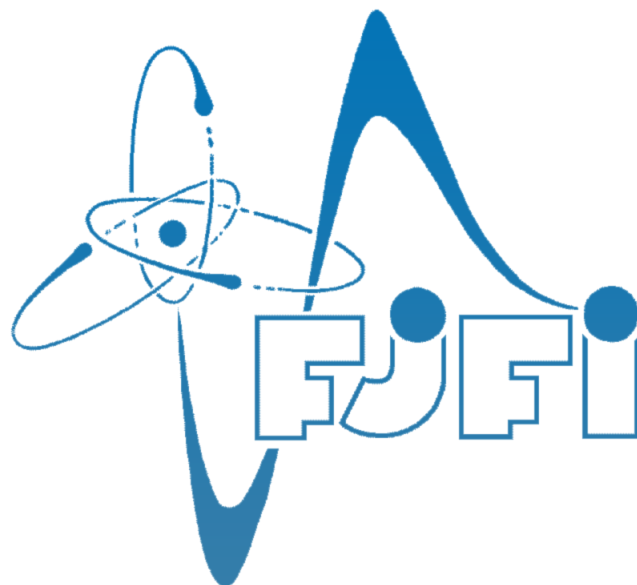


České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská



## Conceptual Design Report

Jiskrová komora

**PPRA kolaborace**  
Praha, 2016/2017

# 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 Uchytíl

## **Napájení**

Peter Příbeli

Vladimír Žitka

## **Trigger a scintilátory**

Elisabeth Andriantsarazo

Alena Bakalová

Vendulka Fílová

Oliver Matonoha

Šimon Novák

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Teorie a simulace</b>	<b>2</b>
1.1 Kozmické žiarenie . . . . .	2
1.1.1 Primárne kozmické žiarenie . . . . .	2
1.1.2 Sekundárne kozmické žiarenie . . . . .	2
1.2 Simulácia dopadajúcich miónov . . . . .	3
1.3 Tlak v nádobe . . . . .	3
<b>2 Kontrukce</b>	<b>5</b>
2.1 Vnější konstrukce . . . . .	5
2.2 Vnitřní konstrukce . . . . .	7
<b>3 Plyn a plnění</b>	<b>10</b>
3.1 Průrazné napětí plynu . . . . .	10
3.1.1 Paschenův zákon . . . . .	11
3.2 Výběr plnicího plynu . . . . .	12
3.3 Navrhovaný způsob plnění . . . . .	12
<b>4 Napájení</b>	<b>13</b>
<b>5 Trigger a scintilátory</b>	<b>15</b>
5.1 Scintilátor . . . . .	16
5.2 Měníče vlnové délky (WLS) . . . . .	16
5.3 Lavinové fotodiody (APD) . . . . .	17
5.4 Zpracování signálu . . . . .	17

# Úvod

Každou sekundu dopadají na Zemi spršky vysokoenergetických částic kosmického záření. Přímo na povrch dopadají především miony. Jelikož tyto částice mají nenulový elektrický náboj, tudíž by měla být detekovatelná pomocí jiskrové komory, kterou se pokusíme zkonstruovat.

Jedná se o dráhový detektor částic, který 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 proběhne 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 Kozmické žiarenie

Kozmické žiarenie je vysokoenergetické žiarenie, ktoré pochádza najmä z oblastí mimo našej Slnčnej sústavy. Interakciou so zemskou atmosférou môžu kozmické lúče vytvárať spršky sekundárnych častíc, ktoré niekedy dosahujú povrch Zeme. Nepoznáme pôvod kozmického žiarenia, avšak sú experimenty, ktoré interpretujeme ako dôkaz toho, že 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.

#### 1.1.1 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.

#### 1.1.2 Sekundárne kozmické žiarenie

Keď primárne častice vstúpia do zemskej atmosféry, zrazia sa s atómami a molekulami. Táto interakcia produkuje kaskádu ľahších častíc, nazývanú tiež sprška 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 nabité mezóny 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, bublinkovými komorami, scintilačnými detektormi alebo ako v našom prípade iskrovou komorou.

## 1.2 Simulácia dopadajúcich miónov

Mióny majú strednú voľnú dráhu okolo 15 km, 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  $\approx 4$  GeV. Intenzita miónov dopadajúcich na povrch Zeme je  $I \approx 70 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$  [1], pričom majú uhlovú distribúciu úmernú  $\propto \cos^2 \theta$ .

Naša iskrová komora má vodivé platne s rozmermi  $L_x = L_y = 20$  cm, pričom veľkosť nádoby (a teda aj vzdialenosť scintilátorov) je  $L_z = 30$  cm. Počet miónov dopadajúcich na horný scintilátor je tak daný vzťahom

$$\frac{dN}{dt} = I L_x L_y \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta \cos^2 \theta \sin \theta \doteq 5,86 \text{ s}^{-1}$$

Detekovať dokážeme iba tie mióny, ktoré prejdú oboma scintilátormi. Na určenie množstva takýchto miónov sme využili Monte Carlo simuláciu. Vygenerovali sme  $2,5 \cdot 10^7$  miónov dopadnutých na horný scintilátor a počítali sme, koľko z nich dopadne aj na spodný scintilátor. Simulácia ukázala, že oboma scintilátormi bude prechádzať 2,06955 miónov za sekundu, čo znamená, že naša iskrová komora bude schopná zachytiť 35,3% kozmických miónov [2].

## 1.3 Tlak v nádobe

Na základe Paschenovho zákona vieme, že preskokové napätie je priamo úmerné tlaku plynu v nádobe. Preto je dôležité poznať či materiál, z ktorého je nádoba vyrobená, je dostatočne silný na to, aby zvládol udržať potrebný podtlak. Rovnako dôležité je vedieť, či je aj lepidlo, ktoré drží nádobu pokope, dosť silné. Podme sa preto pozrieť na tieto dva prípady samostatne.

