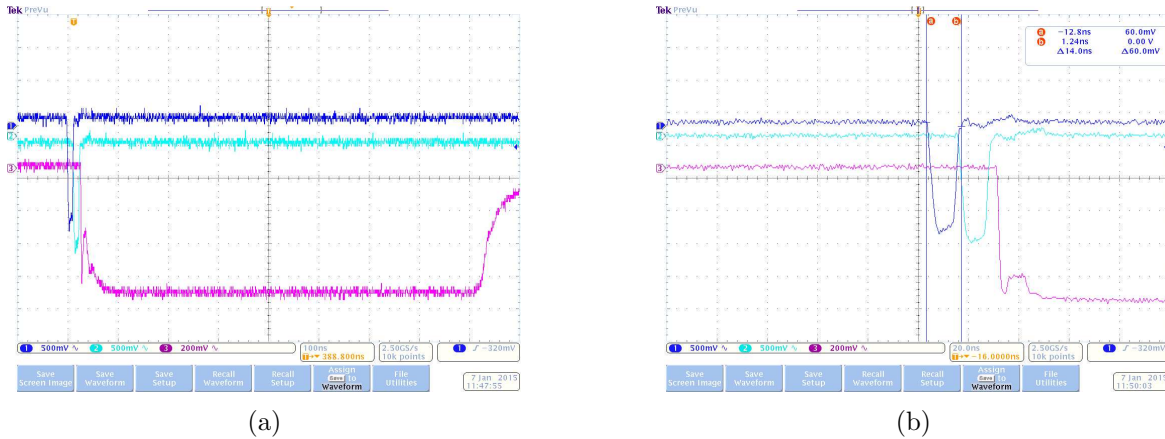
Obr. 4.3: Schéma napájecího členu s kondenzátorem sloužícího pro odělení signálu od vysokého napětí.

Signál z fotonásobiče dále putuje skrze velmi citlivý a rychlý diskriminátor LeCroy 621BL [8], který po překročení prahového napětí vygeneruje obdélníkový pulz. Ten je následně přiveden na koincidenční jednotku LeCroy 622 [9]. 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 koincidenci.

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 doby letu (na schématu znázorněn přerušovanou šipkou).

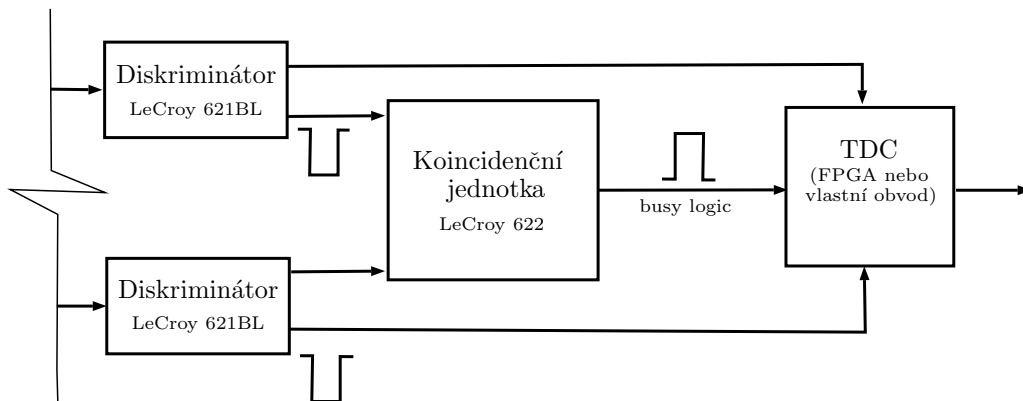
4.2 Testování aparatury

Při testování výsledku celého koincidenčního obvodu, tj. samotné koincidence, jsme vytvořili uměle zpožděný signál. Toho jsme dosáhli tak, že jsme rozdělili výstupní signál z jednoho scintilátoru na dva a ty jsme přivedli na příslušné kanály diskriminátoru. Výsledek je zachycen na Obr. 4.4, kde můžeme vidět původní signál, totožný zpožděný signál a výstup z koincidenční jednotky při události triggerované na původní (tmavěmodrý) signál přicházející ze scintilátoru.



