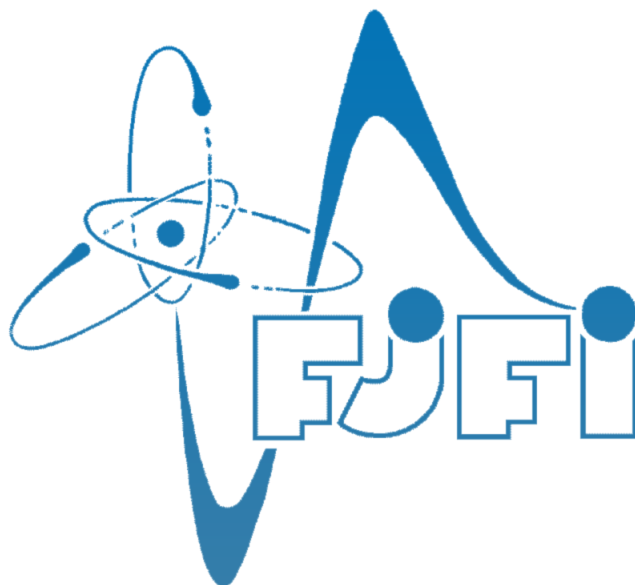


České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská



Technical Design Report

Jiskrová komora

PPRA kolaborace
Praha, 2017

Členové kolaborace

Koordinátor projektu

Lukáš Novotný

Mluvčí projektu

Dagmar Bendová

Teorie a simulace

Jakub Cimerman

Lukáš Holub

Vnější konstrukce

Dagmar Bendová

Zuzana Gajdošová

Vnitřní konstrukce

Lukáš Novotný

Radka Sochorová

Alena Zemanová

Plyn a plnění

Robert Líčeník

Jan Pokorný

Josef Uchýtil

Napájení

Peter Příbeli

Vladimír Žitka

Trigger a scintilátory

Elisabeth Andriantsarazo

Alena Bakalová

Vendulka Fílová

Oliver Matonoha

Šimon Novák

Obsah

Úvod	1
1 Teorie a simulace	2
1.1 Teoretický princip iskrovej komory	2
1.2 Kozmické žiarenie	3
1.3 Simulácia dopadajúcich miónov	4
1.4 Simulácia záchytu fotónov wavelength shiftermi	6
2 Konstrukce	9
2.1 Vnější konstrukce	9
2.2 Vnitřní konstrukce	11
3 Plyn a plnění	14
3.1 Průrazné napětí plynu	14
3.1.1 Paschenův zákon	15
3.2 Výběr plnicího plynu	16
3.3 Způsob plnění	16
3.4 Napájení jiskrové komory	17
3.4.1 Zesilovač	17
3.4.2 Transformátor	18
3.4.3 Jiskřiště	18
4 Trigger a scintilátory	21
4.1 Trigger	21
4.2 Scintilátory a sběr světla	21
4.3 Zapojení APD	23
4.4 Zpracování signálu	24

Úvod

Každou sekundu dopadají na Zemi spršky vysokoenergetických částic kosmického záření. Přímo na povrch dopadají především miony. Jelikož tyto částice mají nenulový elektrický náboj, jsou relativně snadno detekovatelné, což se pokusíme demonstrovat pomocí jiskrové komory.

Jedná se o dráhový detektor částic, který je snadno zkonstruovatelný a má dobré prostorové i časové rozlišení. Mimo jiné na něm lze pozorovat i vzácné procesy. Pomocí tohoto detektoru bylo například objeveno mionové neutrino. Zjednodušeně se jiskrová komora skládá z kovových desek umístěných paralelně v nádobě s inertním plynem, který je ionizován průchodem nabitě částice. Za použití informace z koincidenční jednotky, která porovnává příchozí signál ze dvou scintilátorů umístěných nad a pod komorou, je na desky přiváděno vysoké napětí. To umožňuje volným iontům plynu vytvářet laviny, v důsledku čehož proběhně v komoře jiskrový výboj.

První kapitola tohoto textu se krátce věnuje teorii kosmického záření a simulacím provedených pro potřeby ostatních skupin. Ve druhé kapitole je popsána vnější a vnitřní konstrukce samotné komory. Třetí kapitola má za úkol představit vybraný pracovní plyn a způsob, jakým jím budeme komoru plnit. Čtvrtá kapitola se věnuje napájení a společně s pátou kapitolou, věnovanou tématice triggerování a scintilátorům, popisují způsob přivedení napěťového pulsu na desky na základně informace získané ze scintilátorů.

Kapitola 1

Teorie a simulace

1.1 Teoretický princíp iskrovej komory

Iskrová komora je jedno z prvých zariadení v časticovej fyzike, ktoré slúžilo na detekciu elektricky nabitých častíc. Boli prevažne používané v rokoch 1940 - 1960.

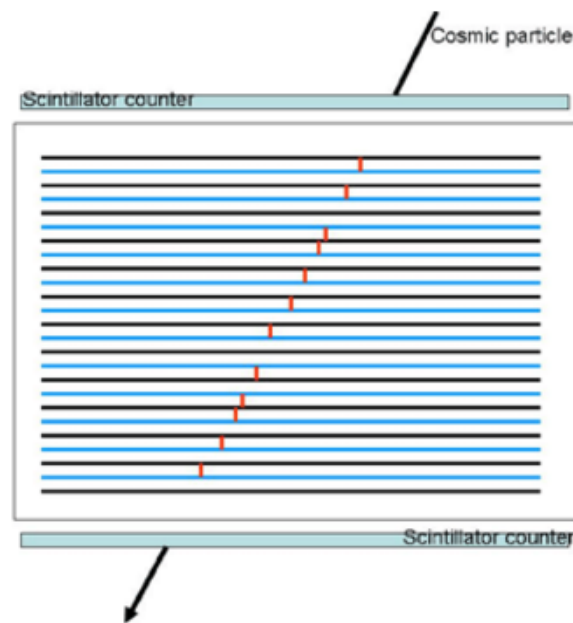
Táto komora pozostáva z kovových dosiek, ktoré sú umiestnené paralelne vedľa seba v tlakovo uzavretej komore vyplnenej nejakým plynom (napr: helium, argón, neón,...), pozri (Obr.1.1). Pri prechode nabytej častice cez iskrovú komoru táto častica ionizuje plyn nachádzajúci sa v komore medzi platňami. Za normálnych okolností táto ionizácia nie je pozorovateľná avšak, ak aplikujeme dostatočne veľké napätie medzi susednými platňami, krátko po prechode ionizujúcej častice inertným plynom, tak môžeme pozorovať iskry, ktoré vznikajú pozdĺž trajektórie častice. Ak naskladáme viacej takýchto dosiek paralelne vedľa seba, ktoré budú pracovať simultálne, tak potom trajektória častice je daná líniou takto vzniknutých iskier. Túto líniu iskier možno pozorovať priamo alebo cez videoprojekciu [2]. Týmto spôsobom je v našich silách pozorovať danú trajektóriu príslušne nabitej častice. Toto vysoké napätie však nemôže byť udržiavané permanentne medzi platňami pretože by to mohlo viesť k formovaniu elektrických oblúkov a priebežnému vybíjaniu zdroja.

Preto na kontrolu toho, kedy bude dané napätie aplikované, je potrebný ďalší detektor, ktorý bude rozhodovať o tom, kedy zapnúť dané napätie medzi platňami. Tento detektor často obsahuje scintilatory, ktoré sú umiestnené na vrchnej a spodnej strane komory. Takže, keď trigger systém detektora pocíti, že daným detektorom prešla nabitá častica, tak potom sa spustí spínač, ktorý privedie na platne vysoké napätie.

Hlavné medzníky v živote iskrovej komory [1]:

- **1949:** Keuffel prvýkrát pozoruje elektrický výboj medzi paralelnými platňami vznikajúci pozdĺž trajektórie kozmického žiarenia.
- **1955:** Hennings and Bagge spravili pár vylepšení. Použili viacej paralelných dosiek, vylepšili iskru použitím Argónu alebo alkoholu a odfotili stereo fotografiu.

- **1957:** Harwell, Cranshaw a de Beer vyvinuli trigger systém.
- **1959:** Fukui a Migamoto predstavujú možnosť pozorovania viacej ako len jednej častice naraz, použitie vzázného plynu a aplikovanie vysokého napätia ešte rýchlejšie.
- **1963:** Alikhanian prišiel z myšlienkou vytvorenia komory, kde medzery medzi platňami budú také široké, že bude možné pozorovať trajektóriu častice, ktorá bude dlhá až 20 cm.



Obr. 1.1: Princíp fungovania iskrovej komory [1].

1.2 Kozmické žiarenie

Kozmické žiarenie je vysokoenergetické žiarenie, ktoré pochádza najmä z oblastí mimo našej Slnecnej sústavy. Pri vstupe do atmosféry primárne častice kozmického žiarenia reagujú s atómami plynov vo vzduchu a vyraďajú spršku sekundárnych častíc. Aj tie však majú ešte veľmi vysokú energiu a každá z nich teda vyrazí ďalšiu spršku častíc. Pri dopade na zem je výsledkom takejto reťazovej reakcie obrovské množstvo častíc, ktoré dorazia v krátkom časovom intervale.