Jednotlivé steny, ktoré tvoria nádobu, sú navzájom upevnené lepidlom Acrifix 190. Sila pôsobiaca na steny nádoby je daná rozdielom tlakou a plochou steny  $S$ . Najväčšia sila pôsobí na steny s najväčšou plochou  $S_{max}$ :

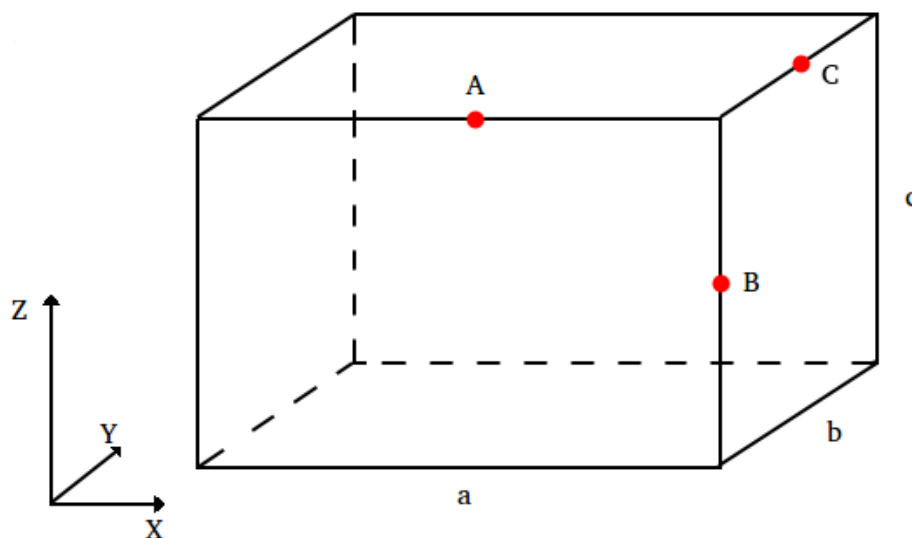
$$F = S_{max} \Delta p$$

Pre podtlak  $\Delta p = 50$  kPa a plochu  $S_{max} = 0,12 \text{ m}^2$  dostávame silu 6000 N. Plocha, na ktorej je nanosené lepidlo je daná súčinom dĺžky a hrúbky steny, čo je v našom  $A = 0,0015 \text{ m}^2$ . Sila, ktorá vytvára napätie v ťahu je  $\tau = 4$  MPa. Lepidlo by malo podľa údajov od výrobcu vydržať napätie 7 MPa, čo zodpovedá podtlaku 80 kPa.

Teraz prejdime k materiálu, z ktorého je krabica vyrobená. Jedná sa o plexisklo. Napätie v plexiskle môžeme vypočítať pomocou vzťahu

$$\sigma = \frac{M_0}{W_0} \tag{1.1}$$

kde  $M_0$  je moment ohybu deformujúci teleso a  $W_0$  modul prierezu. Určiť napätie v každom bode nádoby je príliš náročný problém, ktorého riešenie by vyžadovalo počítačové simulácie. Avšak my nepotrebujeme poznať napätie v každom bode. Bude stačiť, ak sa nám podarí určiť napätie v bodoch, v ktorých je napätie maximálne. Na to využijeme vzťah (1.1). Body, v ktorých je napätie maximálne sa nachádzajú v strede každej hrany nádoby, vid' Obr. 1.1.



Obr. 1.1: Maximálny napätie v krabici. Červené značky znamenajú body s maximálnym napätím. Samozrejme je tam len jeden maximálny bod, ktorý závisí na geometrii krabice. V našom prípade bude maximálne napätie v bode A.

V našich výpočtoch sme použili namiesto normálneho momentu sily  $M_0$  moment ohybu na jednotku dĺžky  $m_0$  v kN. Toto sa zavádza z toho dôvodu, že pri bežných výpočtoch, počítané napätia dosahujú veľké hodnoty a pracovanie s nimi by bolo náročnejšie. Potom pre body v strede strán môžeme písať vzťah

$$m_{0x} = \alpha p l_x^2$$

kde  $p$  je tlak v kPa,  $\alpha$  je tabuľková hodnota, ktorá reprezentuje pomer strán stien nádoby a  $l_x$  je dĺžka steny v smere osi  $x$ . V našom prípade má vzťah pre modul prierezu tvar

$$W_0 = \frac{1}{6} l_x^2$$

Po dosadení do týchto rovníc dostávame maximálne napätie pôsobiace na steny nádoby  $\sigma = 101,79$  MPa pri úplnom vákuu  $p = 100$  kPa.