Obr. 4.4: Snímek multikanálového osciloskopu při testování koincidence. Tmavomodrá barva ukazuje původní signál přicházející ze scintilátoru, světlemodrá barva značí tentýž, ale zpožděný signál a fialová je výstup z koincidenční jednotky. Snímek (b) ukazuje detail šířky vstupních signálů.

4.3 Obvod doby letu



Obr. 4.5: Blokové schéma obvodu 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.

Při návrhu druhé části aparatury, tj. obvodu doby letu zachyceném na Obr. 4.5, byly uvažovány dvě možnosti, které dále diskutujeme a uvedeme výhody a nevýhody. Jedná se o využití *time-to-digital* převodníku (TDC) nebo modulu FPGA (*Field-Programmable Gate Array*).

4.3.1 TDC

Při použití hotového *time-to-digital* převodníku, jako je například MAX35101 [12] od společnosti *Maxim integrated*, je třeba vytvořit vlastní integrovaný obvod, který by zajišťoval všechny ostatní potřebné funkce k určení doby letu. Výhodou je konečná hodnota časového rozlišení, které se pohybuje okolo 20 ps.

Značnou nevýhodou tohoto řešení je velice obtížný návrh a následná konstrukce plošných spojů. Dalším problémem je jednoúčelovost a finanční náročnost takového řešení, přičemž TDC požadované kvality jsou dostupné pouze v USA.

4.3.2 FPGA

Řešení prostřednictvím modulu FPGA je založeno na Virtex-6 FPGA ML605 vývojovém kitu, kde je možné si jednotlivé části obvodu prostřednictvím softwaru naprogramovat. Konečné časové rozlišení, kterého lze při realizaci tohoto řešení dosáhnout je přibližně 50 ps, což je sice 2,5 krát více, než v případě TDC.

Výhodou tohoto řešení je vysoká variabilita FPGA modulu, což nám umožní dynamicky měnit schopnosti celého zařízení. Také obsahuje ethernetový port, skrze který je možné exportování naměřených dat. Další výhodou je dostupnost tohoto zařízení.

Nevýhodou je nutná znalost programovací jazyka VHDL. Oproti prvnímu řešení je zde nutná obtížná implementace převodu *time-to-digital*. Existují ovšem veřejně přístupné knihovny, jako např. projekt *Open source TDC core for FPGAs* [11], který tuto funkci zahrnuje.

Kapitola 5

Konštrukcia detektoru doby letu

Konštrukčné vyhotovenie detektoru doby letu je rozdelené do dvoch častí - prvá predstavuje vyhotovenie nosných častí detektoru a upevnenie jednotlivých detekčných dielov, druhá časť vyhotovenia zabezpečuje tienenie citlivých oblastí detektoru.

5.1 Nosné časti detektoru

Pri konštrukcii musíme brať do úvahy rozmery a hmotnosti jednotlivých dielov detekčnej časti. Scintilátor má hmotnosť $\simeq 4130$ g a vonkajšie rozmery $70 \times 10 \times 5$ cm³. Fotonásobič má valcový tvar s rozmermi $25 \times 10 \times 10$ cm³ a hmotnosť 895 g (obal $\simeq 526$ g a vnútorná časť $\simeq 369$ g).

Základnou požiadavkou konštrukcie zariadenia je teda pevnosť jeho nosných častí a minimálne rozmery nosných platní zohľadňujúce rozmery scintilátora a fotonásobiča - dĺžka 1000 mm (dĺžka scintilátora 700 mm + dĺžka fotonásobiča 250 mm + manipulačná vôľa) a šírka 150 mm (šírka scintilátora 10 mm + manipulačná vôľa). Nosná konštrukcia musí byť zároveň dostatočne flexibilná na to, aby bolo možné s detektorom ľahko manipulovať - meniť vzájomnú vertikálnu vzdialenosť detekčných blokov, jednoducho vymeniť poškodené časti, či presúvať detektor z miesta na miesto.

