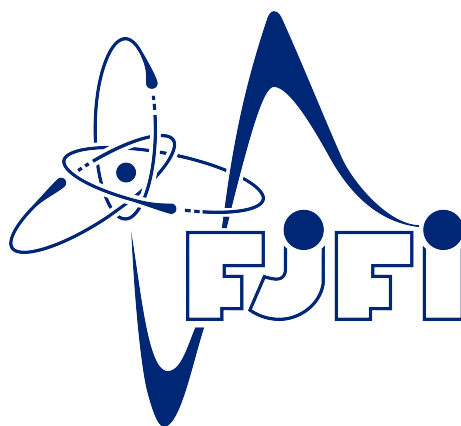


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra fyziky



Conceptual Design Report

Jiskrová komora

PPRA kolaborace

Praha, 2017/2018

PPRA kolaborace

Koordinátor projektu

Tomáš Herman

Mluvčí projektu

Jan Půček

Konstrukce

Tomáš Herman

Zuzana Moravcová

Plyn a plnění

Lukáš Marek

Ondřej Sedláček

Trigger a scintilátory

Veronika Agafonova

Valentina Raskina

Napájecí zdroje

Jan Půček

Pavel Gajdoš

Obsah

Úvod	1
Kosmické záření	1
1 Konstrukce	3
1.1 Vnější konstrukce	3
1.1.1 Zvažované návrhy	3
1.1.2 Realizovaný návrh	5
1.1.3 Nový návrh	6
1.2 Vnitřní konstrukce	7
2 Plyn a plnění	9
2.1 Stálé napětí	11
2.2 Průrazné napětí	13
2.3 Tlak	13
3 Trigger a scintilátory	15
3.1 Scintilátor	16
3.2 WLS vlákna	17
3.3 Lavinová fotodioda	18
3.4 Trigger	18
4 Napájecí zdroje	20
4.1 Požadované vlastnosti	20
4.2 Rešerše možných řešení	20
4.3 Vybrané komponenty	22

Úvod

Jeden ze základních typů detektorů sloužících k přímému zobrazení dráhy částic je jiskrová komora. Její funkce spočívá v detekci částic s nenulovým elektrickým nábojem za pomoci ionizace plynu v citlivém objemu komory. Detektor se sestává z utěsněné komory obsahující několik paralelních deskových elektrod a pracovní plyn. Vrchní a spodní část komory je překryta scintilátory, které společně s koincidenční jednotkou zajišťují triggerování detektoru pouze za přítomnosti částice, která byla detekována spodní i vrchní podstavou komory. Pokud je tato podmínka splněna, dojde k vyslání pulzu vysokého napětí na elektrody, tak aby mezi jednotlivými deskami vzniklo elektrické pole. Napětí je voleno těsně pod hodnotou průrazného napětí, čímž dojde ke vzniku sérií výbojů pouze v místech, kde je lokálně snížena hodnota průrazného napětí z důvodu ionizace plynu. Jelikož elektricky nabitá částice ionizuje plyn podél své trajektorie, tak série výbojů mezi elektrodami kopíruje trajektorii této částice.

Tato zpráva je uvedena popisem funkce jiskrové komory a částic kosmického záření, které bychom rádi detekovali, jejich energie a očekávanou frekvencí průletu naší komorou. V Kapitole 1 je diskutována vnější a vnitřní konstrukce jiskrové komory, jaké jsou možnosti a argumenty pro zvolení dané varianty. Dále v Kapitole 2 je uveden princip vytvoření výboje mezi elektrodami, probrán efekt rekombinace, zachycení, driftu a difúze. V této kapitole je také argumentováno proč na elektrody zavést stálé napětí, vrchní odhad použitelného napětí a jak vhodnou hodnotu plánujeme zjistit experimentálně. Poté je zde zmíněn pojem průrazného napětí a vypočítaný počet elektron iontových párů pro různé tlaky. Kapitola 3 popisuje úlohu triggeru v jiskrové komoře. Jsou zmíněny funkce scintilátoru a parametry zvoleného materiálu, včetně vlastností použitého WLS vlákna (Wavelength Shifting), použité lavinové fotodiody a také schéma celého triggeru viz Obrázek 3.5. Ve finální Kapitole 4 jsou popsány požadované vlastnosti napájecího zdroje a následné shrnutí řešerše, kde jsou zmíněny některé možnosti a jejich nedostatky včetně schématu zvolené varianty. Tato kapitola je zakončena vybranými komponenty spolu s důvody jejich výběru.

Kosmické záření

Hlavním zdrojem částic jiskrové komory bude kosmické záření, které neustále dopadá na zemský povrch. Prakticky lze rozdělit kosmické záření na primární a sekundární, kde

primární jsou stabilní částice urychlené kosmickými zdroji a sekundární způsobuje interakce primárního záření se zemskou atmosférou. V konečném důsledku je vynaložena snaha především detekovat nabitě miony dopadající na zemský povrch, které tvoří majoritní složku sekundárního záření¹. Jejich průměrná energie při průletu komorou je přibližně $\approx 4 \text{ GeV}$ s integrální intenzitou $I \approx 70 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ a úhlovou distribucí $\approx \cos^2 \theta$ (úhel θ je odečítaný od kolmice spjaté s místem dopadu). Pomocí těchto údajů lze dopočítat frekvenci průletu mionů komorou s vrchní podstavou o obsahu S :

$$\nu = IS \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} \cos^2 \theta \sin \theta d\theta = \frac{140\pi}{3} S. \quad (1)$$

Pokud je podstava čtvercová se stranou o délce $0,2 \text{ m}$ je výsledná frekvence: $\nu \cong 5,86 \text{ s}^{-1}$ [1]. Jak bylo řečeno na začátku, je ale zapotřebí, aby mion proletěl vrchní i spodní podstavou komory, čímž se vrchní výsledek redukuje. Výpočet integrálu v rovnici 1 se tím podstatně zkomplikuje. Lze zjistit, že výsledná frekvence je rovna přibližně: $\nu \cong 2,07 \text{ s}^{-1}$ (rozměry komory pro kterou je výsledek spočítaný jsou $0,2 \times 0,2 \text{ m}^2$ plocha podstavy a $0,3 \text{ m}$ hloubka komory).