Väčšina z primárneho kozmického žiarenia pochádza zo supernov masívnych hviezd. Asi 99% tvoria jadrá známych atómov, zvyšné 1% sú osamotené elektróny. Z jadier sa v 90% prípadoch jedná o samostatné protóny (teda jadrá vodíka), 9% sú alfa častice a 1% sú ťažšie prvky. Veľmi malá časť kozmického žiarenia je tvorená aj stabilnými časticami antihmoty [3].

Primárne kozmické žiarenie

Toto žiarenie je súbor stabilných nabitých častíc, ktoré boli urýchlené na obrovské energie astrofyzikálnymi zdrojmi kdesi vo vesmíre. Musia byť stabilné, aby zvládli prežiť dlhú cestu medzihviezdny priestorom. Interakciou so zemskou atmosférou sa menia na sekundárne častice.

Sekundárne kozmické žiarenie

Keď primárne častice vstúpia do zemskej atmosféry, zrazia sa s atómami a molekulami. Táto interakcia produkuje kaskádu ľahších častíc, nazývanú tiež spŕška sekundárneho žiarenia, ktoré padajú k Zemi. Medzi týmito časticami môžeme nájsť röntgenové lúče, mióny, protóny, alfa častice, pióny, elektróny a neutróny. Typické častice produkované v takýchto zrážkach sú neutróny a nabitý mezón ako napríklad kladné či záporné pióny a kaóny. Niektoré z nich sa následne rozpadajú na mióny, ktoré už sú schopné dosiahnuť zemský povrch, či dokonca aj preniknúť do povrchových baní. Mióny môžeme ľahko detekovať mnohými typmi časticových detektorov, ako napríklad hmlovými komorami, bublinovými komorami, scintilačnými detektormi alebo ako v našom prípade iskrovou komorou.

1.3 Simulácia dopadajúcich miónov

Mióny majú strednú voľnú dráhu v atmosfére okolo 15 km [4], vďaka čomu ich môžeme merať aj na povrchu Zeme. Sú tiež najčastejšími nabitými časticami pozorovateľnými na úrovni morskej hladiny. Mióny strácajú interakciou s atmosférou asi 2 GeV a na povrch Zeme dopadajú so strednou energiou ≈ 4 GeV. Intenzita miónov dopadajúcich na povrch Zeme je $I \approx 70 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ [3], pričom majú uhlovú distribúciu úmernú $\propto \cos^2 \theta$, kde θ je uhol medzi dopadajúcou časticou a kolmicou na zemský povrch a ϕ je polárny uhol v rovine zemského povrchu. Počet miónov dopadajúcich na horný scintilátor o ploche S je tak daný vzťahom

$$\frac{dN}{dt} = IS \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta \cos^2 \theta \sin \theta = IS \cdot \frac{2\pi}{3}$$

Detekovať môžeme iba tie častice, ktoré prejdú oboma scintilátormi a spustia tak trigger. Je dôležité vedieť, akú časť zo všetkých častíc, ktoré dopadnú na vrchný scintilátor sme schopní aspoň teoreticky vidieť. Na určenie tejto efektivity sme využili Monte Carlo simuláciu. Táto simulácia vyberie náhodný bod na hornom scintilátore, kde dopadne častica. Ďalej tejto častici podľa uvedeného rozdelenia prideli smer kadiaľ bude pokračovať a potom určí, či častica zasiahne aj spodný scintilátor. Efektivitu tak môžeme pre tento prípad definovať ako pomer častíc, ktoré prejdú spodným scintilátorom ku všetkým, ktoré boli vygenerované. Vygenerovali sme $2,5 \cdot 10^7$ miónov dopadnutých na horný scintilátor a počítali sme, koľko z nich dopadne aj na spodný scintilátor.

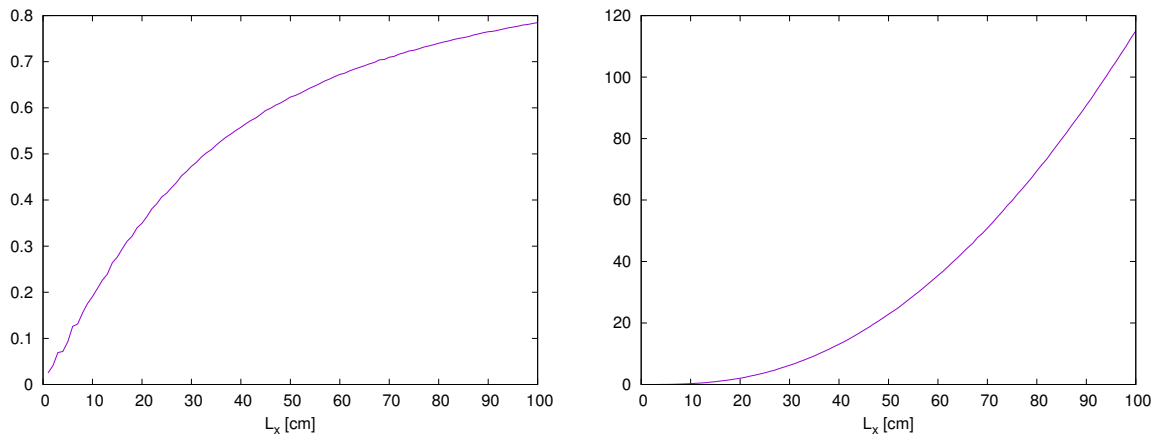
V prvom rade sme spočítali, aký tvar by mali mať dosky kondenzátorov, aby sme dosiahli maximálnu efektivitu. Do úvahy sme zobrali tri možnosti: štvorcové, okrúhle a tro-

juholníkové dosky o rovnakej ploche. Simulácia ukázala, že najväčšiu časť miónov dokážu zachytiť štvorcové dosky.

	$\triangle$	$\square$	$\bigcirc$
Efektivita	30,61%	35,30%	34,78%
Intenzita detekovaných častíc	1,79	2,07	2,04

Tab. 1.1: Efektivita a intezity dopadajúcich miónov pre rôzne tvary dosiek kondenzátorov.

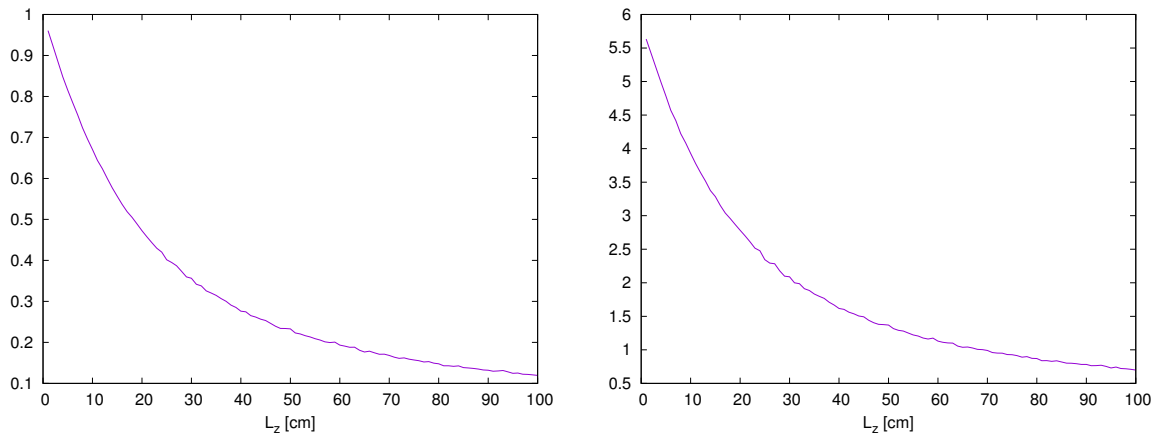
Keď už máme určený tvar kondenzátorových dosiek, potrebujeme určiť veľkosť dosiek a výšku komory. Simuláciu sme preto spustili znovu, tentokrát pre rôzne rozmery našej iskrovej komory. V prvom prípade sme zafixovali výšku komory a menili sme veľkosť dosiek kondenzátora. Vypočítali sme efektivitu komory a výslednú intenzitu nameraných miónov a vyniesli tieto hodnoty do grafu na obr. 1.2. Z obrázkov vidíme, že čím väčšie dosky máme, tým viac miónov môžeme zachytiť. Z väčšími doskami však prichádzajú aj ďalšie komplikácie, ako upevnenie dosiek, či ich celková váha.



Obr. 1.2: Závislosť efektivity (naľavo) a intenzity (napravo) detekovaných častíc pre rôzne rozmery $L_x = L_y$ dosiek kondenzátorov.

V druhom prípade sme zafixovali veľkosť dosiek a menili sme vzdialenosť medzi scintilátormi, teda výšku komory. Výsledky z tejto simulácie sú na grafoch na obr. 1.3. Tu zase vidíme, že čím bližšie sú scintilátory pri sebe, tým väčšie percento miónov dokážeme zachytiť. Je však zrejmé, že potrebujeme nejaký priestor, v ktorom budú dosky kondenzátorov a scintilátory preto nemôžu ležať na sebe.

Z týchto dôvodov sme zvolili parametre $L_x = L_y = 20$ cm a výšku komory $L_z = 30$ cm. Simulácia pre tieto hodnoty ukazuje, že naša komora bude schopná zachytiť 35,3% kozmických miónov, čo odpovedá intenzite 2,07 miónov za sekundu.



Obr. 1.3: Závislosť efektivity (naľavo) a intenzity (napravo) detekovaných častíc pre rôznu výšku L_z iskrovej komory.