# Kapitola 2

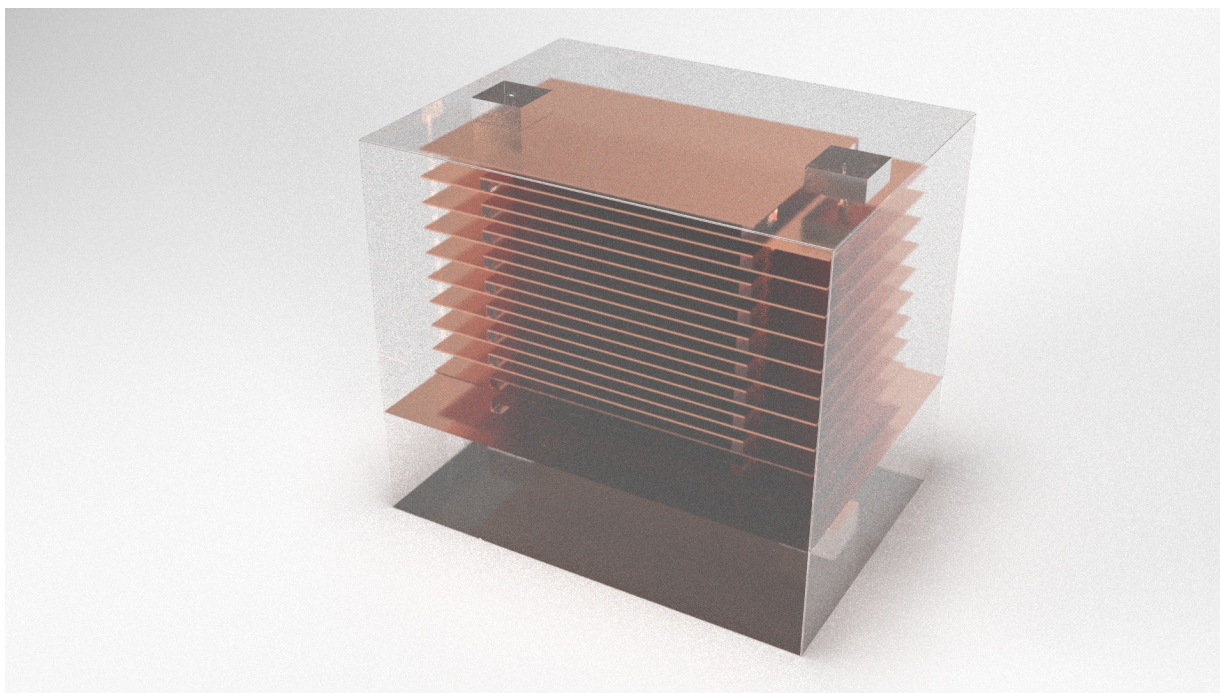
## Konstrukce

### 2.1 Vnější konstrukce

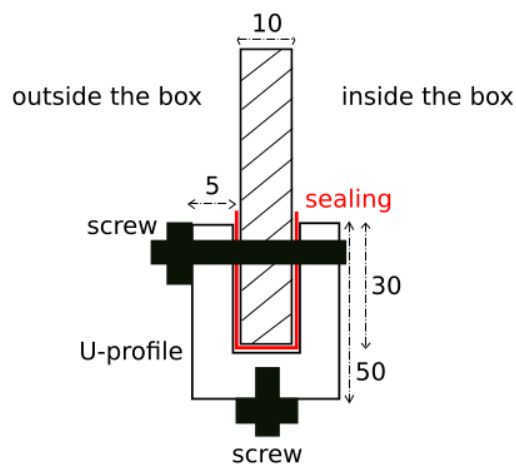
Z hlediska vnější konstrukce jiskrové komory se můžeme setkat se dvěma častými řešeními. Jedním z nich je skleněný zvon, který je vzduchotěsnou pečetí upevněn na základní desku (často kovová). Tento design je výhodný především pro své demonstrační vlastnosti, jelikož tvar zvonu poskytuje pohled dovnitř detektoru ze všech úhlů. Také je výhodný z hlediska těsnění, neboť zde máme pouze jeden spoj. Nevýhodou takové konstrukce je však její pořizovací cena. Druhým častým řešením je kvádrový tvar komory. Ten se používá nejčastěji pro komory s kontinuálním průtokem pracovního plynu, lze však dosáhnout i fungování komory, do níž je pracovní plyn načerpán a komora poté uzavřena [3].

Po zvážení všech možností konstrukce jsme zvolili kvádrový tvar. Z důvodu požadavků ostatních skupin na testování fungování jednotlivých částí detektoru jsme se rozhodli napřed sestavit tzv. testovací verzi komory, v jejíž konstrukci v případě potřeby učiníme nezbytné modifikace.

Materiálem tvořícím boční stěny komory a vrchní díl bude plexisklo (chemickým názvem polymethylmethakrylát) o tloušťce 6mm, slepeny jsou dvousložkovým lepidlem na plexisklo ACRIFIX. Rozměry komory jsou  $400 \times 300 \times 250$  mm. 3D model komory společně s vnitřní konstrukcí elektrod můžeme vidět na Obr. 2.1. Do komory jsou v horizontálním středu protilehlých bočních stěn ve výšce 44mm a 208 mm od základny navrtány 2 díry o průměru 12mm pro přívod a odvod plynu. Do nich bude vložena fixní těsnění (vakuové příruby), na něž se poté napojí přívodní a odvodní hadice. Základnu komory bude tvořit dřevěná deska, k níž bude komora upevněna pomocí tzv. U-profilu, který je k vidění na Obr. 2.2. Jedná se o hliníkovou lištu vyplněnou těsněním (použit bude Viton či těsnění na silikonové bázi), do níž bude box zasazen. Lišta bude závitnicovými šrouby upevněna k bočním stěnám komory a k její základně. Do spodní desky bude dále navrtán otvor pro kabely pro přívod napětí na elektrody. Dalším možným návrhem (viz Obr. 2.1 a Obr. 2.4) je navrtání 2 děr do základny, kterými by vedly tyče nesoucí elektrody. Tato otázka bude dále řešena v rámci experimentálního testování ve spolupráci se skupinou vnitřní konstrukce.



Obr. 2.1: Upevnění tyčí k vnější konstrukci.



Obr. 2.2: Nákres řešení spoje mezi boxem a podstavou komory, tzv. U-profil. Všechny číselné hodnoty jsou udány v milimetrech. [?]

Dalším důležitým aspektem je řešení okolní konstrukce. Pod základnou komory bude muset být umístěn scintilátor společně s wavelength shifterem a další elektronikou. V případě, že tyče nesoucí elektrody nepovedou ven z komory, může komora stát na nožičkách dostatečně vysokých pro umístění všeho potřebného pod komoru, odhadovaná výška je 100 mm. V případě vyvedení tyčí ven z komory bude muset být tento prostor chráněn před vnějšími vlivy z důvodu přívodu vysokého napětí. V takovém případě bude sestavena od-



povídající ochrana prostoru, na které také bude stát samotná komora. Za nejvhodnější materiál pro tuto variantu považujeme dřevo či plexisklo. Dále v průběhu sestavování komory také zkonstruuujeme skříňku pro uložení nezbytné elektroniky, která bude umístěna za zadní stěnou komory, a sestavíme polici, na níž by celá aparatura stála a na které by bylo možno ji přesouvat. Pro lepší viditelnost jisker také plánujeme plexisklo vyleštit a oblepit tmavou folii vrchní část a 3 boční stěny, průhled do vnitřku komory bude možný pouze jednou "přední" stěnou o rozměrech  $400 \times 250$  mm (šířka  $\times$  výška).