¹Další komponentou záření jsou např. protony, neutrony, elektrony, pozitrony, piony aj.

Kapitola 1

Konstrukce

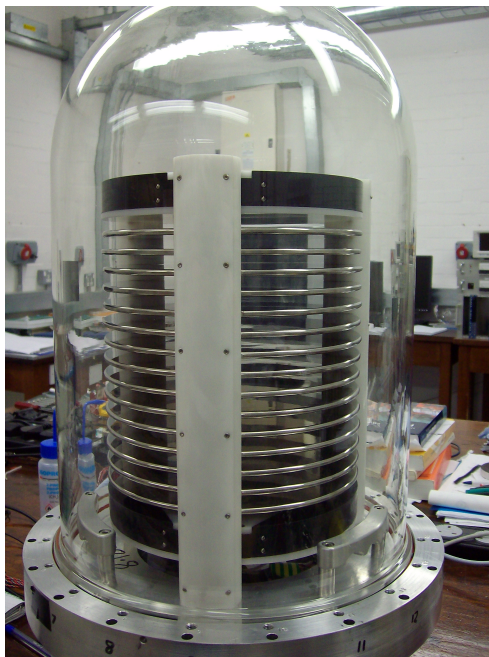
V následující kapitole bude shrnutá vnější a vnitřní konstrukce jiskrové komory, včetně zvažovaných a následně realizovaných možností konstrukce.

1.1 Vnější konstrukce

1.1.1 Zvažované návrhy

Při konstruování jiskrové komory existují dvě nejčastější možnosti vnější konstrukce. První z nich je tzv. zvonová konstrukce (bell jar - viz Obrázek 1.1), ve které jsou elektrody umístěné ve skleněném zvonu. Kovové desky tvořící elektrody (vnitřní konstrukce) jsou taktéž zvolené v kruhovém tvaru, aby vhodně vyplňovali vnitřní část detektoru [2]. Hlavní výhodou tohoto řešení je minimalizování počtu spojů a hran, kterými může unikat pracovní plyn mimo komoru nebo naopak docházet k jeho znečištění vzduchem. Pokud je navíc komora operována s výrazným tlakovým rozdílem vůči atmosférickému tlaku, jsou právě hrany a spoje místem, kde dochází k porušení konstrukce komory nejčastěji. Jediný přítomný spoj je na spodní straně komory, kde nám při těsnění pomáhá hmotnost celé vnější konstrukce. Tento přístup je také vhodný, pokud chceme komoru používat pro demonstrační účely, protože do komory je vidět ze všech úhlů a nepřekáží zde žádné spoje. Zvonová konstrukce je ale z ekonomického hlediska velmi náročná.

Druhá velmi častá varianta využívá vnější komoru ve tvaru kvádry (viz Obrázek 1.2), ve které se nacházejí obdélníkové elektrody. Tato varianta má více hran a podle metody konstrukce i spojů, což s sebou nese jistá negativa (popsaná v předchozím odstavci), ale je ekonomicky velmi výhodná.



Obrázek 1.1: Jiskrová komora se zvonovou konstrukcí vyrobená na Univerzitě v Manchesteru [2].



Obrázek 1.2: Jiskrová komora s kvádrovou konstrukcí vyrobená na Univerzitě v Birminghamu [2].

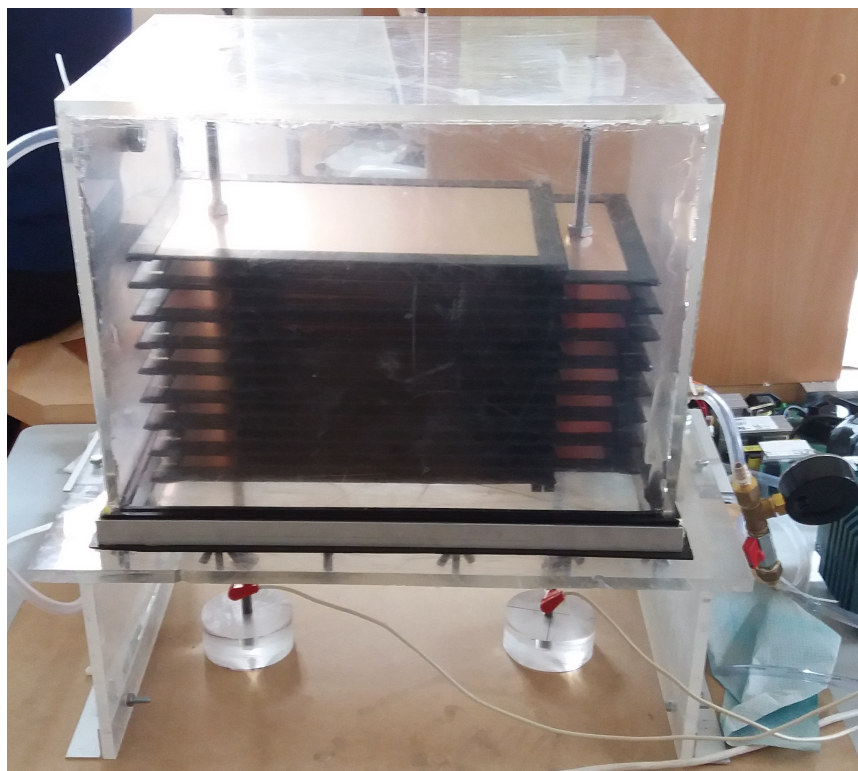
Další variantou konstrukce, kterou jsme zvažovali, bylo umístění již vyrobených desek obdélníkového tvaru do válcové komory, díky čemuž by se na vnější konstrukci detektoru nacházelo jen minimum spojů, přes které by mohl unikat pracovní plyn. Možností konkrétního provedení tohoto návrhu bylo více. Zvažovali jsme válec z průhledného plexiskla, s jednou pevně upevněnou podstavou a druhou odnímatelnou pro práci v komoře. Dále by bylo potřeba připravit konstrukci, na kterou by se daný válec uchytil, aby při měření nedošlo k nežádoucím pohybům. Ekonomicky výhodnější alternativou byly válce z kanalizačního nebo vodovodního potrubí, které byly vyrobeny z různých druhů neprůhledných plastů, tudíž by bylo potřeba vyřešit průzory na koncích válcové konstrukce, aby bylo možné jevy na detektoru pozorovat volným okem. Jelikož nám konstrukční výhody této varianty nepřišly dostatečně výrazné, dále protože její pořizovací cena byla pořád velmi vysoká a hlavně kvůli důvodům zmíněným v předchozím odstavci, jsme tuto variantu nevybrali.