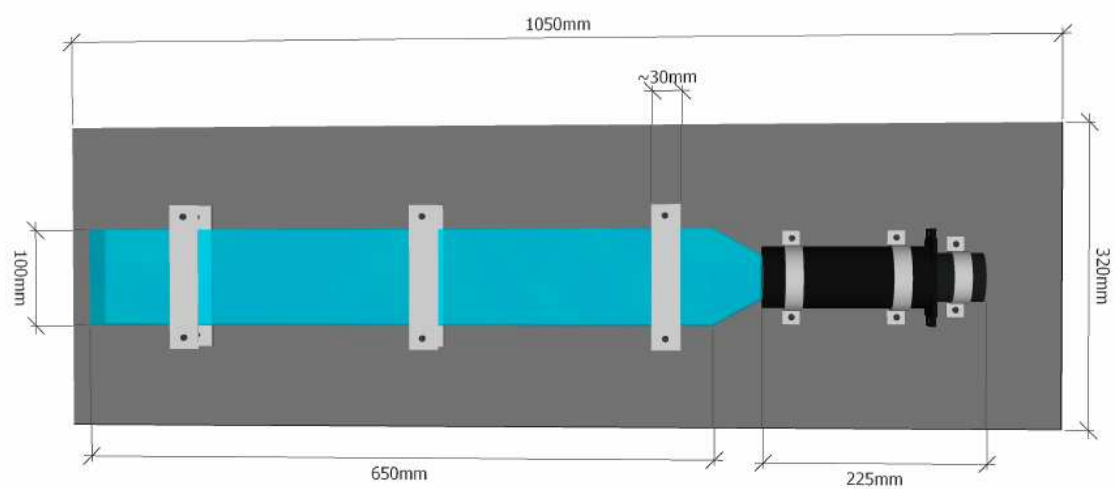
Na základe našich požiadaviek je zvolený ako nosný prvok konštrukcie policový regál SUPER 123 firmy REGAL SISTEM. Nosným rámcom konštrukcie sú regálové stojky s dĺžkou 1576 mm, pričom detekčné časti sú realizované ako upravené police detektoru s príslušným vybavením. Výrobcom uvádzaná hmotnosť regálu je 12,39 kg.

Regálové stojky majú rovnomerne od seba vzdialené otvory na skrutky, vďaka čomu môžu byť regálové police v rôznych vzájomných vertikálnych vzdialenostiach (vzdialenosť najbližších dvoch otvorov je 5 cm, prvý a posledný otvor sú od seba vzdialené 120 cm. V zmysle lepšej stability celej konštrukcie sú regálové stojky po stranách spevnené lištami. Policami nosného regálu sú platne s plošnými rozmermi 1050×320 mm², na ktorých sú pripevnené detekčné diely. Nosnosť každej police je $\simeq 150$ kg, čo je pri našej konštrukcii dostatočné. Schéma zvolenej police spolu s jej rozmermi, ako i umiestnenie detektoru s jeho rozmermi je na Obr. 5.1.

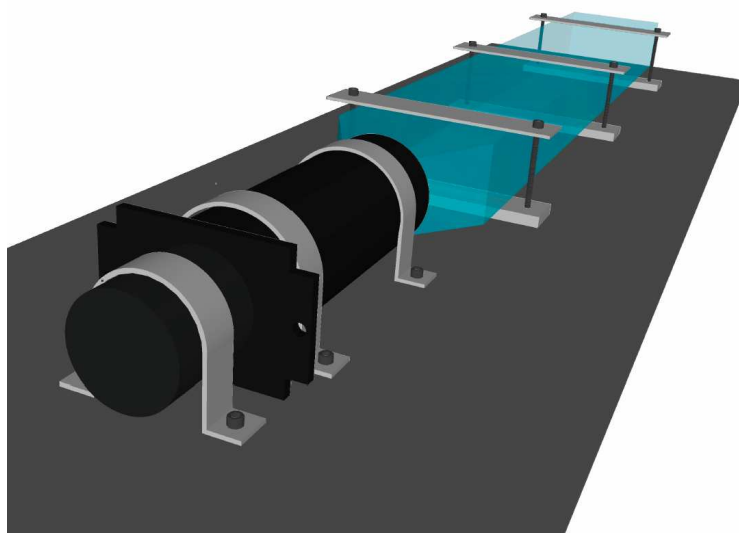
Všetky prvky regálovej konštrukcie sú vyrobené z pozinkovanej ocele. Povrchová úprava zaručuje vysokú odolnosť voči oderu, či inému mechanickému poškodeniu.