1.4 Simulácia záchytu fotónov wavelength shiftermi

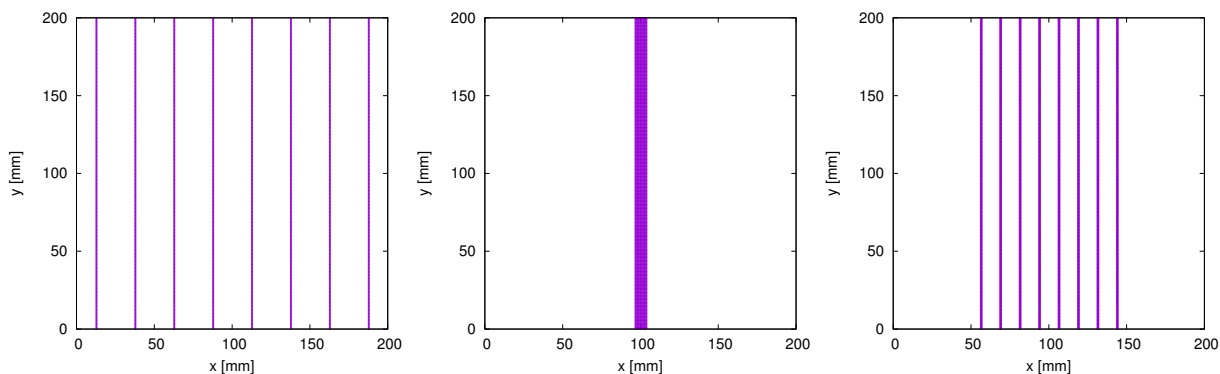
Keď kozmický mión preletí scintilátorom, vytvorí tak niekoľko fotónov, ktoré sa rozletia všetkými smermi. Keďže je scintilátor nepriehľadne uzavretý, fotóny sa budú odrážať až kým nenarazia na fotonásobič alebo na wavelength shifter. V takom prípade je fotón pohltý a my získame elektrický signál. Je tiež istá pravdepodobnosť, že bude fotón pohltý obalom scintilátoru, v takom prípade z tohto fotónu nezískame žiadnu informáciu. Keďže máme obmedzené množstvo wavelength shifterov, je dôležité vedieť, ako ich treba rozložiť na povrchu scintilátora, aby sme dokázali zachytiť čo najviac fotónov.

Pre účely simulácie sme uvažovali, že máme scintilátor v tvare kvádra o rozmeroch 20x20x2 cm. V náhodnom mieste sa vygeneruje 100 fotónov, ktoré letia náhodnými smermi. Efektivitu tentokrát definujeme ako počet fotónov, ktoré trafia niektorý z wavelength shifterov, k celkovému počtu. Tento proces opakujeme 1000-krát. Na začiatok sme uvažili 3 možné rozloženia (viď obr. 1.4):

1. rovnomerné rozdelenie shifterov po celej ploche scintilátora
2. všetky shiftery na jednej hromade v strede
3. rovnomerné rozdelenie v strednej časti scintilátora

Vo všetkých troch prípadoch sa jedná o rovnaké rozloženie na spodnej a vrchnej strane scintilátora. Simulácie ukázali, že efektivity jednotlivých rozdelení sú 1. 68,5%, 2. 62,1% a 3. 63,4%. Najviac sa nám teda oplatí rozmiestniť shiftery čo najviac rovnomerne.

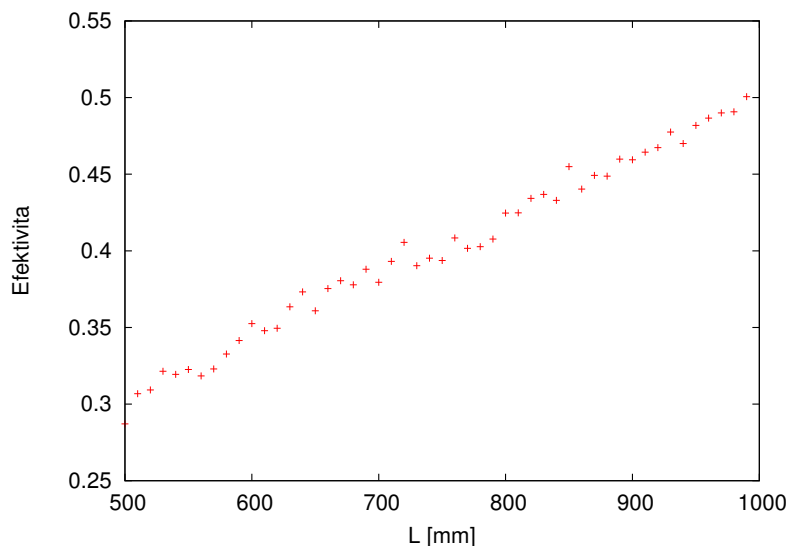
Takéto usporiadanie má však niekoľko nevýhod. Hlavnou nevýhodou je to, že shifter má dva konce z ktorých iba jeden pôjde do fotonásobiča, čím prichádzame o polovicu fotónov. Ďalšou nevýhodou je to, že takéto rozloženie ráta s niekoľkými kusmi shifterov, pričom každý z nich musí mať koniec až vo fotonásobiči. V priestore medzi scintilátorom a



Obr. 1.4: Uvažované rozloženia wavelength shifterov na stenách scintilátorov.

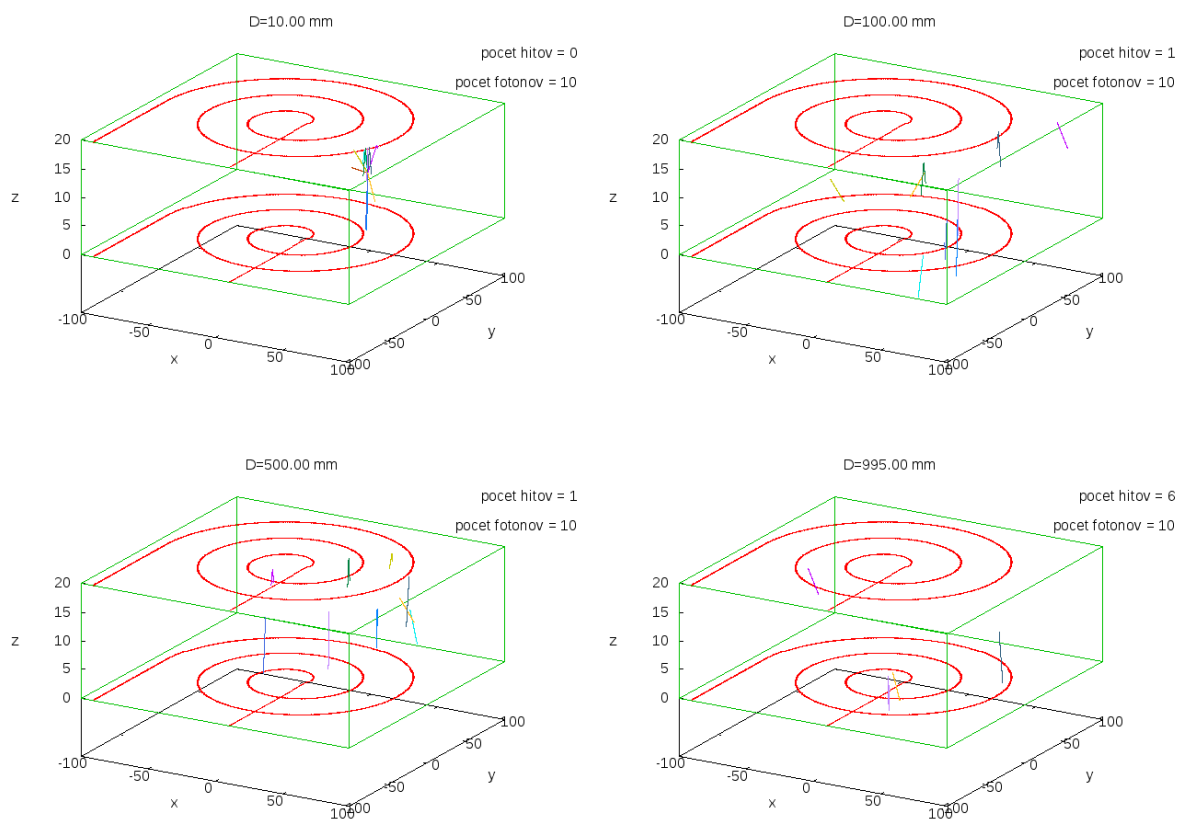
fotonásobičom tak bude mnoho shifterov, ktoré by pritom mohli zbierať fotóny na povrchu scintilátora.

Ďalšie uvažované usporiadanie je také, kde majú shiftery na vrchnej aj na spodnej strane scintilátora iba dva konce a oba mieriace do fotonásobiča. Medzitým vytvoríme zo shifterov špirálu. Efektivita takéhoto rozloženia závisí od dĺžky špirály (obr. 1.5). V každom prípade je toto číslo porovnateľné s rovnomerným rozdelením, no lepšie v tom, že nestratíme polovicu fotónov. Aj toto rozloženie má však nevýhodu, a to veľké zakryvenie shifterov, čo spôsobí, že fotóny nimi nebudu prechádzať s výraznými stratami.



Obr. 1.5: Závislosť efektivity záchytu fotónov wavelength shiftermi od ich dĺžky.

Túto simuláciu sme tiež vizualizovali a animovali, aby sme videli, ako sa fotóny v scintilátore správajú. Na obr. 1.6 je pár záberov z tejto animácie.