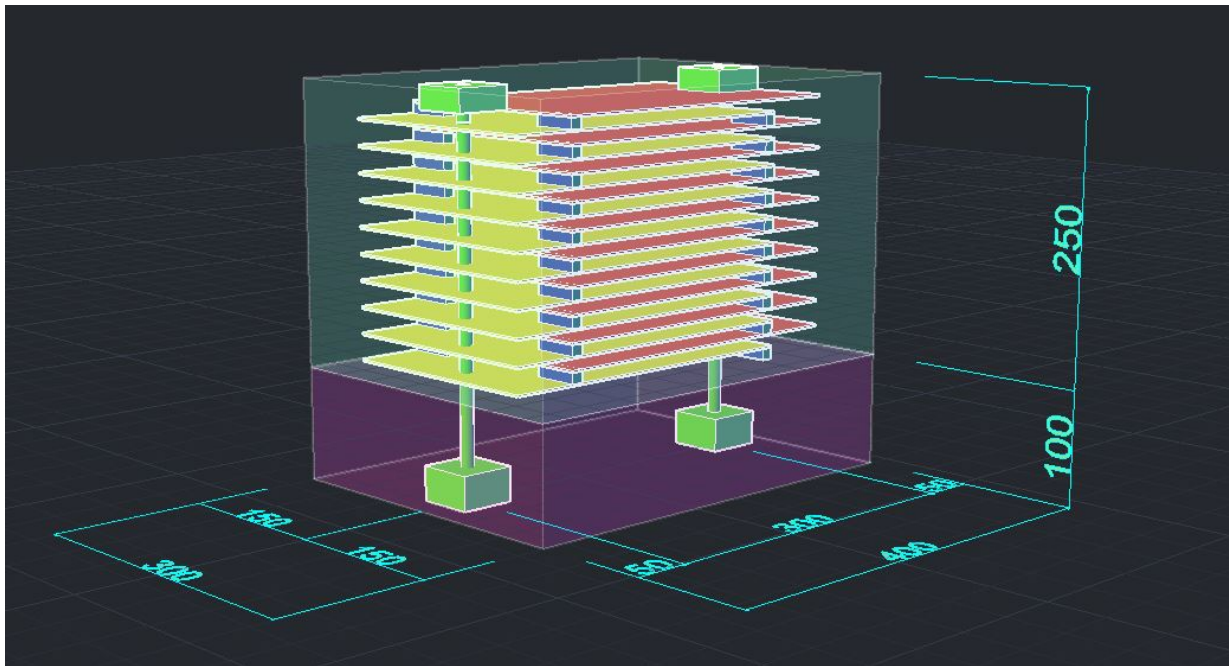
Abychom ověřili, zda tento design a materiály můžeme pro konstrukci prvotní testovací komory použít, provedli jsme ve spolupráci se skupinou zajišťující teorii a simulace projektu několik testů. Výpočty a příslušné výsledky pro tlak působící na stěny komory jsou k vidění v kapitole 1. Dále jsme se rozhodli teoreticky zjištěné hodnoty ověřit experimentálně. Měřili jsme tedy Youngův modul pružnosti plexiskla a ověřili, že předpokládaná silová působení materiál vydrží. Při měření jsme pozorovali pouze elastický průhyb materiálu, žádné nevratné prohnutí plexiskla nenastalo. Při provozu komory by tedy nemělo docházet k trvalým deformacím stěn vlivem vnějšího přetlaku. Ilustrační foto z průběhu měření je k vidění na Obr. 2.3.



Obr. 2.3: Určování Youngova modulu pružnosti a ověřování výdrže plexiskla - ilustrační fotografie.

## 2.2 Vnitřní konstrukce

Vnitřní konstrukce jiskrové komory se bude skládat z 20 cuprexitových desek, jejichž okraje budou oblepeny izolační páskou, o velikosti  $300 \times 200 \times 1,5$  mm<sup>3</sup>. Desky jsou vyrobeny



Obr. 2.4: Nákres vnitřní konstrukce, boční pohled.

z odolného polymeru s  $35 \mu\text{m}$  vrstvou mědi nanesenou na obou stranách desky. Tyto desky budou upevněny na dvou železných závitnicových tyčích o průměru 10 mm (M10) pomocí železných matek. Na tyče bude přivedeno napětí pomocí kabelů zakončených banánky. Tím se docílí opačné polarity desek, čímž získáme 10 desek s kladnou polaritou a 10 desek se zápornou polaritou, viz Obr. 2.4. Kabely s banánky upevníme k tyčím pomocí kovových kroužků, které mají nástavec pro banánky. Kroužky jsou navléknuty na tyče a upevněny pomocí matek, viz Obr. 2.5.

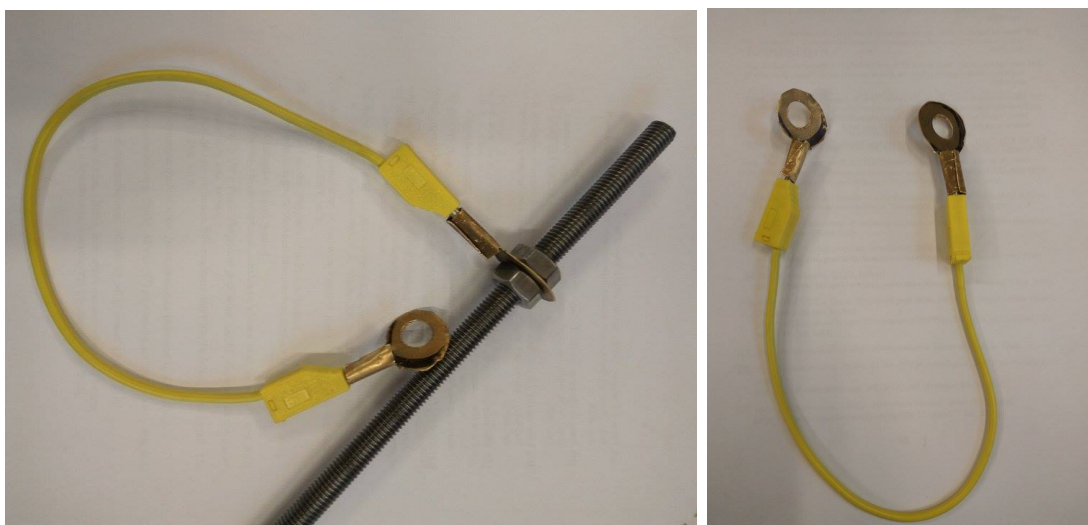
Díky opačné polaritě se mezi sousedními deskami vytvoří homogenní elektrické pole zajišťující dostatečnou energii pro vznik výboje.

Tyče budou upevněny k vnější konstrukci pomocí plexisklových válců s námi navrženými závity pro lepší stabilitu vnitřní konstrukce. Tyto válce budou přilepeny ke spodní podstavě spodního boxu. Tyče budou procházet stěnou mezi boxy, ve které bude opět vyvrtán závit. Polohy horních konců tyčí budou zafixovány pomocí plexisklových kvádříků s vyvrtanými otvory. Tyto kvádříky budou přilepeny k víku horního boxu, viz Obr. 2.1. Síla působící mezi dvěma sousedními deskami o ploše  $S$  a vzdálenosti  $d$  se spočítá podle vzorce pro deskový kondenzátor

$$F = \frac{1}{2} \epsilon_r \epsilon_0 \frac{U^2}{Sd}, \quad (2.1)$$

kde  $\epsilon_0$  je permitivita vakua a  $\epsilon_r$  je relativní permitivita.