5.2 Upevnenie detekčných dielov

Scintilačné bloky a fotonásobiče je potrebné upevniť na nosnú konštrukciu (police regálu) tak, aby sa zachovalo prekrytie scintilačných blokov aj pri posune detekčných blokov voči sebe vo vertikálnom smere. Oba detekčné bloky sú pripevnené o oceľové police, ktoré v prípade horného detekčného dielu zohrávajú aj tieniacu funkciu. Obzvlášť horný detekčný blok vyžaduje silné upevnenie, nakoľko scintilátor aj fotonásobič "visia" pod platňou, Obr. 5.6. Na Obr. 5.2 možno vidieť zvolené miesta úchopov scintilátorov a fotonásobičov o police.

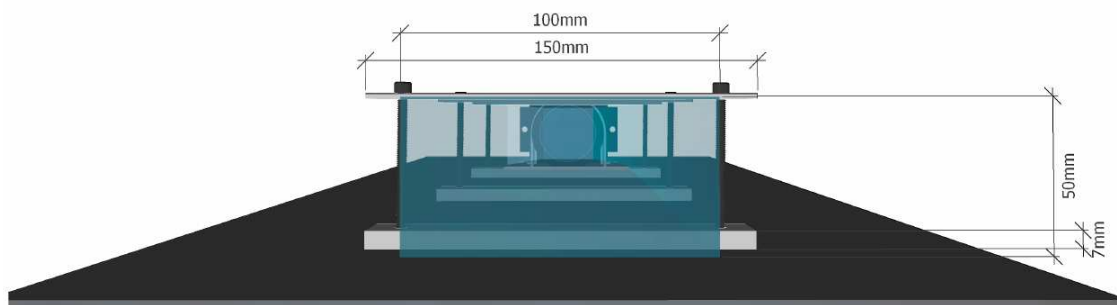


Obr. 5.1: Schéma rozmerov nosnej police a plánované umiestnenie detektora na nej.

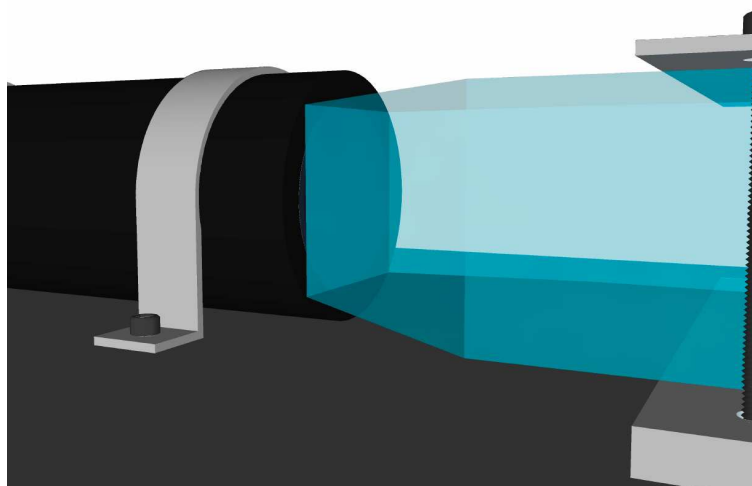


Obr. 5.2: Schéma uchytenia fotonásobiča a scintilátorov plechovými pásikmi.

V prípade upevnenia scintilátoru sa volia ako úchopy tri dvojice plechových pásov s dĺžkou $\simeq 15$ cm a šírkou $\simeq 3$ cm. V každej dvojici budú pásiky nad sebou, spojené medzi sebou a s policou dostatočne dlhou šraubou (aspoň 8 cm) s priemerom aspoň 5 mm. Schéma vertikálneho usporiadania úchopových pásov a scintilátora je na Obr. 5.3. Pásik bližšie k polici slúži na správne výškové umiestnenie scintilátora, keďže potrebujeme aby jeho zrezaná časť smerovala presne na okno fotonásobiča (výška spodku okna fotonásobiča pri jeho položení na polici je približne 7 mm nad policiou, Obr. 5.4).



Obr. 5.3: Schéma uchytenia scintilátora dvojicami pásov.