1.1.2 Realizovaný návrh

Jak již bylo řečeno, rozhodli jsme se použít obdélníkovou komoru (viz Obrázek 1.3). Tato komora má rozměry $400 \times 300 \times 250$ mm, stěny komory tvoří plexisklo (polymethylmethakrylát) o tloušťce 6 mm. Spojení stěn bylo provedeno jejich naleptáním a přilepením speciálním lepidlem na plexisklo ACRIFIX 190. Na počátku projektu jsme otestovali těsnění komory. K ventilu vedoucímu do komory jsme připojili vzduchový kompresor a pomocí rozprašovače jsme nanесли mýdlovou vodu na spoje komory. Touto metodou jsme lokalizovali největší netěsnosti. Bylo nutné konstatovat, že komora téměř netěsní, kritickým místem byl spoj stropního panelu s jednou z bočnic a dále upevnění komory k podstavě, které bylo řešené pomocí kovového U profilu. Předpokládali jsme, že za některé netěsnosti může fakt, že ACRIFIX 190 je porézní lepidlo, tudíž ve spojích mohly vzniknout místa s vyšším výskytem bublinek, kde mohlo snáze dojít k úniku pracovního plynu.

Při výpočtu sil působících na vnější kostru komory za daných rozměrů komory, původně plánovaného přetlaku maximálně 10% vůči atmosférickému a technickým údajům konstrukčního materiálu a použitého lepidla jsme došli k závěru, že komora by měla tyto podmínky vydržet a že ji tedy stačí pouze utěsnit.

Netěsnosti jsme se rozhodli vyřešit přídatnou izolací pomocí sklenářského silikonu Den Braven, který se používá k lepení akvárií. Silikon jsme aplikovali do všech vnitřních spojů (aby jej přetlak ještě více zatlačil do těsněných spojů) a následně jsme je uhladili. Po zatuhnutí jsme znovu zkontrolovali těsnost komory mýdlovou vodou a pozorovali jsme, že komora těsnila všude, kromě spoje s podstavou, kam jsme silikon nemohli aplikovat. Abychom tento problém vyřešili, pokusili jsme se ze silikonu vyrobít těsnění na míru okolo U profilu. Komoru jsme následně uzavřeli, aby se silikon vytvaroval přesně podle spoje s podstavou.



Obrázek 1.3: Fotografie obdélníkové komory.

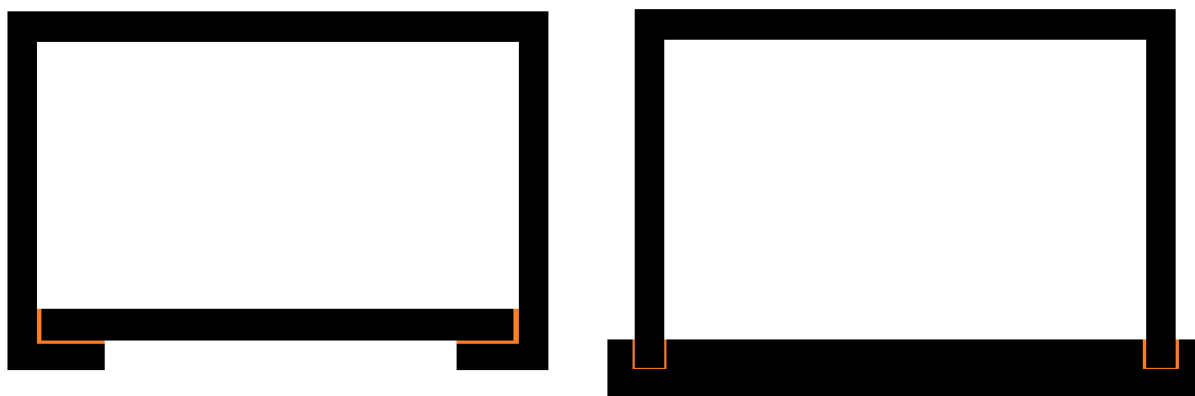
Při následujícím testování neprodyšnosti komory jsme pozorovali výrazné zlepšení v její těsnosti, ale pořád docházelo k úniku vzduchu na kontaktu U profilu s podstavou komory. To bylo mimo jiné proto, že námi vyrobené těsnění nebylo dokonale hladké. Aby bylo možné po zatuhnutí silikon odlepit od podstavu komory, umístili jsme mezi podstavu a silikon tenkou vrstvu igelitu. I přesto, že jsme se jej snažili vypnout pomocí lepící pásky, zůstal igelit na některých místech částečně zvlhčený a tyto nerovnosti se otiskly do našeho těsnění. Právě kvůli těmto nedokonalostem pak docházelo k úniku plynu. Navíc když jsme se přiblížili s tlakem v komoře k projektovanému přetlaku 10%, došlo k povolení jednoho ze spojů stěn se stropem komory. K tomu došlo pravděpodobně proto, že plexisklové desky nebyly dokonale rovně uříznuty a tudíž ve spojích nepřiléhaly přesně tak, jak by měly. Tím pádem lepidlo netvořilo dokonalý spoj, který byl ve výpočtech uvažován, a nevydrželo teoreticky předpokládaný tlak. Navíc došlo k tomu, že kovová část vnitřní konstrukce částečně zoxidovala. To je pravděpodobně následkem toho, že agresivní výpary, které se uvolňují při zasychání silikonu, nebyly dostatečně dobře odvětrávány.