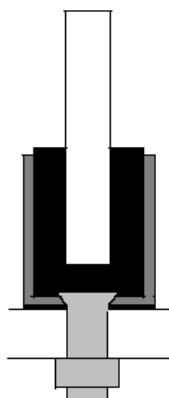
Obr. 1.6: Vizualizácia simulácie. Na obrázkoch vidíme fotóny po prejdení určitej vzdialenosti.

Kapitola 2

Konstrukce

2.1 Vnější konstrukce

V našem návrhu designu jiskrové komory jsme se rozhodli pro kvádrový tvar, jelikož se oproti jiným konceptům (viz [7]) jedná o relativně jednoduše zkonstruovatelný tvar vzhledem k našim technickým možnostem. Ten se používá nejčastěji pro komory s kontinuálním průtokem pracovního plynu. Lze však dosáhnout i fungování komory ve stavu, kdy je pracovní plyn načerpán a komora poté uzavřena. Tento koncept se po uvážení stal naším cílem (viz Kap. Pracovní plyn [5]).



Obr. 2.1: Nákres řešení spoje mezi boxem a podstavou komory, tzv. U-profil. Černou barvou je vyobrazeno těsnění, odstíny šedé lišta a šroub a bílou PMMA desky.

Materiálem tvořícím stěny komory je plexisklo (chemickým názvem polymethylmethakrylát - PMMA) o tloušťce 6 mm pro vrchní část a boční stěny a 10 mm pro základnu. Boční stěny a vrchní díl jsou slepeny dvousložkovým lepidlem na plexisklo ACRIFIX. Rozměry komory jsou 400 x 300 x 250 mm. Do komory jsou v horizontálním středu protilehlých

bočních stěn ve výšce 44 mm a 208 mm od základny navrtány 2 díry o průměru 12 mm pro přívod a odvod plynu. Do nich jsou vloženy vakuové příruby s fixním těsněním, na něž se napojuje hadice pro přívod a odvod plynu. Základnu komory tvoří již zmíněná 10 mm tlustá PMMA deska, k níž je komora upevněna pomocí tzv. U-profilu, jehož podoba je k vidění na Obr. 2.1. Jedná se o 20 mm vysokou, 20 mm širokou a 2 mm tlustou hliníkovou lištu vyplněnou průmyslovým těsněním z neporézní gumy, typ 0535 067 [8], o výšce 19,8 mm, šířce 16 mm a tloušťce 5 mm. Lišta je pak závitnicovými šrouby se zapuštěnou hlavou o průměru 6 mm a 4 mm upevněna k základně komory. Mezi základnou a komorou je pro lepší utěsnění umístěn tenký gumový pás, který je napevno přilepem k liště pomocí vteřinového lepidla. Do výsledného profilu je celý box zasazen. Oproti původnímu návrhu [6] není v naší finální podobě U-profil upevněn šrouby k bočním stěnám, jelikož se přilnavost gumy ukázala být dostačující pro utěsnění komory. Experimentálně zjištěné netěsnosti bočních stěn byly vyplněny vteřinovým lepidlem.

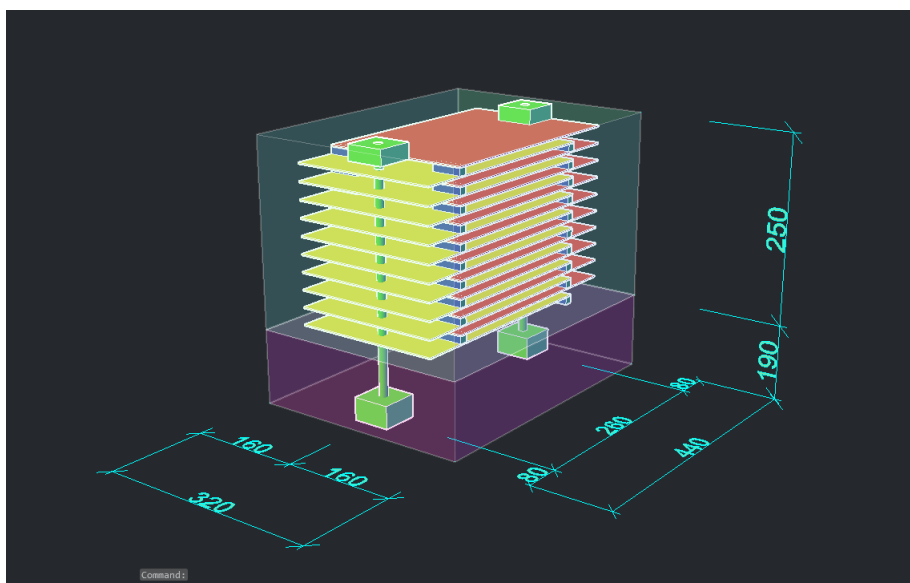


Obr. 2.2: Finální podoba vnější a vnitřní konstrukce jiskrové komory.

Do spodní desky jsou dále navrtány 2 otvory, kterými jsou ven z komory vedeny tyče nesoucí elektrody. Toto řešení slouží společně s úchyty uvnitř boxu jako stabilizace celého systému elektrod. K základně komory jsou pomocí L-profilů po stranách připevněny 2 PMMA desky. Ty jsou dále stejným způsobem upevněny k podstavě tvořené dřevěnou deskou. Na této desce jsou dále umístěny válcové základny z PMMA, do nichž jsou zapuštěny konce nosných tyčí vycházejících z komory. Společně tak tyto součásti tvoří nosný systém, díky němuž je box libovolně přemístitelný. Mezi základnou komory a spodní dřevěnou podstavou je vytvořen prostor pro umístění scintilátorů s wavelength shiftery a další elektroniku. Přívod napětí na elektrody je plánován z vnějšku na nosné tyče.

3D model komory společně s vnitřní konstrukcí elektrod můžeme vidět na Obr. 2.3. Na Obr. 2.2 můžeme dále vidět celou konstrukci ve finální podobě.

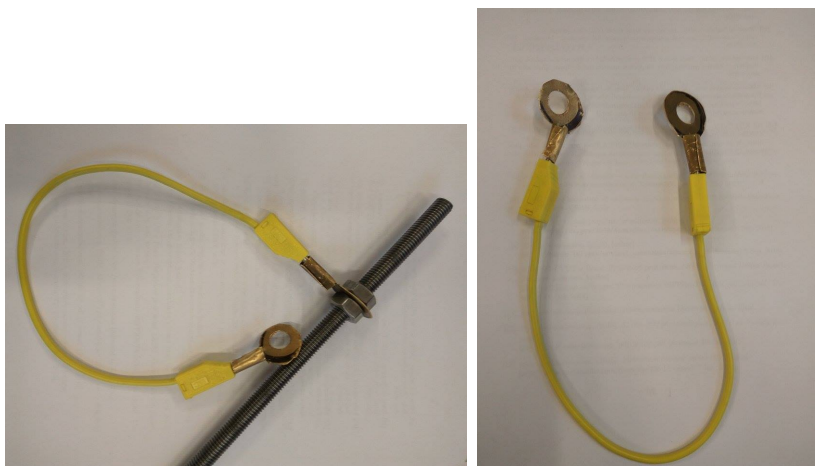
2.2 Vnitřní konstrukce



Obr. 2.3: Nákres vnitřní konstrukce včetně rozměrů.

Vnitřní konstrukce jiskrové komory se skládá ze 17 cuprexitových desek, dvou závitnicových tyčí, 34 železných matek a dvou měděných kroužků s nástavci pro upevnění kabelů s banánky, které přivádějí na tyče napětí.

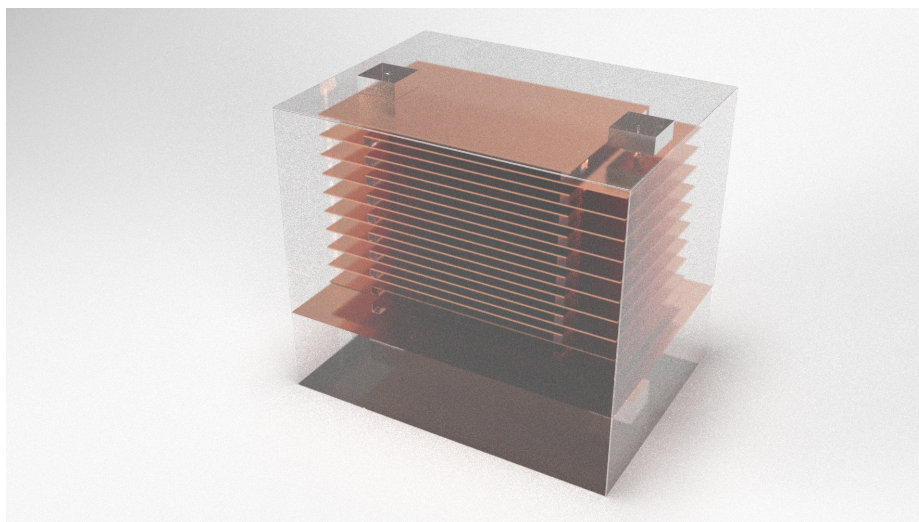
Cuprexitové desky o velikosti $300 \times 200 \times 1,5$ mm jsou vyrobeny z laminátu ze skelné tkaniny, který je sycený epoxidovou pryskyřicí. Tento laminát je z obou stran pokryt měděnou folií o tloušťce $35 \mu\text{m}$. Do desek je vyvrtán otvor o průměru 10 mm ve vzdálenosti 9 cm od delšího okraje a 3 cm od kratšího okraje.