Tato síla je v našem případě rovna  $F = 0,2655 \text{ N}$ . Při zatížení desek touto silou jsme manuálně změřili průhyb desek o velikosti  $\Delta x = 0,986 \text{ mm}$ , který není zanedbatelný. Abychom zajistili konstantní vzdálenost mezi deskami během činnosti komory, umístíme



Obr. 2.5: Upevnění kabelů s banánky pomocí kroužků.

na konce každé desky 2 plexisklové kvádříky. Při testovacím měření bylo zjištěno, že náboj vytvořený na deskách je sveden po stěně jednoho z kvádříků, viz Obr. 2.6. Tento problém jsme vyřešili oblepením kvádříků pomocí pásky. Nicméně se poté náboj nahromaděný na okraji desky vybíjel skrz izolační pásku. Tento problém ještě nebyl vyřešen, možností řešení je více, například použití keramických kvádříků, nechat odleptat měď na okrajích desek či použití odolnější izolační pásky.



Obr. 2.6: Testovací měření vodivosti desek.



# 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, jmenovitě hlavně helium (He), neon (Ne) a argon (Ar) [5]. Tyto detektory jsou obvykle provozovány přibližně za atmosferického tlaku, je ovšem velmi důležité rozhodnout, zda budeme pracovat s tlakem přesně rovným atmosferickému, nebo s (lehkým) podtlakem resp. přetlakem, což bude rozvedeno dále v této kapitole. Taktéž bude představen způsob, jakým by komora měla být plněna plynem.

### 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 [5].

Rovněž také dochází k rekombinaci, kdy kationty a elektrony opět vytvářejí neutrální atomy plynu. 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 tohoto lze 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 dlouhou *dobu paměti* (memory time- dobu mezi průchodem částice a působením vysokého napětí). Takové prvky tedy nebudou stát v cestě vzniku lavin (např. v důsledku rekombinace či zachycení elektronů prvky s vysokou elektronovou afinitou) [5]. Účinnost komory může být tedy snížena, je-li v plynu obsažena příměs prvku s vysokou elektronovou afinitou, např. *kyslíku* případně *vzduchu*.

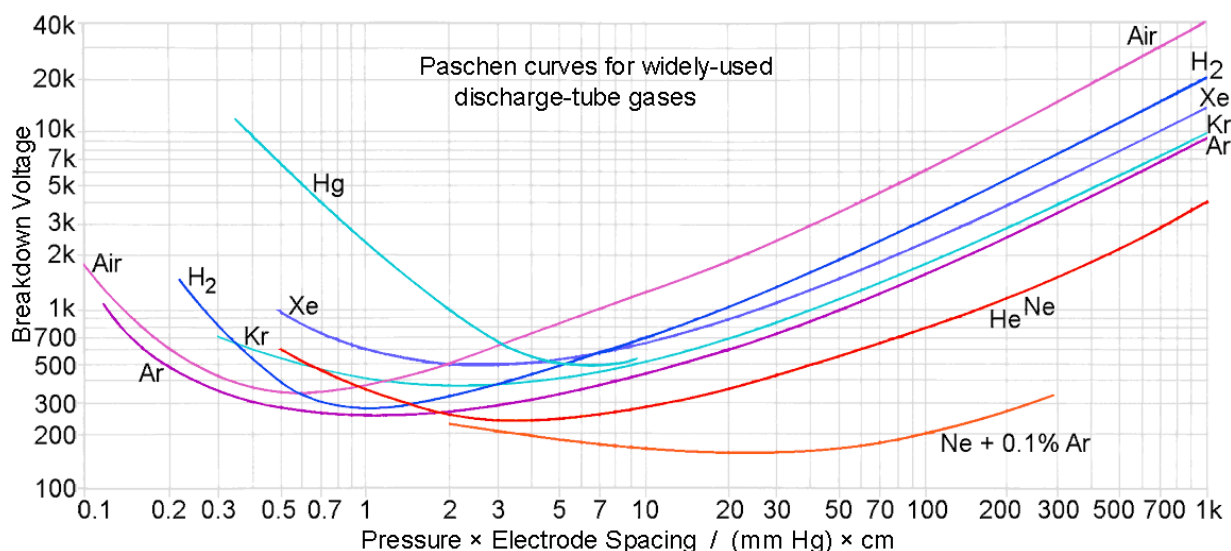
### 3.1.1 Paschenův zákon

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

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

kde  $A$ ,  $B$  jsou konstanty závislé na druhu použitého plynu za předpokladu konstantního poměru  $E/p$ , kde  $E$  je intenzita elektrického pole, a  $\gamma$  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 [6]. 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 [4].

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) odečíst 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 Obr. 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 Obr. 3.1 vyplývalo, že budeme jednoznačně pracovat s podtlakem, my jsme se přesto rozhodli pro mírný 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 Navrhovaný způsob plnění

Nejprve v komoře změříme množství kyslíku pomocí oxymetru. Toto bude muset být provedeno s nepřipojeným napětím, neboť oxymetr pracuje pouze ve vodě. Do komory tedy umístíme kádinku s vodou a provedeme několik měření. Poté komoru několikrát propláchneme dusíkem a následně argonem, dokud množství kyslíku neklesne na hodnotu v řádu setin, maximálně desetín procenta. Očekáváme, že bude třeba proplachovat 3x-4x dusíkem a poté ještě 2x - 3x argonem, než komoru naplníme argonem. Pod pojmem "průplach" rozumíme přívod plynu přímo z dodané bomby s plynem otvorem v konstrukci jiskrové komory pomocí přírodní gumové trubky a následný odvod plynu druhým otvorem v konstrukci pomocí vývěvy. Otvory pro přívod a odvod plynu mají shodný průměr 12 mm (viz sekce Vnější konstrukce). Případné netěsnosti lze zkontrolovat tak, že na spoje nanese trochu mýdlové vody a zjistíme, kde se tvoří vzduchové bublinky.

Abychom minimalizovali kontaminaci komory vzduchem, čili abychom ji uzavřeli, utěsníme spoje přípravky na bázi molybdendisulfidu. Ze stejného důvodu je i užít již zmíněný (maximálně) 10% přetlak. Jelikož neznáme účinky molybdendisulfidu na jednotlivé materiály, rádi bychom vyzkoušeli nejen výše uvedené gumové trubky, ale také trubky vyrobené např. z nerezová ocel. Zatím však vycházíme z použití gumových trubek o vnějším průměru 12 mm (koresponduje s průměrem vyvrtaných děr v plexiskle) a vnitřním průměru (neboli tzv. světlosti) 8-10 mm. Vzhledem k předpokládanému velkému tlaku v dodaných bombách s plynem (řádově stokrát vyššímu než tlak atmosferický) by toto mělo být dostačující k rychlému napuštění komory plynem. Za žádoucí považujeme taktéž to, aby i odvod plynu byl proveden rychle, čehož chceme dosáhnout pomocí již zmíněné vývěvy. Druh použité vývěvy zatím zůstává předmětem diskuse a dohody s výborem vnější konstrukce.