1.1.3 Nový návrh

Na základě těchto zjištění jsme došli k závěru, že pokud použijeme jehlový ventil k jemné regulaci tlaku pracovního plynu v komoře a budeme se držet o něco nižšího přetlaku (do

5 %), což pro naše účely (zabránění kontaminace komory vzduchem) stačí, měla by konstrukce tohoto typu, i s nedokonalými spoji, přetlak vydržet.

Zásadním problémem ale zůstává utěsnění spoje komory s podstavou. Proto jsme se pokusili navrhnout design konstrukce jak pro režim přetlak, tak pro režim podtlak, který by využíval rozdíl tlaků ve svůj prospěch. Na Obrázku 1.4 můžeme vidět naše dva návrhy, oba využívají síly vzniklé rozdílem tlaků k tomu, aby se komora utěsnila. Pro přetlakový režim (vlevo) působí tlak uvnitř komory na spodní desku, a tím ji tiskne ke zbytku konstrukce. Pro podtlakový režim (vpravo) působí atmosférický tlak na komoru z dolní i horní strany, a tak tiskne kostru komory k podstavě.



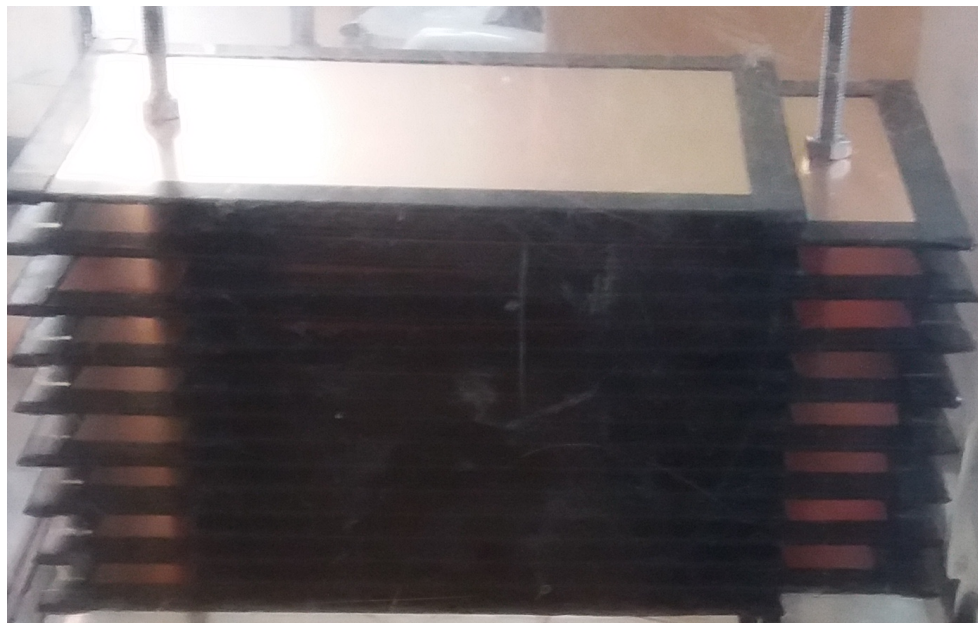
Obrázek 1.4: Černou barvou je znázorněn pevný konstrukční materiál a oranžovou těsnění. Levý obrázek: Návrh designu komory pro práci v přetlaku. Pravý obrázek: Návrh designu komory pro práci v podtlaku.

Konkrétní provedení varianty s přetlakem se bohužel jeví finančně náročné, jelikož jsme nepřišli na to, jak požadovaný design splnit jinak, než nechat si jej odlít na míru, což je velmi drahé. U varianty s podtlakem jsme zvažovali použití finančně dostupného plastového nebo skleněného akvária pro vrchní část komory a plexisklo pro spodní část. Tato varianta je tedy ekonomicky výhodnější, ale riskovali bychom znečištění pracovního plynu vzduchem.

1.2 Vnitřní konstrukce

Elektrody vnitřní konstrukce jsme se rozhodli vyrobit z cuprexitových desek pro plošné spoje. Tyto desky jsou tvořeny jádrem z odolného plastu, na kterém je z obou stran nanesena $35\mu\text{m}$ vrstva mědi. Abychom zamezili nechtěným elektrickým výbojům na ostrých hranách desek, oblepíme je samo-vulkanizační izolační páskou EMOS self-fusing tape o tloušťce 75 mm a dielektrické pevnosti 12 kV/mm, což pro rozměr pásky znamená dielektrickou pevnost 9 kV. Další možností jak výbojům zamezit je například odleptání mědi z okrajových oblastí desek.