Obr. 2.4: Upevnění kabelů s banánky pomocí kroužků

Desky jsou střídavě upevněny na dvou železných tyčích o průměru 10 mm (M10) pomocí železných matek. Na každou z tyčí je připevněn měděný kroužek s nástavcem (obdobným způsobem jako desky, sevřen matkami na tyči, viz Obr. 2.4). Do nástavce lze připojit kabel s banánkem na konci. Tímto sestavením docílíme opačné polarity desek, přičemž 9 desek má kladnou polaritu a 8 desek polaritu zápornou. Při této konfiguraci se vytvoří homogenní elektrické pole zajišťující dostatečnou energii pro vznik výboje, v případě, že plynem mezi deskami proletěla ionizující částice.

Avšak je nevhodné, aby desky probíjely samovolně, bez přítomnosti vzniklých iontů. Z tohoto důvodu jsou hrany každé z desek oblepeny samovulkanizační izolační páskou EMOS SELF-FUSING TAPE o šířce 3,5 cm a tloušťce 75 mm a s dielektrickou pevností 12 kV/mm (pro tloušťku této pásky je pevnost tedy 9 kV). Aby během činnosti komory



Obr. 2.5: Upevnění tyčí k vnější konstrukci .

nedocházelo k průhybu desek, jsou mezi nimi umístěny kvádříky z pryže, které zajišťují konstantní vzdálenost. Aby se zamezilo probíjení skrz pryž, je mezi kvádříky a deskami umístěna izolační páska.

Tyče jsou upevněny k vnější konstrukci pomocí plexisklových válců s námi navrtanými závity pro lepší stabilitu vnitřní konstrukce. Tyto válce jsou přilepeny ke spodní podstavě spodního boxu, dále prochází stěnou mezi boxy, ve které je vyvrtán závit. Polohy horních konců tyčí jsou zafixovány pomocí plexisklových kvádříků s vyvrtanými otvory, které jsou přilepeny k víku horního boxu (viz Obr. 2.5). Tyče jsou v tomto případě pouze zasouvány, a to z důvodu možného otevírání celého horního boxu.

Výsledná konstrukce vnitřní komory je na Obr. 2.6.



Obr. 2.6: Výsledná konstrukce vnitřní komory.

Kapitola 3

Plyn a plnění

Velmi důležitou etapou při konstrukci jiskrové komory je správný výběr plnicího plynu a způsobu plnění. V případě jiskrové komory jsou obvykle upřednostňovány vzácné plyny, především helium (He), neon (Ne) a argon (Ar) [10]. Tyto detektory jsou obvykle provozovány přibližně za atmosferického tlaku, je ovšem velmi důležité rozhodnout, zda budeme pracovat s tlakem přesně rovným atmosferickému, nebo s (mírným) podtlakem resp. přetlakem, což bude rozvedeno dále v této kapitole. Taktéž bude představen způsob, jakým jsme komoru plynem plnili.

3.1 Průrazné napětí plynu

Obecně lze průrazné napětí definovat jako minimální napětí, pod kterým izolant ztrácí své izolační vlastnosti a stává se vodivým. Mějme nyní dvě elektrody (katodu a anodu) a mezi nimi plyn. Takto máme dobře aproximován vnitřek jiskrové komory. Při průletu nabitě částice tato interaguje s atomy plynu a dochází k disociaci, tedy k rozdělení (do té doby) neutrálních atomů plynu na elektrony a kladně nabitě částice (kationty). Je-li na elektrody přivedeno vysoké napětí, pak se kladně resp. záporně nabitě částice pohybují (driftují) k opačně nabitě elektrodě. Vzniknuvší elektrony se opět srážejí s částicemi plynu a dochází k tzv. lavinám [10].

Dále v plynu dochází k rekombinaci, kdy kationty a elektrony opět vytvářejí neutrální atomy. V takovém případě ovšem dochází k emisi fotonů, v důsledku čehož vznikají další páry kationt-elektron. V případě, že máme dostatečné množství lavin, dojde v celém systému k průchodu elektrického proudu. Jak již bylo zmíněno, napětí, pod kterým lze tohoto dosáhnout, se nazývá *průrazné napětí (breakdown voltage)*.

Helium, neon a argon jsou jako plnicí plyny používány nejčastěji. Je to z toho důvodu, že mají nízkou elektronovou afinitu a vysoký první Townsendův koeficient [10]. Takové prvky tedy nebudou stát v cestě vzniku lavin (např. v důsledku rekombinace či zachycení elektronů prvky s vysokou elektronovou afinitou) [10]. Účinnost komory je tedy snížena, je-li v plynu obsažena příměs prvku s vysokou elektronovou afinitou, např. *kyslíku* případně *vzduchu*.

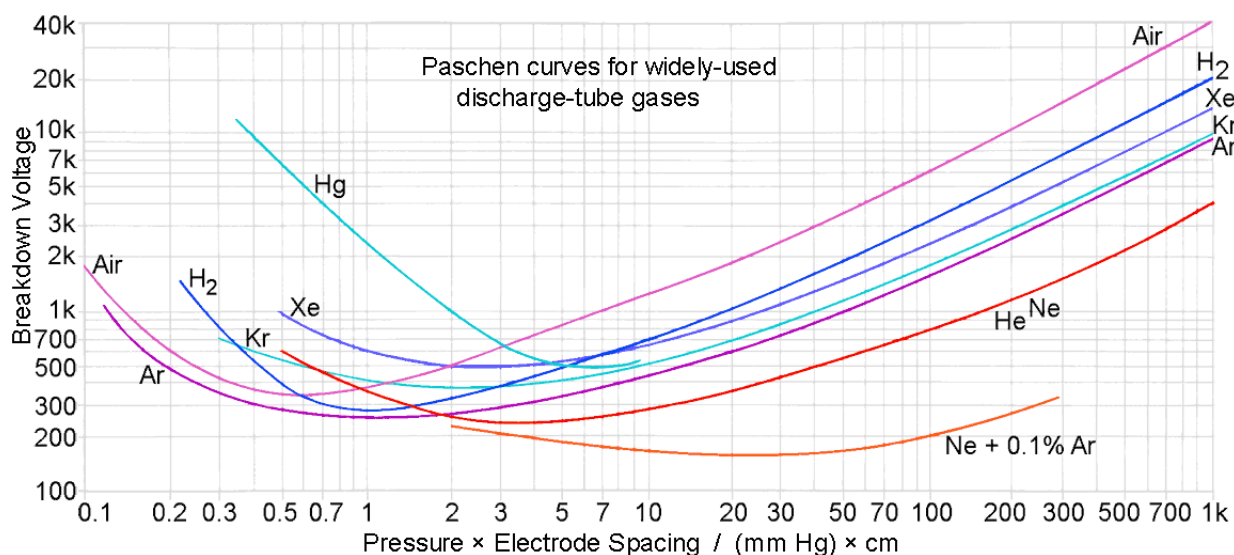
3.1.1 Paschenův zákon

Závislost napětí V na tlaku p (v Pascalech) a vzdálenosti mezi elektrodami d (v metrech) lze vyjádřit vztahem

$$V = \frac{Bpd}{\ln(Apd) - \ln\left(\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right)} \quad (3.1)$$

kde A , B jsou konstanty závislé na druhu použitého plynu za předpokladu konstantního poměru E/p , kde E je intenzita elektrického pole, a γ je koeficient sekundární emise elektronů.

Vztah (3.1) ovšem vyjadřuje pouze horní odhad hodnoty napětí. Aby nedošlo ke spontánnímu průchodu elektrického proudu, je třeba napětí udržovat lehce pod touto hladinou [10]. Lehce proto, aby stále bylo možno vycházet z platnosti Paschenova zákona (3.1), jehož grafické vyjádření vidíme na následujícím obrázku:



Obr. 3.1: Paschenův zákon pro různé plyny. Převzato z [9].

Na obrázku vidíme závislost průrazného napětí různých plynů na součinu tlaku v torrech (milimetrech rtuťového sloupce) a vzdálenosti elektrod v centimetrech. Z toho vyplývá, že předpokládáme-li vzdálenost elektrod rovnou $d = 1$ cm, je veličina vynesená na horizontální ose číselně rovna hodnotě tlaku v torrech. Vzhledem k platnosti vztahu $1 \text{ atm} = 760 \text{ torr}$ lze hodnotu průrazného napětí za normálního atmosferického tlaku (a za předpokladu $d = 1$ cm) odečítat na hodnotě 760 na vodorovné ose. Vidíme tedy, že pro vzduch je hodnota průrazného napětí za normálního tlaku přibližně 30 kV/cm. Pro argon lze odečíst hodnotu přibližně 8 kV/cm, pro helium a neon přibližně 2,5 kV/cm.

3.2 Výběr plnicího plynu

Z grafu na Obrázku 3.1 rovněž vidíme, že nejmenšího průrazného napětí dosáhneme, budeme-li operovat za podtlaku. Vůbec nejlepších výsledků dosáhneme pro směs neonu a argonu (v poměru 99,9 % neonu a 0,1 % argonu). Tato směs je ale jedna z nejdražších, jaké na trhu můžeme získat.