Obr. 5.4: Znázornenie kontaktu scintilátora s oknom fotonásobiča, dôvod podloženia scintilátora.

V prípade fotonásobičov sa úchopy riešia prostredníctvom dvoch dvojíc dierovaných oceľových pásov (typ ako na Obr. 5.5) s dostatočnou dĺžkou (bude nameraná priamo na mieste tak, aby dostatočne tesne obopínala fotonásobič) a šírkou $\simeq 0.8$ mm. Tieto pásy vytvarované do tvaru Ω obopnú fotonásobič a cez dierky sa priskrutkujú o policu (Obr. 5.2). Aby bol fotonásobič uchopený dosť pevne, budú oceľové pásiky a rovnako aj styčná plocha medzi fotonásobičom a policiou, kam pásik nedosiahne, vybavené hrubou gumovou vložkou (štandardne dodávaná s oceľovými páskami).

5.3 Tienenie

Významnou požadovanou funkciou konštrukcie detektora je tiež tienenie objemu medzi scintilačnými blokmi pred nežiaducim žiarením prichádzajúcim zo strán. Toto žiarenie je tvorené prevažne žiarením fotónov z rôznych zdrojov (svetla) v miestnosti, zo Slnka, či z iných elektrických zariadení v okolí. Uvažujeme tienenie v podobe platní s rozmermi 1500×320 mm² (bočné steny) a 1500×1050 mm² (zadná stena). Ako tieniaci materiál je použitý hliníkový plech s hrúbkou aspoň 3 mm, ktorá by

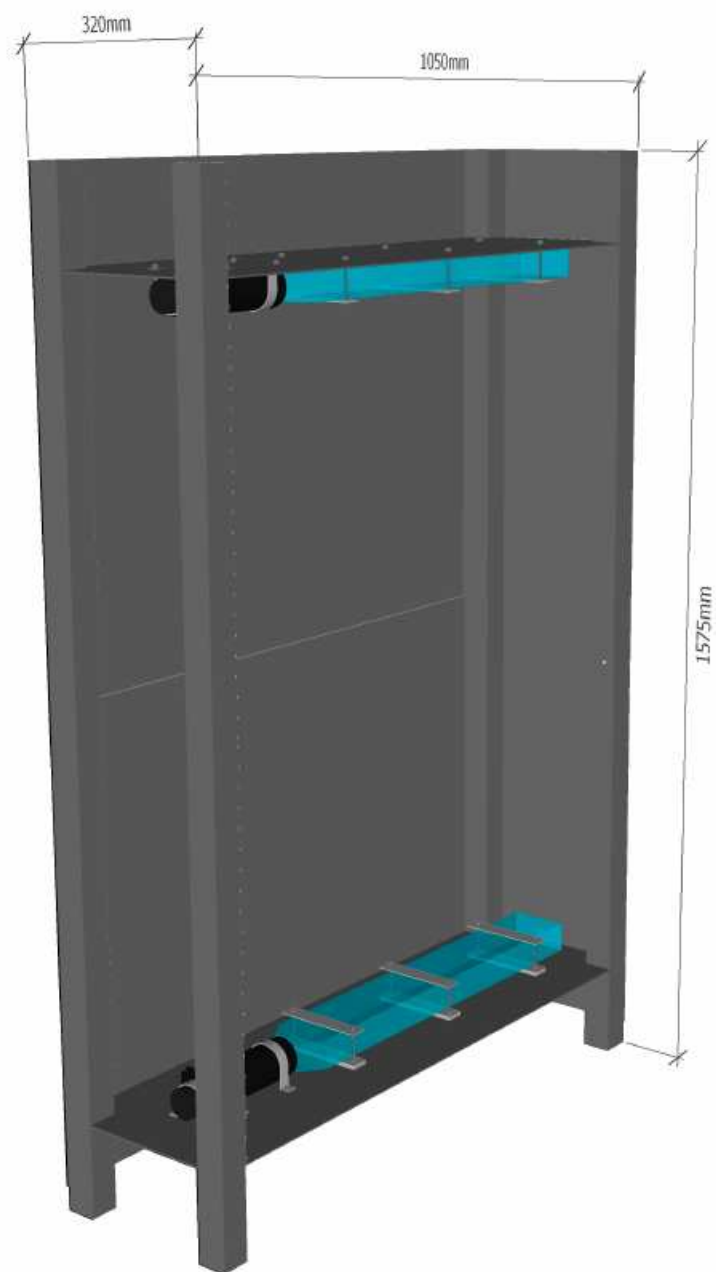


Obr. 5.5: Páska použitá na pripevnenie fotonásobiča o policu.

mala byť dostatočná na odtienenie nežiaduceho fotónového a kozmického žiarenia. Celková hmotnosť tienenia sa bude pohybovať na úrovni 15 kg.