Abychom se vyhnuli potřebě zavádět do konstrukce komory otvory pro kabely, které by přiváděly napětí na jednotlivé elektrody, využijeme závitové tyče o průměru 10 mm (M10). Cuprexitové desky budou na závitovou tyč připevněny pomocí díry vyvrtané 1 cm od okraje desky. Polovina desek bude upevněna na jednu tyč a druhá polovina na tu druhou. Desky z jedné a druhé tyče se budou střídat, potom když na tyče přivedeme napětí z vysoko-napěťového zdroje, dojde v komoře k vytvoření homogenního elektrického pole nezbytného pro detekci částic. Vnitřní konstrukci s touto geometrií můžeme vidět na Obrázku 1.5.



Obrázek 1.5: Fotografie vnitřní konstrukce s námi zvolenou geometrií.

Tyče budou procházet spodní deskou komory skrze vyvrtaný závit a v horní části komory budou fixovány pomocí plastových zárážek přilepených ke stropu komory. Abychom zajistili konstantní vzdálenost všech desek, oddělíme je od sebe pomocí plastových distančních kroužků. Aby nedocházelo k výbojům mezi deskami a přívodními závitovými tyčemi, nebudou se desky překrývat úplně. Mezera mezi koncem desky jedné polarity a tyčí s opačnou polaritou bude větší než vzdálenost mezi jednotlivými deskami. Proud bude na tyče přiváděn pomocí kovových kroužků, které mají nástavce pro upevnění kabelů s banánky. Přesné rozměry desek, jejich vzdálenost a počet budeme schopni určit až podle toho jaký z návrhů vnější konstrukce se nám podaří uskutečnit.

Kapitola 2

Plyn a plnění

Vlastnosti plnicího média značně ovlivňují parametry jiskrové komory, proto je výběr plynu a přítomného tlaku důležitou otázkou. Je podstatné, aby primární páry iontů a elektronů vytvořené prolétávající částicí v plynu zůstaly (v ideálním případě) přesně v místě průletu částice, a to až do doby, než se spustí puls vysokého napětí čekající na signál ze scintilátorů (triggeru). Takto přivedené napětí (blízko hodnoty průrazného napětí) na elektrody má za následek lavinovou ionizaci plynu způsobenou převážně primárními elektron-iontovými páry. V konečném důsledku dojde k vytvoření dostatečného náboje (dipólu) a vnitřního elektrického pole, které neguje pole vnější (elektrod) a způsobí zastavení lavinové ionizace. Kvůli rekombinaci uvnitř dipólu dochází ke vzniku fotonů, které nadále mohou ionizovat neutrální atomy plynu. Tento efekt postupně zvyšuje koncentraci elektronů a iontů až do chvíle, než dojde k propojení obou elektrod. Tímto procesem vznikne vodivý kanál plasmatu, jehož následkem je elektrický výboj neboli jiskra. Mezi hlavní procesy s negativním vlivem na koncentraci volných elektronů vytvořených během ionizace patří:

1. **Rekombinace:** Během tohoto děje dojde ke spojení kladného iontu a volného elektronu za vzniku fotonu a neutrálního atomu, který může být i v excitovaném stavu. Rovnice udávající časovou změnu elektronů v důsledku rekombinace má následující tvar:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = -\alpha n_e^2, \quad (2.1)$$

kde n_e je hustota elektronů a α je rekombinační koeficient. Je v platnosti, že tento koeficient je závislý nepřímo na aplikovaném elektrickém poli E a přímo na teplotě T a hustotě n média/plynu. Řešit tento jev lze přivedením stálého napětí na elektrody.

2. **Zachycení:** Jedná se o proces, kdy dojde k vytvoření záporného iontu z neutrálního atomu/molekuly¹ a elektronu. Fyzikální veličinou, která se využívá pro popis je

¹Rekombinace s jedním atomem je nazývána radiační (např. He) a s molekulou disociativní (např. O₂, CO₂).

především elektronová afinita neutrálních atomů, jež vypovídá o stabilitě záporných iontů (kladná pro stabilní ionty a čím vyšší tím jsou stabilnější). Pro inertní plyny (He, Ne, Ar) má nulovou hodnotu, avšak pro prvky přítomné ve vzduchu² má kladné hodnoty (O₂ 0,451 kJ/mol)[3]. Z čehož plyne, že ve většině případů používaným médiem je inertní plyn s minimálním zastoupením příměsí. Tento fakt klade jisté požadavky na pozdější konstrukci komory, která musí být v případě podtlaku maximálně izolovaná. Pro tento děj lze přiřadit rovnici udávající časovou změnu n_e :

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = -kn_e = \eta W n_e, \quad (2.2)$$

η koeficient zachycení, W je driftová rychlost elektronů a k frekvence zachycení [4, 5]. Koeficient zachycení pro vzduch je vyobrazen na obrázku 2.1 společně s pravděpodobností zachycení h^3 . Lze vidět, že pro zvyšující se napětí (od 0 kVcm⁻¹) se jeho hodnota markantně snižuje až do jisté minimální hodnoty (6 kVcm⁻¹). Pomocí těchto hodnot a případného molárního zlomku vzduchu v plnicím médiu lze zjistit, jaký efekt má kontaminace vzduchem na elektronovou hustotu.