Ačkoliv by čistě z pohledu na Obrázek 3.1 vyplývalo, že budeme jednoznačně pracovat s podtlakem, my jsme se přesto rozhodli pro mírný (maximálně 10%) přetlak, čímž sice bude potřeba zapojit větší napětí, ale minimalizuje se tak riziko samovolného znečištění vzduchem v důsledku netěsností. Z tohoto důvodu a také z důvodu velmi příznivé ceny jsme se rozhodli použít jako plnicí plyn argon Ar 4.6 (argon s čistotou 99,996 %). Ve srovnání se vzduchem bude napětí, které bude nutno na elektrody přivést, stále poměrně malé.

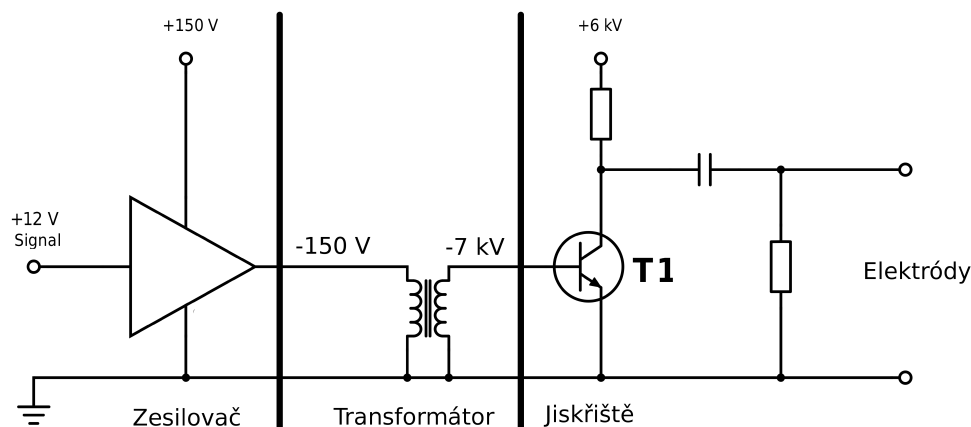
3.3 Způsob plnění

Abychom minimalizovali kontaminaci komory vzduchem, utěsnili jsme spoje přípravkem na bázi molybdenedisulfidu. Ze stejného důvodu jsme se rozhodli i pro provoz při (maximálně 10%) přetlaku. Použili jsme gumové trubky o vnějším průměru 12 mm (koresponduje s průměrem vyvrtaných děr v plexiskle) a vnitřním průměru (tzv. světlosti) 8-10 mm. Vzhledem k předpokládanému vysokému tlaku v dodaných bombách s plynem (řádově 100 bar) jsme toto považovali za dostačující k rychlému napuštění komory plynem. Odvod plynu byl vyřešen pomocí vývěvy.

Gumové trubky jsme upevnili tak, že jsme je přímo nasadili na zakoupené olivky, což se ukázalo jako dostačující na to, aby nedocházelo k pozorovatelným únikům. Vzájemné propojení trubek jsme izolovali tak, že jsme závity omotali teflonovou páskou, která se velmi dobře přizpůsobuje tvaru, a tedy nebrání v našroubování závitu. Případné netěsnosti jsme vyhledávali tak, že jsme na všechny spoje nanесли trochu mýdlové vody a zjistili, kde se tvoří vzduchové bublinky. Na jednom místě jsme též trubky vsunuli přímo do sebe. K únikům v tomto místě však nedocházelo, což jsme ověřili užitím mýdlové vody.

Změny tlaku byly sledovány manometrem. Jsou dvě možnosti, jak manometr upevnit. Buď jej dáme přímo dovnitř, nebo jej upevníme ke konstrukci zvenku. I když bychom v případě první možnosti získali přesnější údaje, přiklonili jsme se k druhé variantě, neboť ta umožňuje kontrolovat tlak stále, nikoliv jednorázově. Toto je v souladu s předpokladem vysloveným v Conceptual Design Report ze zimního semestru AR 2016-2017. Náhled celé konstrukce je vidět na obrázku AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA LUKÁŠI DOPLŇ PROSÍM ODKAZ NA OBRÁZEK 2.2

Prvotním plánem bylo komoru nejprve několikrát propláchnout dusíkem a následně argonem, dokud množství kyslíku neklesne na hodnotu v řádu setin, maximálně desetín procenta, což jsme chtěli změřit oxymetrem. Průplach měl být proveden 3x - 4x dusíkem a poté 2x - 3x argonem a až poté bychom komoru naplnili argonem pro účely měření. Pod pojmem průplach rozumíme přívod plynu přímo z dodané bomby s plynem otvorem v konstrukci jiskrové komory pomocí přívodní gumové trubky a následný odvod plynu druhým otvo-



Obr. 3.2: Schématické znázornění zpracování triggrovacího signálu. Na levou elektródu přichází triggrovací signál který je zesílen pomocí zesilovače na přibližně 150 V a následně transformován v druhé části na vysoké napětí přibližně 7 kV. Tento vysokonapěťový signál je přiveden na jiskřiště které nabíjí desky jiskrové komory.

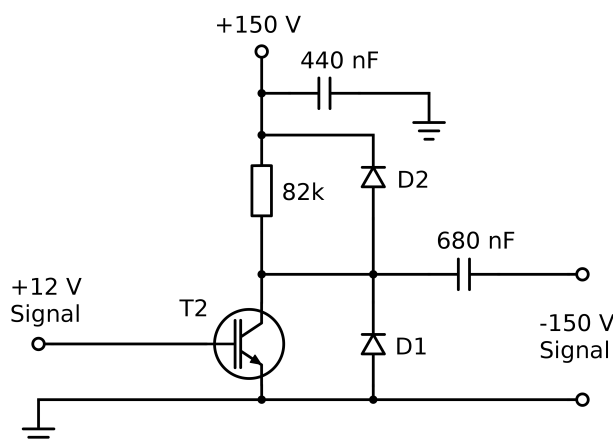
rem v konstrukci pomocí vývěvy. Proplachování jsme zahájili, ovšem po druhém průplachu dusíkem jsme se rozhodli další postup přerušit, neboť došlo k odchlípnutí gumové izolace způsobeném přetlakem v komoře. Další pokusy jsou v současné době odloženy na neurčito.

3.4 Napájení jiskrové komory

Napájení jiskrové komory je zajištěno pomocí napájecího obvodu který zpracovává triggrovací signál a nabíjí desky jiskrové komory. Napájecí obvod pracuje s obdélníkovým triggrovacím signálem s napětím 12 V které dodává triggrovací obvod. Obvod na zpracování triggrovacího signálu byl sestaven na základě [12]. Triggrovací signál je nejdříve zesílen na přibližně 150 V zesilovačem a následně je transformován pomocí rychlého transformátoru na vysoké napětí na přibližně 7 kV. Vzniklý vysokonapěťový triggrovací signál potom pomocí jiskřiště nabíjí desky jiskrové komory z externího zdroje vysokého napětí. Schématické znázornění zpracování triggrovacího signálu je znázorněno na Obrázku. 3.2.

3.4.1 Zesilovač

První částí zesilovací kaskády je lineární zesilovač znázorněný na Obrázku 3.3. Na zesílení je využitý externí zdroj 150 V, který taktéž napájí lavinovou fotodiodu využitou v triggrovacím systému. Vstupní +12 V signál je přiveden na bázi tranzistoru, který po příchozím signálu vybije kondenzátor přes zem a vytvoří záporný obdélníkový signál s napětím -150 V. Jako tranzistor byl zvolen IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*,) tranzistor tedy bipolární tranzistor s izolovanou bází. Tento tranzistor byl zvolen kvůli



Obr. 3.3: Schématické zapojení zesilovače triggrovacího signálu.

vysokému spínanému proudu které je nutné pro napájení transformátoru, který následuje v zesilovací kaskádě. Kondenzátor s kapacitou 440 nF je zapojen paralelně k externímu zdroji z důvodu filtrace náhlých špiček vysokého napětí. Diody *D1* a *D2* napomáhají správnému a rychlému vybíjení elektrod tranzistoru a zvyšují tak jeho rychlost. Zkonstruovaný zesilovací obvod na plošném spoji je na Obrázku 3.4.

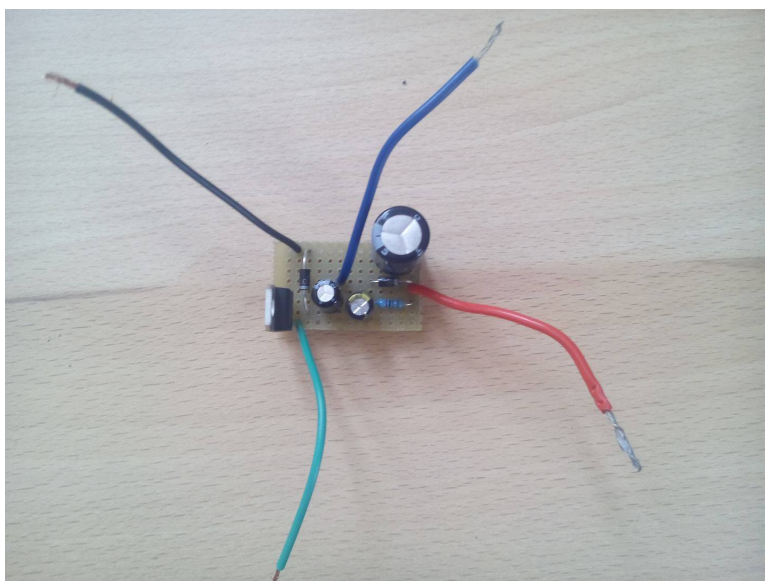
3.4.2 Transformátor

Další součástí je vysokonapěťový transformátor. Jedná se o transformátor s feritovým jádrem kde se primární vynutí skládá z osmi závitů drátu s průměrem 0,9 mm. Sekundární vynutí bylo realizováno v sedmi vrstvách po 53 závitech z drátu s průměrem 0,18 mm. Každá vrstva sekundárního vynutí byl izolován kaptonovou páskou s vysokou průrazností z důvodu zabránění vnitřních výbojů mezi vrstvami.