Pokud jde o změny tlaku, pak tyto budou 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, přikláníme se spíše k druhé variantě, neboť ta umožňuje kontrolovat tlak stále, nikoliv jednorázově.

# Kapitola 4

## Napájení

Pro správný provoz jiskrové komory je potřeba zdroje vysokého napětí (HV) asi 8 kV v závislosti na parametrech plynu. Pomocí řídicího obvodu (viz. Obr. 4.1 a 4.2) je vytvořeno střídavé napětí, které se pak pomocí flyback transformátoru (viz. Obr. 4.3) převede na vysoké napětí. Na transformátor je ovšem pokládáno několik omezení. Rekombinace iontů argonu probíhá velmi rychle a tedy je potřeba vysoká frekvence transformátoru aby byla jistota toho, že se vysokého napětí dosáhne včas pro uskutečnění výboje. Napětí na deskách musí dosáhnout požadované velikosti za méně než  $\sim 100$  ns od trigrovacího signálu ze scintilátorů.

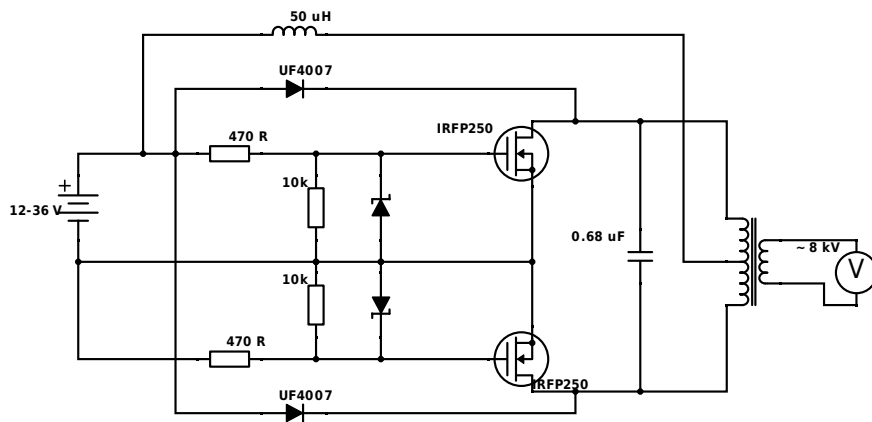
Jestli bude efektivita spínání nízká, je možné napětí usměrnit a vyhladit. Toho bude dosaženo pomocí diod a kondenzátorů, které budou přesně zvoleny v závislosti na tvaru generovaného napětí.

Jako řídicí obvod pro flyback byl vybrán tzv. zero-voltage switching (ZVS) driver, tedy je vytvořen spínaný zdroj s vysokou efektivitou a výkonem. Pro případ, že by se nepodařilo řídicí obvod vyladit jsou zvažovány i alternativní transformátory jako je transformátor z neonových trubic, mikrovlnné trouby nebo zážehová cívka z automobilu. Flyback byl ovšem zvolen pro svou nejlepší dostupnost, vysoký výkon a také relativně jednoduchý řídicí obvod a alternativy by byly zkoušeny pouze při jeho selhání.

Jako primární zdroj využijeme laboratorní zdroj s proměnlivým napětím 12 – 40 V. Například vhodným kandidátem je zdroj MANSON HCS-3202-000G jehož rozsah je až 36 V a 10 A. Na deskách bude počas celé operace přítomno čistící napětí 12 – 100 V které bude odvádět vzbýlé ionizované molekuly. Toto napětí bude zajištěno laboratorním zdrojem který napájí vysoké napětí nebo ze separátního transformátoru v případě, že by bylo nutné použít vyšší napětí.

Nosné tyče desek poslouží jako terminály na přívod vysokého napětí na desky. V stěně nádoby tak nemusí být zvlášť díra pro napájení.

Transformátor i s řídicím obvodem budou umístěny v ochranné krabici pod nebo vedle jiskrové komory spolu s elektronikou a napájením APD které se budou napájet ze separátního zdroje vysokého napětí.



Obr. 4.1: Řídící obvod ZVS na flyback transformátor.



Obr. 4.2: Řídící obvod ZVS na flyback transformátor.



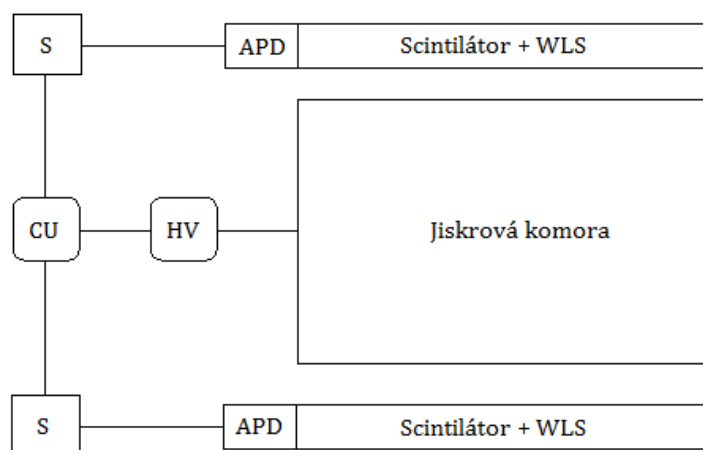
Obr. 4.3: Flyback transformátor.

# Kapitola 5

## Trigger a scintilátory

Abychom zaregistrovali mion z kosmického záření jiskrovou komorou, musíme na elektrody v komoře přivést vysoké napětí. Toto napětí nebude na desky přiváděno stále, ale pouze tehdy, prolétne-li komorou mion. Obvod s triggerem má za úkol detekovat událost, kterou chceme pozorovat a následně vyslat signál k přivedení vysokého napětí na elektrody v jiskrové komoře.