3. **Drift a difúze:** Jednou ze základních vlastností směsi plynů je difúze, kdy dochází k prostorovému přerozdělení plynů ve směsi na základě jejich různých koncentrací. Tento princip se samozřejmě uplatňuje i na případ primárních elektronů (je přítomen gradient koncentrací), čímž dochází k postupnému snižování jejich koncentrace v blízkosti dráhy ionizující částice. Jakmile je aplikováno elektrické pole E (podél osy z , kolmé na elektrody) na elektrody, dojde působení elektrické síly na elektrony, a ty se pohybují směrem ke katodě, driftují. Tento proces lze popsat následujícím vztahem:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = D \nabla^2 n_e - W \frac{\partial n_e}{\partial z}, \quad (2.3)$$

kde D je difúzní koeficient a W je driftová rychlost elektronů (většinou se udává mobilita: $\mu = W/Ep$). Pro zjištění rychlosti elektronů lze využít v prvním přiblížení kinetickou teorii plynu, ze které lze následně získat tzv. Nernst-Townsend-Einsteinova rovnice:

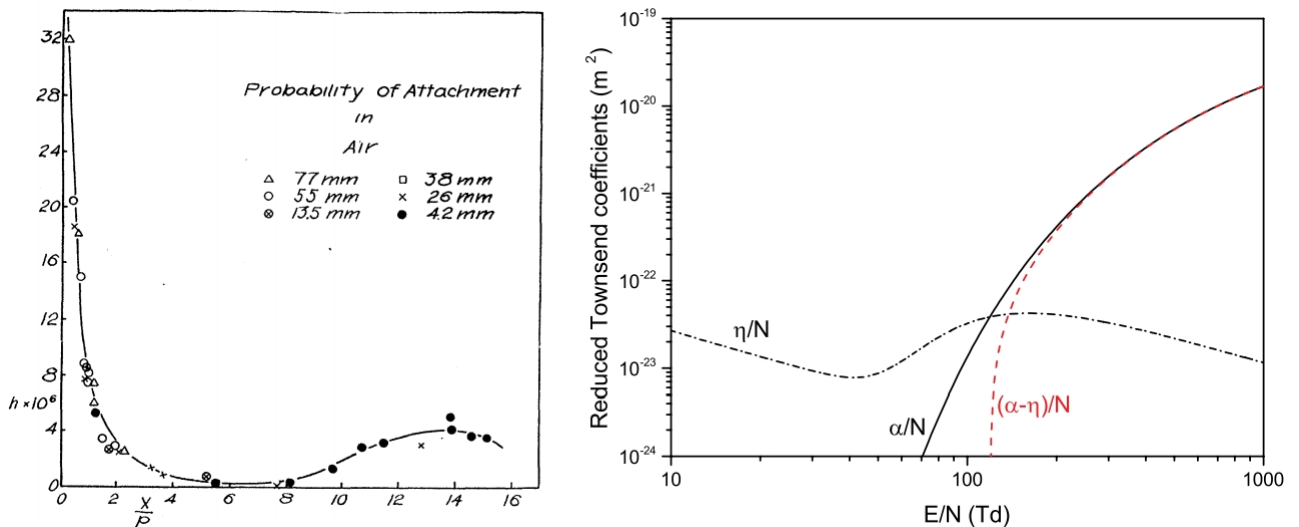
$$\frac{D}{\mu} = \frac{k_B T}{e}, \quad (2.4)$$

kde T je teplota elektronů a k_B je Boltzmanova konstanta. Z tohoto vztahu plyne, že difúzní koeficient je nepřímo úměrný velikosti aplikovaného elektrického pole E (obdobně jako rekombinační koeficient) a lze také dokázat, že i tlaku v objemu p [4].

²Většinový dusík je zde výjimkou a má hodnotu -0,07 kJ/mol.

³Jednotlivé grafy na sebe průběhově navazují, jelikož zobrazené veličiny jsou přímo úměrné. Osa x pravého grafu v hodnotě 10 Td odpovídá ose x levého grafu v hodnotě přibližně 3,5 Vcm⁻¹mmHg⁻¹.

Z výše uvedených poznatků plyne, že efektivita detektoru je závislá na jednotlivých koeficientech daných dějů, a tudíž je vhodné znát jejich hodnoty v závislosti na elektrické intenzitě pole E . S těmito hodnotami lze poté sestavit rovnici kontinuity a získat její řešení pro úbytek hustoty elektronů.



Obrázek 2.1: Levý obrázek: pravděpodobnost zachycení h jako funkce podílu napětí X (Vcm⁻¹) a tlaku p (mmHg). Převzato z [6]. Pravý obrázek: koeficient zachycení η a první Townsendův koeficient α redukované na celkovou hustotu molekul ve vzduchu při atmosférickém tlaku. Převzato z [5].