Jednotlivé kusy plechu sú vo viacerých bodoch pripevnené pomocou kovových skrutiek o regálové stojky nosnej konštrukcie, použité sú diery na police na stojkách regálu. Predná stena detektoru je zhotovená z plexiskla a otvárateľná (odšróbovateľná), aby bolo možné manipulovať s detekčnými blokmi a uskutočňovať na nich opravy.

Celková schéma našej navrhovanej konštrukcie, spolu so znázornenými pripojenými tieniacimi plechmi je zobrazená na Obr. 5.6.



Obr. 5.6: Navrhovaná konštrukcia detektoru spolu s jeho tienením.

Záver

Navrhli sme koncept scintilačného detektoru typu TOF. Na základe simulácií a nám dostupných materiálov sme zvolili vonkajšie rozmery detektoru $70 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$. Spoj s fotonásobičom bude riešený zrezaním scintilačného materiálu do vhodného tvaru, ktorý v našich simuláciach vykazoval najväčšiu efektivitu zberu vzniknutých fotónov po prechode kozmických miónov. Medzi scintilátorom a oknom fotonásobiča bude tenká vrstva optickej pasty. Celý scintilátor bude obalený v tenkej hliníkovej fólii, aby sa zabránilo úniku vzniknutých fotónov zo scintilačného materiálu.

Elektrický signál bude vytváraný fotonásobičom typu Envinet 9813BQ. Ten bude vyčítaný pomocou koincidencie, kde sme sa rozhodli použiť modul FPGA založený na vývojovom kíte Virtex-6 FPGA ML605. Pomocou tohto modulu bude možné dosiahnuť časového rozlíšenia na úrovni 50 ps.

Detekčné prvky budú umiestnené vo vhodne upravenom policovom regále od firmy REGAL SYSTEM. Tienenie bude zaručené pomocou plechových platní pripevnených na stojkách regálu.

Literatúra

- [1] Astroparticle Physics, Grupen, C., ISBN-13 978-3-540-25312-9, 2005, Springer.
- [2] Radiation Detection and Measurement, Knoll, G.F., ISBN 9780471073383, 2000, Wiley.
- [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] www.envinet.cz, [online]
<http://www.envinet.cz> [Accessed 15 Jan. 2015].
- [6] 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].
- [7] www.spellmanhv.com, (2015). *Instruction manual, series 225* [online]
<http://www.spellmanhv.com/manuals/225> [Accessed 7 Jan. 2015].
- [8] [Www-esd.fnal.gov](http://www-esd.fnal.gov), (2015). *LeCroy 621BL Quad Discriminator*. [online]
<http://www-esd.fnal.gov/esd/catalog/main/lcrynim/621bl-spec.htm> [Accessed 10 Jan. 2015].
- [9] [Www-esd.fnal.gov](http://www-esd.fnal.gov), (2015). *LeCroy 622 Quad 2-fold LOG Unit*. [online]
<http://www-esd.fnal.gov/esd/catalog/main/lcrynim/622-spec.htm> [Accessed 10 Jan. 2015].
- [10] 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> [Accessed 17 Dec. 2014].
- [11] Lakernel.net, (2015). *Open source TDC core for FPGAs < lekernel's scrapbook*. [online]
<http://lekernel.net/blog/2011/09/open-source-tdc-core-for-fpgas/> [Accessed 10 Jan. 2015].
- [12] Maximintegrated.com, (2015). *MAX35101 Time-to-Digital Converter with Analog Front-End - Maxim*. [online]
<http://www.maximintegrated.com/en/products/industries/metering-energy-measurement/MAX35101.html> [Accessed 10 Jan. 2015].