Tento krok v zesilovací kaskádě vytvoří obdélníkový signál s napětím -7 kV. Feritové jádro transformátoru podle [12] zajistí náběh vysokého triggrovacího napětí za přibližně 700 ns od příchodu 12 V triggrovacího signálu. Finální podoba transformátoru je vyobrazená na Obrázku 3.5. K testování vlastností zesíleného signálu nedošlo z časových důvodů.

3.4.3 Jiskřiště

Poslední částí obvodu je jiskřiště které provádí samotné nabíjení desek jiskrové komory pomocí externího zdroje s napětím 6 kV. Na Obrázku 3.2 je označen *T1*. Jedná se o tři zapalovací automobilové svíčky. Dvě svíčky s externím napětím $+6$ kV a zemí jsou v dostatečné vzdálenosti aby neprobíhal výboj. Přicházející -7 kV triggrovací signál z transformátoru je přiveden na třetí svíčku která je umístěná mezi první dvě. Triggrovací signál způsobí výboj, který ionizuje vzduch mezi svíčkami a umožní vybití kondenzátoru



Obr. 3.4: Foto zkonstruovaného zesilovače.



Obr. 3.5: Sestrojený transformátor triggrového signálu.



Obr. 3.6: Sestrojené jiskřiště. Jako elektrody slouží střední terminály zapalovacích svíček a jeden vnější terminál svíčky.

do země, což způsobí pokles napětí o 6 kV a nabije tak desky jiskrové komory. Jiskřiště ze zapalovacích svíček je znázorněno na Obrázku 3.6. Konfigurace svíček na Obrázku 3.6 je pouze orientační. Přesné nastavení vzdáleností svíček se by se upřesnily operativně podle konkrétní hodnoty použitého napětí.

Kapitola 4

Trigger a scintilátory

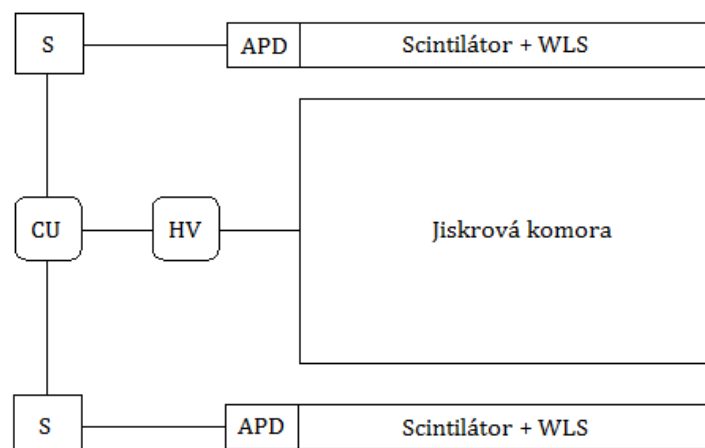
4.1 Trigger

Jiskrová komora je zařízení sloužící k vizualizaci trajektorií nabitých částic, které procházejí jejím aktivním objemem. V našem případě má detektor úlohu zviditelnit miony z kosmického záření. Přestože na plochu 20 cm x 20 cm, která přibližně odpovídá velikosti použitého vrchního scintilátoru, dopadá ≈ 6 mionů za sekundu, detekovaných částic komorou bude podstatně méně, jelikož nás zajímají pouze události, kdy částice procházejí celým objemem detektoru. Trigger je konstruován tak, aby zaregistroval částice procházející vrchní a spodní částí komory a v případě koincidence signálu z obou úseků vyslal pokyn k přivedení vysokého napětí na elektrody.

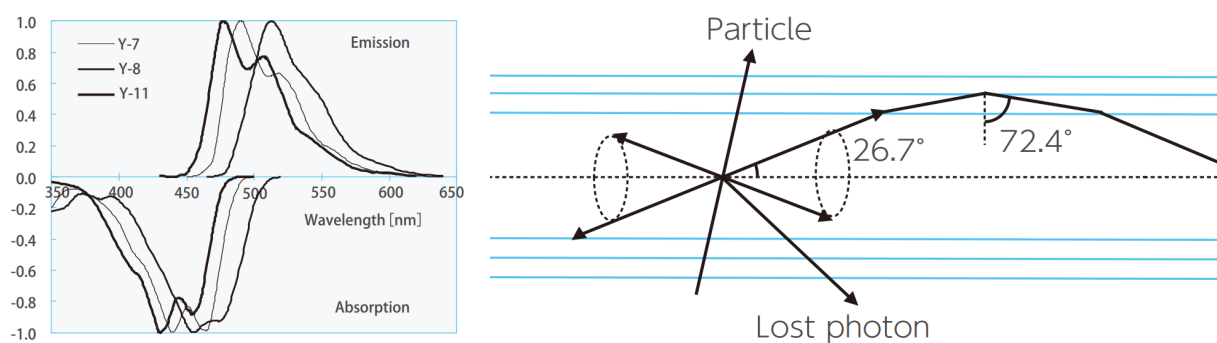
Hrubé schéma návrhu triggeru je ilustrováno na Obrázku 4.1. Obvod se skládá ze dvou scintilátorů umístěných nad a pod komorou, na které jsou připevněny měniče vlnové délky ("WLS"). Projde-li nabitá částice scintilátorem, je vytvořen slabý světelný signál. Vytvořené světlo je ze scintilátoru sesbíráno pomocí WLS vláken a dopadá na lavinové fotodiody ("APD") umístěné na konci vláken. Signál vytvořený APD je dále potřeba upravit do podoby vhodné pro přivedení do koincidenční jednotky. Do koincidenční jednotky jsou tedy přivedeny dva nezávislé signály z obou scintilátorů. V případě časové shody obou signálů vyšle koincidenční jednotka impuls k přivedení vysokého napětí na jednotlivé elektrody jiskrové komory. V následujících odstavcích jsou detailněji popsány jednotlivé části obvodu triggeru.

4.2 Scintilátory a sběr světla

Fotony vyzářené v scintilátorech po průchodu ionizující částice jsou sebrány pro další výčet měniči vlnové délky (WLS vlákna). WLS vlákna jsou speciální optická vlákna, která jsou na povrchu pokryta aktivním materiálem. V této vrstvě se fotony absorbují a znovu se, s vyšší vlnovou délkou, izotropně vyzáří. část těchto fotonů je pak vedena díky totálnímu vnitřnímu odrazu po délce vlákna k dalšímu zpracování. Použita jsou zelená WLS vlákna typu Y-11(200)M od společnosti Kuraray [13], jejich charakteristické



Obr. 4.1: Schéma zapojení obvodu triggeru.

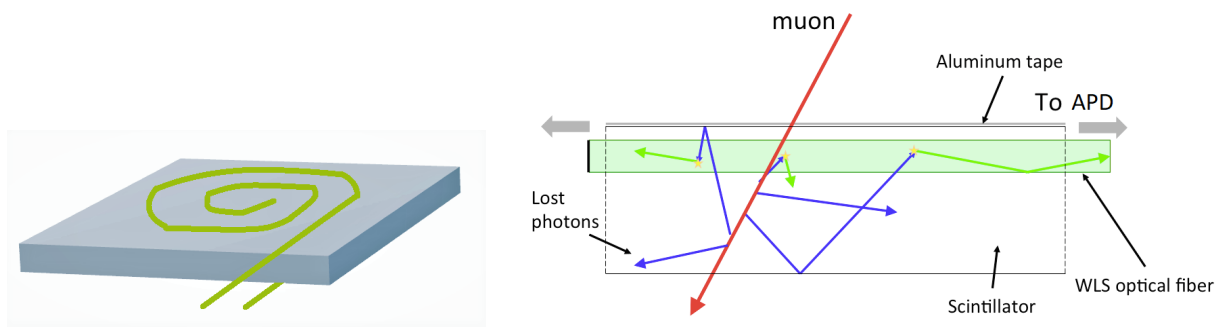


Obr. 4.2: (vlevo) Emisní a absorpční spektrum WLS vlákna; (vpravo) podélný průřez s vyobrazením průchodu částic vláken. [13]

vlastnosti jsou popsány v Tab. 4.1 a Obr. 4.2.

Vlákna jsou přilepena na povrch scintilátoru ve spirálovitém vzoru, přičemž jeden konec vlákna je zaslepen odraznou fólií a druhý je vyveden ven a ústí v APD. Toto je provedeno na obou stranách cihly scintilátoru. Bylo použito lepidlo LOCTITE 3494 [14]. Je to průhledné konstrukční lepidlo, které vytvrzuje při osvětlení ultrafialovým zářením. Toto lepidlo bylo vybráno, protože má optické vlastnosti podobné vlastnostem scintilátoru a dobré adhezí vlastnosti. Index lomu vytvrzeného lepidla je 1.5 a index lomu scintilátoru je 1.57. Pro navýšení účinnosti přechodu fotonů jsou vlákna rovněž pokryta silikonovým optickým gelem. Geometrie umístění vláken a mechanismus sběru fotonů lze vidět na Obr. 4.3.