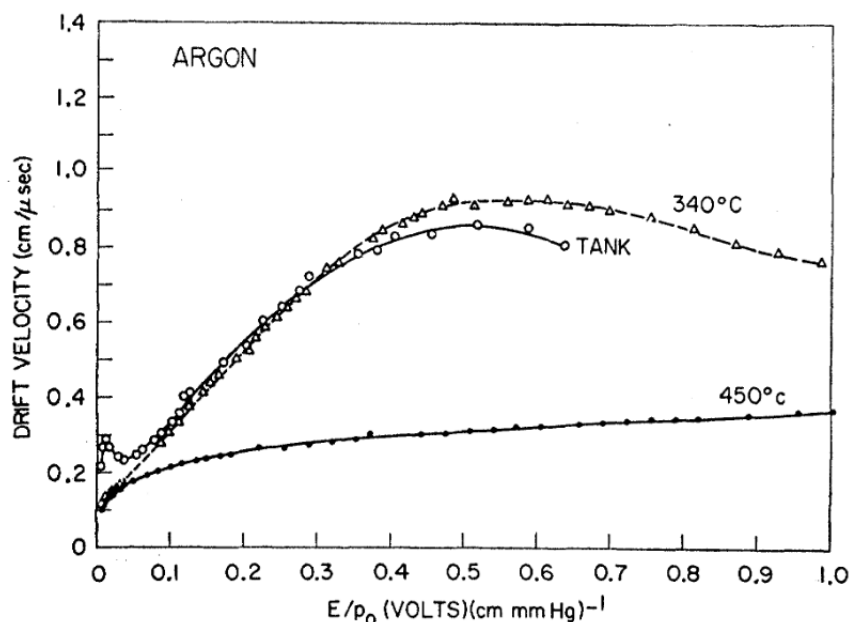
2.1 Stálé napětí

Účelem stálého napětí je oddělení iontu od elektronu vytvořených ionizací, aby se snížila pravděpodobnost rekombinace a potlačení výskytu difuze elektronů. Zároveň má sloužit jako tzv. čistící napětí, které odvádí z detekčního objemu volné náboje⁴ vzniklé mimo hlavní ionizační proces (primární ionizace způsobená především průletem mionů). Stálé napětí musí být dostatečně vysoké, aby maximálně minimalizovalo výše zmíněné procesy, avšak nesmí být příliš silné aby neodneslo elektron na anodu dříve než dorazí puls vysokého napětí.

Teoretickou hodnotu vhodného napětí lze získat vypočtením rovnice kontinuity pro hustotu elektronů v Argonu, která má tvar:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = S - kn_e - \alpha n_e^2 + D \nabla^2 n_e - W \frac{\partial n_e}{\partial z}, \quad (2.5)$$

⁴Jedná se o náboje uvolněné průletem jiných částic a o reziduální náboj po výboji.



Obrázek 2.2: Driftová rychlost elektronu v Argonu při různých teplotách, Tank značí pokojovou teplotu. Převzato z [7]

kde S v sobě obsahuje všechny procesy, které se podílejí na ionizaci. Jsou to především: sekundární ionizace elektronů a kladných iontů, ionizace způsobená neutrálními molekulami, fotoionizace a elektronové uvolnění záporného iontu. Bohužel se nám nepovedlo najít všechny potřebné koeficienty⁵ pro argon při atmosférickém tlaku, pokojové teplotě a slabém el. poli, neboť veškerá měření, která jsme nacházeli, byla při extrémních podmínkách. Proto jsme se rozhodli nejvhodnější napětí naměřit experimentálně a to pomocí porovnání předpokládaného počtu zaregistrovaných mionů za čas ku reálné hodnotě.

Pro získání hrubého odhadu stálého napětí, které bude sloužit k pozdějšímu měření, můžeme využít driftové rychlosti W a poznatků zjištěných o ostatních úbytkových koeficientech a jejich závislosti na E . Za předpokladu, že vzdálenost desek naší komory bude $d \sim 1$ cm a že nebudeme chtít ztratit na anodě více než $\sim 40\%$ vytvořených elektronů, můžeme vyčíslit vrchní odhad na poměr napětí a tlaku plynu z Obrázku 2.2 a to jako $E/\rho \sim 0.15$ V/Torr. Tedy pro atmosférický tlak $\rho = 760$ Torr odpovídá $E = 114$ V. Popřípadě z přímé úměrnosti napětí na tlaku, 10% přetlak, resp. podtlak se projeví 10% navýšením, resp. snížením tohoto vrchního odhadu, tedy: $E_+ = 125$, respektive $E_- = 102$.

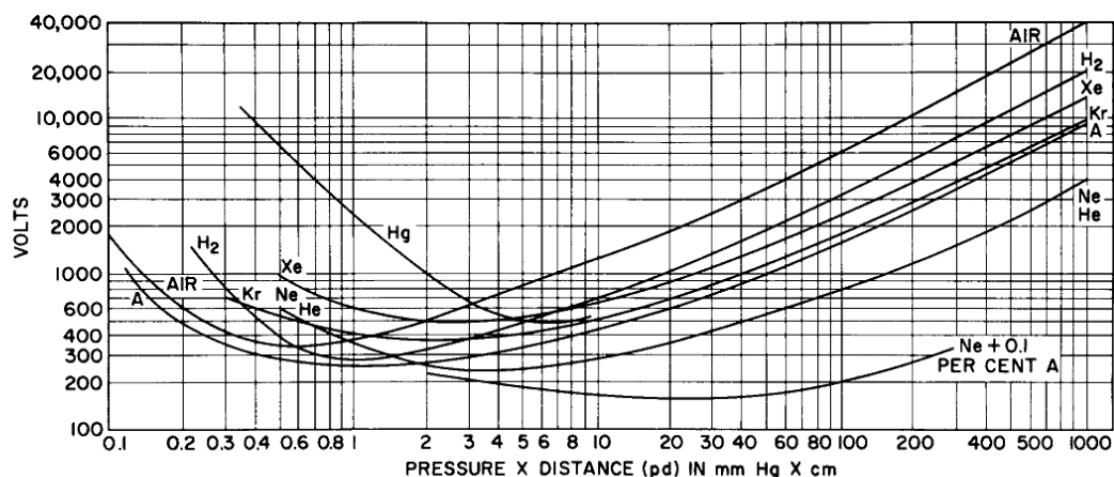
⁵Jsou to následující koeficienty: koeficient rekombinace, koeficient fotoionizace a koeficient ionizace způsobené neutrálními molekulami.