Obvod triggeru bude sestaven dle schématu na Obr. 5.1. Obvod se skládá ze dvou scintilátorů s měniči vlnové délky (WLS), které navazují na lavinové fotodiody. Signály z fotodiód pokračují na tvarovače pulsů, které je upraví na tvar potřebný k přijetí koincidenční jednotkou. Jsou-li signály z obou scintilátorů v koincidenci, je vyslán signál ke spuštění vysokého napětí na elektrody jiskrové komory. Aby tedy došlo k přivedení vysokého napětí na elektrody, musí mion z kosmického záření projít oběma scintilátory. Tímto způsobem detekce docílíme toho, že miony které neprojdou celou komorou nebudou detekovány, obdobně jako jiné částice, které nejsou tak pronikavé (např. elektrony).



Obr. 5.1: Schéma zapojení obvodu s triggerem. WLS značí měnič vlnové délky, APD jsou lavinové fotodiody, S je tvarovač pulsu, CU je koincidenční jednotka a HV je vysoké napětí.

Hustota	1,03 g/cm <sup>3</sup>
Index lomu světla	1,57
Světelný výtěžek	65% (vzhledem k antracenu)
Doba dosvitu	2,5 ns
Maximální vlnová délka	420 - 440 nm

Tab. 5.1: Vlastnosti použitého scintilátoru [1].

## 5.1 Scintilátor

Scintilátor je materiál, ve kterém vznikají slabé záblesky viditelného světla při vystavení ionizujícímu záření. Scintilátory se používají jako detektory částic. Když prochází nabitá částice skrz scintilátor, ztrácí v něm energii. Tato energie je absorbována molekulami scintilačního materiálu a tím se molekuly dostanou do vyšších energetických stavů — excitovaných. Následně tyto excitované molekuly deexcitují do svých základních stavů uvolněním energie v podobě emise viditelného nebo UV fotonu. Tomuto mechanismu se říká scintilace. Tyto emitované fotony jsou následně detekovány různými způsoby.

Scintilační materiály jsou organického a anorganického druhu. My používáme organický scintilátor dodaný společností Nuvia [7] o velikosti 20 × 20 cm a tloušťce 2 cm. Jsou potřeba 2 scintilátory, jeden je umístěn nad komorou a druhý pod ní. Vlastnosti použitého scintilátoru jsou shrnuty v Tab. 5.1.

## 5.2 Měníče vlnové délky (WLS)

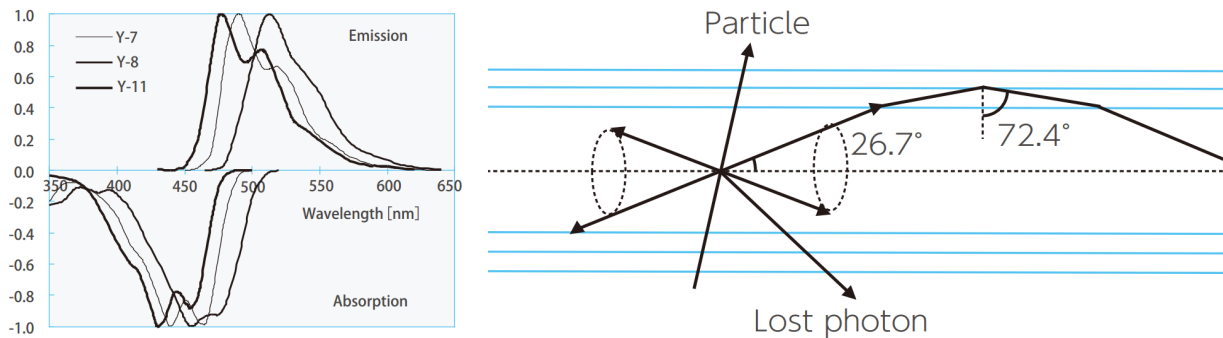
Fotony vyzářené scintilátorem po průchodu ionizující částice jsou sebrány na jeho povrchu měniči vlnové délky (*Wavelength Shifting Fibers*). To jsou speciální optická vlákna, která jsou na povrchu vybavena aktivním materiálem. Na něm se příchozí fotony absorbují a znovu se, s vyšší vlnovou délkou, izotropně vyzáří. Část těchto fotonů je pak vedena díky totálnímu vnitřnímu odrazu po délce vlákna k dalšímu vyčítání. Použity jsou zelené WLS typu Y-11(200)M od společnosti Kuraray [7], jejich charakteristické vlastnosti jsou popsány v Tab. 5.2 a Obr. 5.2.

typ	em. peak [nm]	ab. peak [nm]	d [mm]	n [-]	ε [%]
Y-11(200)M	476	430	1,0	1,59	5,4

Tab. 5.2: Základní vlastnosti WLS vláken: pozice peaků absorpčního a emisního spektra, průřez, index lomu jádra a účinnost absorpce fotonu [8].

WLS mají účinnost absorpce fotonů  $\sim 5,4\%$  (trapping efficiency). Pravděpodobnost toho, že vyzářené fotony neopustí WLS vlákno je pak  $\sim 30\%$ .

Na povrchu cihly scintilátoru budou WLS vlákna pouze přiložena a pokryta vrstvou silikonového optického gelu. Toto řešení se zatím zdá jako postačující a oproti alternativám



Obr. 5.2: (vlevo) Emisní a absorpční spektrum WLS vlákn; (vpravo) podélný průřez s vyobrazením průchodu částice vláknem [8].

netěžko proveditelné.

### 5.3 Lavinové fotodiody (APD)

Převodu fotonů ze scintilátorů na elektrický signál je dosaženo pomocí dvojice lavinových fotodiody (Avalanche PhotoDiode - APD), jedné pro každý scintilátor. APD pracuje na stejném principu jako obyčejná fotodioda - připojením stejnosměrného napětí v závěrném směru se vytvoří vyprázdňená oblast okolo PN přechodu citlivá na světlo, kde v okamžiku absorpce fotonu vznikne pár elektron-díra. Driftem těchto nosičů k elektrodám vznikne proudový impuls. APD ovšem pracuje při větším závěrném napětí řádově stovek voltů a dosažená intenzita pole je natolik velká, že při driftu vzniklých nosičů dochází srážkami s částicemi materiálu APD k multiplikaci náboje a lavinovému efektu. I řádově jednotky fotonů jsou poté schopné vyprodukovat měřitelný elektrický signál.

Hlavní výhodou APD oproti hojně používaným fotonásobičům (PMT) je menší operační napětí, vyšší kvantová účinnost a o mnoho menší velikost. V případě jiskrové komory, koncipované jako přenosné zařízení, jsou tedy tyto vlastnosti velmi vhodné.

Pro prvotní měření byly zvoleny Si APD Hamamatsu S5453 (viz Obr. 5.3) s velikostí citlivé plochy kompatibilní s obsahem průřezu vlákna wavelenght shifteru. Základní vlastnosti zvolené APD jsou v Tab. 5.3.