Abychom minimalizovali počet uniklých fotonů, pokryli jsme scintilátor po celém jeho povrchu hliníkovou fólií. Scintilátor je také zcela oblepen plně neprůhlednou černou páskou, pro dokonalou optickou izolaci.



Obr. 4.3: (vlevo) Geometrie umístění WLS vláken; (vpravo) ilustrace použité metody na sběr fotonů.

typ	em. peak [nm]	ab. peak [nm]	d [mm]	n [-]	ϵ [%]
<i>Y-11(200)M</i>	476	430	1,0	1,59	5.4

Tab. 4.1: Základní vlastnosti WLS vláken: pozice peaků absorpčního a emisního spektra, průřez, index lomu jádra a účinnost absorpce fotonů. [13]

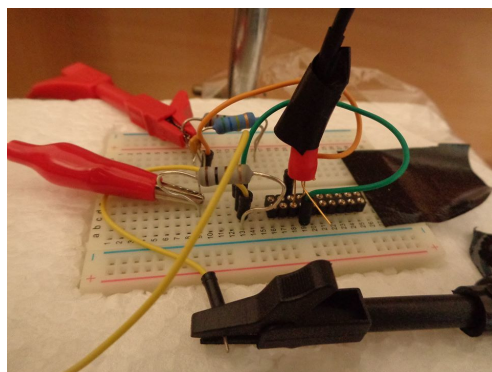
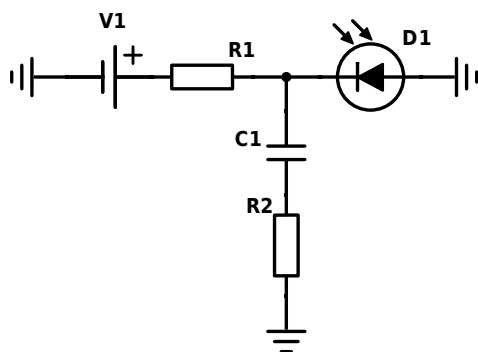
4.3 Zapojení APD

Pro zpracování světelného signálu z WLS byly použity dvě lavinové fotodiody (APD) Hamamatsu Si S5453, jejichž základní vlastnosti jsou uvedeny v Tabulce 4.2. Hlavní výhody užití APD oproti fotonásobičům jsou menší operační napětí (≈ 150 V), menší velikost a celkově lepší manipulace.

Diody byly zapojeny podle schématu na Obrázku 4.4. Aby nastal jev laviny, k APD je připojeno napětí V_1 těsně nad 150 V v závěrném směru. R_1 a R_2 odpory mají $\approx 1,8$ M Ω resp. 100 Ω a C_1 kondenzátor má ≈ 5 pF. V okamžiku, kdy foton dopadne na citlivou plochu APD, dojde k vytvoření a multiplikaci náboje, odpor diody prudce klesne a vznikne proudový impuls. Kvůli tomu, že $R_1 \gg R_2$ většina pulsu je odvedena přes R_2 linku, což je detekováno jako pokles napětí na rezistoru R_2 . Zachycený pokles napětí je zaznamenán na Obrázku 4.5. Protože R_1 se nyní stává hlavním odporem v obvodu, napětí na APD klesne a amplifikace náboje je ukončena.

citlivá plocha	0.78 mm ²
pík sensitivity	650 nm at 25°C
kvantová účinnost	80%
multiplikace	50x
závěrné napětí	150 V

Tab. 4.2: Vlastnosti Si APD Hamamatsu S5453 [2].



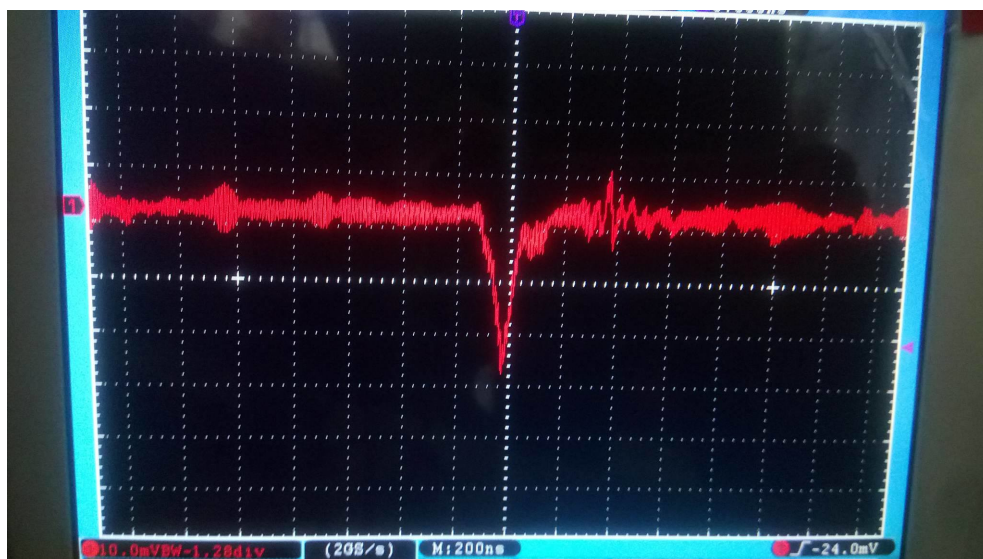
Obr. 4.4: Vlevo: APD schéma zapojení: V1 je závěrné napětí, D1 představuje APD, R1, R2 a C1 jsou rezistory resp. kondenzátor. Vpravo: Obrázek zapojení APD s WLS kabelem připojeným k hlavičce APD.

4.4 Zpracování signálu

Šum APD a dalších elektronických součástek způsobuje, že z APD často přicházejí falešné signály. Kromě šumu mohou falešné signály vyvolat také jiné částice dopadající na scintilátory, např. elektrony. Abychom zachytili pouze relevantní události, používáme koincidenční jednotku se dvěma vstupy, která kvadraticky snižuje pravděpodobnost detekce falešných událostí.

Použitá koincidenční jednotka používá integrovaný obvod AND a přijímá dva obdélníkové 5 V pulsy. V případě koincidence pulsů v adekvátním časovém rámci je vyslán 5 V obdélníkový puls se spožděním 20 ns. Signál z APD znázorněný na Obrázku 4.5 je tedy potřeba převést na kladný obdélníkový puls.

Signál je nejdříve 10x amplifikován zesilovačem, který je napájen 12 V zdrojem, a poté prochází invertorem napětí, který jej převede na kladný signál. Nakonec je signál ořezán na obdélníkový puls s ostrou hranou. Koncový obdélníkový puls je zobrazen na Obrázku 4.6. Tento signál dále spouští přívod vysokého napětí, které je potřebné ke vzniku jiskry. Koincidenční signál však zatím nebyl změřen.



Obr. 4.5: Zaznamenaný signál z WLS pomocí APD ve formě napěťového poklesu na rezistoru R2.



Obr. 4.6: Vytvoření obdélníkového pulsu.

Literatura

- [1] Knuth: Computers and Typesetting, [online][20.09.2017]
Dostupné na: <http://www.hep.phy.cam.ac.uk/~lester/teaching/SparkChamber/NIKHEF/eppog.web.cern.ch/eppog/Resources/SparkChamber.html>
- [2] Harvard Natural Sciences Lecture Demonstrations: Cosmic Ray Spark Chamber, [online][20.09.2017]
Dostupné na: <https://sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/presentations/cosmic-ray-spark-chamber>
- [3] K. A. Olive et al., Review of Particle Physics – Cosmic Rays, Chin. Phys. C, 38, 090001, (2014) and 2015 update
- [4] The Compact Cosmic Ray Telescope aboard the Kuiper Airborne Observatory, [online][20.09.2017]
Dostupné na: <http://cosmic.lbl.gov/SKliewer/Index.htm>
- [5] Polzin E. and Murphy S., Building a Spark Chamber, University of Manchester, 2013.
- [6] PPRA Collaboration, Technical Design Report - Spark Chamber, CTU FNSPE, 2016.
- [7] Kolaborace PPRA, Conceptual Design Report - Jiskrová komora, ČVUT FJFI, 2017.
- [8] Katalog GUMEX 2017,[online][01.09.2017] Dostupné na:
<https://view.publitas.com/gumex/katalog-2016-cz-na-web/page/1>
- [9] D. W. Knight, Gas Discharge Tubes - Introduction, (2013),
http://www.g3ynh.info/disch_tube/intro.html
- [10] J. Collins, Construction of a Prototype Spark Chamber, (2010), arXiv:1010.4010
- [11] Wikipedia, Paschen's Law,[online][01.09.2017]
Dostupné na: https://en.wikipedia.org/wiki/Paschen's_law
- [12] P. de Grouchy, Construction and Evaluation of a Fast Switching Trigger Circuit for a Cosmic Ray Detection Spark Chamber, (2009)

- [13] Plastic Scintillating Fibers. *Kuraray* [online][01.09.2017]
Dostupné na: <http://kuraraypsf.jp/pdf/all.pdf>
- [14] Loctite 3494—technický list. *Loctite* [online][01.09.2017]
Dostupné na:
<https://proprumysl.cz/soubory/236/Loctite-3494-technicky-list.PDF>
- [15] S5343 Datasheet. *Hamamatsu Corporation* [online][01.09.2017]
Dostupné na: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/212375/\HAMAMATSU/S5343.html>