Stejnoseměrné reverzní napětí pro APD může být buď přímo odebíráno z externího přenosného zdroje napojeného do sítě, nebo lze využít zdroje pro vysoké napětí jiskrové komory.

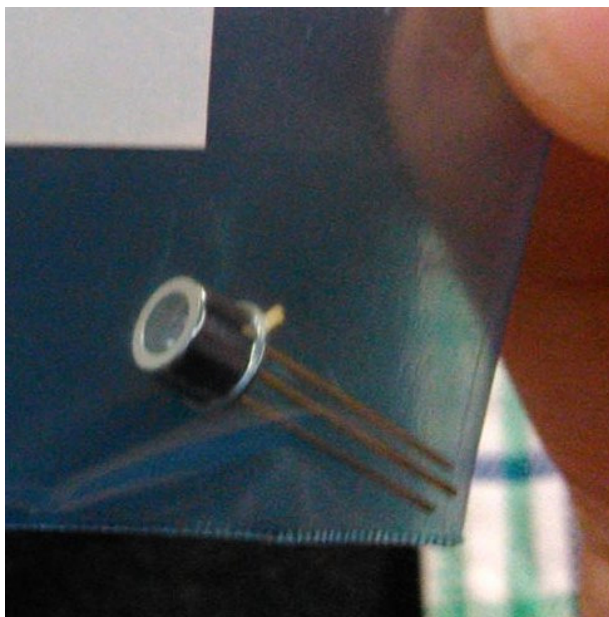
### 5.4 Zpracování signálu

Z lavinové fotodiody je signál odveden do koincidenční jednotky. Ta vyhodnocuje signály z obou diody a spíná trigger. Je nejdříve zapotřebí odfiltrovat veškerý šum, který by z fotodiody mohl přicházet. Filtraci je možno provést komparátorem, který by pustil



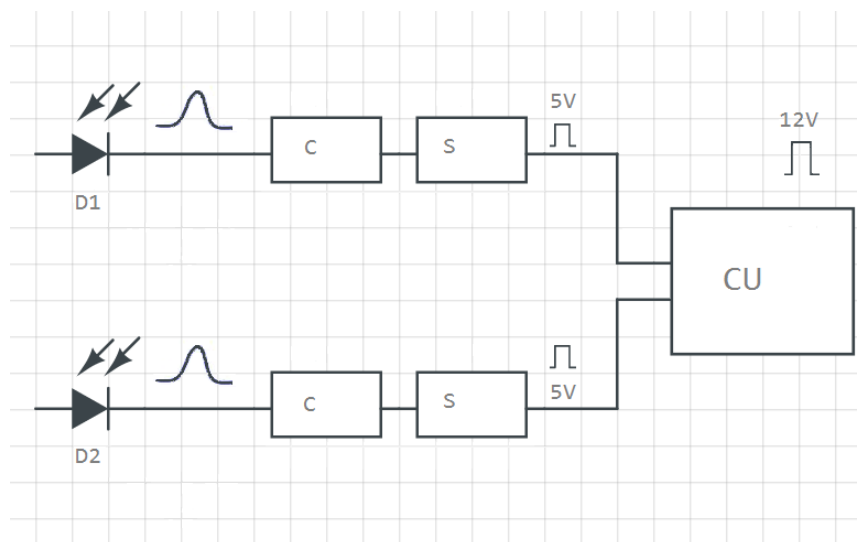
citlivá plocha	0,78mm <sup>2</sup>
pík sensitivity	650 nm při 25°C
kvantová účinnost	80%
zesílení	50×
při reverzním napětí	143,6 V

Tab. 5.3: Základní vlastnosti Si APD Hamamatsu S5453 [3].



Obr. 5.3: Lavinová fotodioda Si APD Hamamatsu S5453.

pouze dostatečně silné signály indikující průchod mionu. Takto prošlý signál dále putuje přímo do koincidence, která vyhodnocuje, zda stejný signál přišel i z druhé fotodiody a zda oba signály přišly v dostatečně malém časovém intervalu. Koincidenční jednotka přijímá obdélníkový puls o 5 V — je proto zapotřebí příchozí puls upravit tak, aby jeho náběžné hrany měly standardizovanou výšku. K tomuto účelu použijeme filtr měnící tvar příchozího pulsu. Časový interval, za nějž koincidence vyprodukuje výstupní signál, lze určit experimentálně. Výška tohoto pulsu je 12 V. Obecně však platí, že maximální časové rozlišení je přibližně rovno sumě šířek obou příchozích pulsů. Výchozí puls z koincidenční jednotky lze upravit buď na konstantní šířku či na šířku, která bude úměrná časové délce překrytí obou pulsů.



Obr. 5.4: Zpracování signálu z diod a jejich přenos přes komparátor a shifter do koincidenční jednotky CU.

# Literatura

- [1] K. A. Olive et al., Review of Particle Physics – Cosmic Rays, *Chin. Phys. C*, 38, 090001, (2014) and 2015 update
- [2] G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, 2010, ISBN 978-0470131480
- [3] Polzin E. and Murphy S., Building a Spark Chamber, University of Manchester, 2013
- [4] D. W. Knight, Gas Discharge Tubes - Introduction, 2013, [Online][cit. 19.1.2017].  
Dostupné z: [http://www.g3ynh.info/disch\\_tube/intro.html](http://www.g3ynh.info/disch_tube/intro.html)
- [5] J. Collins, Construction of a Prototype Spark Chamber, 2010, [Online][cit. 19.1.2017]. Dostupné z: [arXiv:1010.4010](https://arxiv.org/abs/1010.4010)
- [6] Wikipedia, Paschen's Law, [Online][cit. 19.1.2017]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Paschen's\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Paschen's_law)
- [7] Organický scintilátor Nuvia, [Online][01.01.2017]  
Dostupné z: <http://www.nuvia.cz/ke-stazeni/en/products/radiometric-systems/nudet-plastic.pdf>
- [8] Plastic Scintillating Fibers, *Kuraray* [Online][01.01.2017].  
Dostupné z: <http://kuraraypsf.jp/pdf/all.pdf>
- [9] Si APD, Hamamatsu, [Online][1.1.2017].  
Dostupné z: [http://shpat.com/docs/hamamatsu/S5343\char'\\_etc.pdf](http://shpat.com/docs/hamamatsu/S5343\char'_etc.pdf)