2.2 Průrazné napětí

Průrazné napětí je napětí, při kterém plyn mezi elektrodami přestane mít izolační vlastnosti a dojde k průrazu tedy jiskře. Teoretickou hodnotu průrazného napětí lze v prvním přiblížení popsat pomocí Paschenova zákona:

$$U_p = \frac{Bdp}{\ln(A'dp)}, \quad (2.6)$$

kde B a A' jsou koeficienty příslušné konkrétnímu plynu, d vzdálenost elektrod a p tlak plynu. Grafické vyobrazení tohoto zákona je na Obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: Paschenův zákon pro různé plyny. Převzato z [8]

Použití tohoto zákona je pouze prvním přiblížením, neboť platí pro statické či málo měnící se el. pole. V jiskrové komoře je ovšem na elektrody vyslán vysokonapěťový el. puls. Pokusili jsme se podívat, jak by se měly počítat korekce, ale teorie byla opět příliš složitá, a tedy jsme se rozhodli opět přesnou vhodnou hodnotu napětí určit experimentálně. Tento postup ladění nejvhodnější hodnoty napětí podporuje také fakt, že budeme muset zvolit hodnotu těsně pod průrazným napětím. Důvodem je, abychom se vyhnuli jiskře mimo ionizovanou oblast (oblasti, kde proletěla detekovaná částice). K jiskře stále dojde a to v ionizované oblasti, kde je lokálně snížena hodnota průrazného napětí.

2.3 Tlak

Velikost tlaku v detektoru má přímý vliv jak na průrazné napětí v plynu (viz 2.2), tak i na počáteční počet elektron-iontových párů vzniklých v primární ionizaci (snížený tlak

znamená úbytek molekul média). Pro výpočet závislosti počtu vzniklých párů na tlaku byl využit Van der Waalsova model plynu a ionizační energie mionu při průletu plynným Ag. Tato energie je pro miony s 3-4 GeV přibližně rovna $2 \text{ MeV cm}^2\text{g}^{-1}$ [9]. Pomocí Van der Waalsovy rovnice a jejích konstant pro Ag (viz [10]) byla získána hustota plynu. S využitím středního ionizačního potenciálu Ag, který je 28 eV (viz [11]), byly získány výsledky v tabulce 2.1. Jelikož konstrukce není zatím odolná vůči větším změnám tlaku (maximálně 10% oproti atmosférickému), není potřeba omezovat jeho velikost nedostatkem molekul Ag, jelikož rozdíl hodnot pro takovéto tlaky je zanedbatelný. Z důvodů nízkého rozdílu oproti atmosférickému tlaku, bude použit pro regulaci průchodu plynu z tlakové bomby sekundární jemný regulátor. Plánujeme použít jehlový regulátor spolu s jemným manometrem abychom nepřesáhli konstrukční vlastnosti.

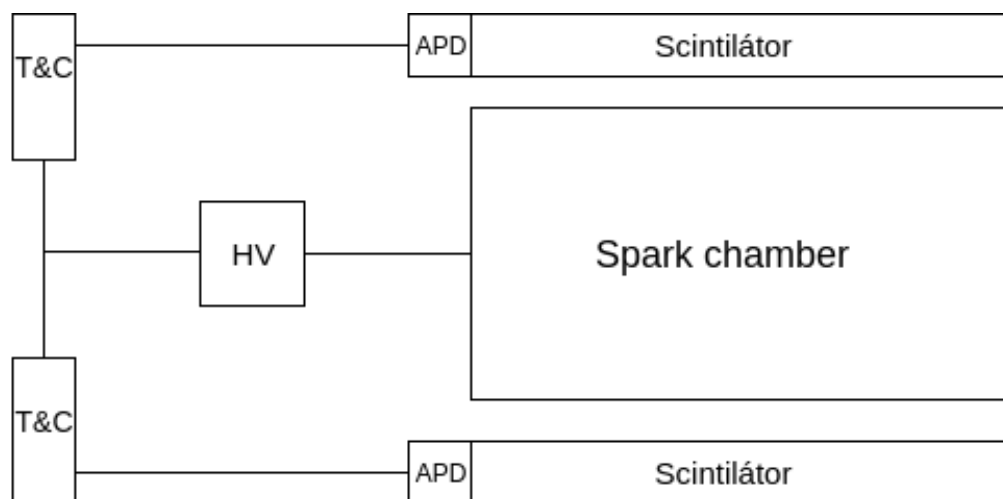
p [atm]	$\rho [\text{g cm}^{-3}10^{-3}]$	N [-]
2	3,48	261
1,1	1.87	140
1	1,69	127
0,9	1,52	114
0,1	0,16	12

Tabulka 2.1: Teoreticky získané počty volných párů N v závislosti na zvoleném tlaku p při teplotě 20°C a hustotě ρ .

Kapitola 3

Trigger a scintilátory

Pro registraci mionů z kosmického záření jiskrovou komorou je nutno na elektrody v komoře přivést vysoké napětí. Toto napětí bude na desky přiváděno jen v okamžiku, kdy komorou proletí mion. Pro detekci průletu mionu komorou a následné vysílání signálu k převedení vysokého napětí na elektrody v jiskrové komoře se používají scintilátory a obvod s triggerem. Mion je registrován v případě, že oba scintilátory (z nichž je jeden umístěn nad komorou a druhý pod ní, viz Obrázek 3.1) zaznamenají signál. Budou-li tyto signály z obou scintilátorů v koincidenci, pak bude vyslán signál ke spuštění vysokého napětí na elektrody jiskrové komory.



Obrázek 3.1: Schéma zapojení jiskrové komory, kde HV je zdroj vysokého napětí, T&C je triggerovací obvod a koincidence signálů, APD je lavinová fotodioda.

3.1 Scintilátor

Scintilátor je látka, která po absorpci ionizujícího záření má schopnost emitovat světlo. Při dopadu částice na scintilátor přechází atomy do excitovaných stavů. Při následné de-excitaci se emitují fotony, které jsou pak v našem případě sebrány pomocí WLS vláken (viz podkapitola 3.2). Na Obrázku 3.2 je fotografie používaných scintilátorů.



Obrázek 3.2: Scintilátory s WLS vlákny.

Scintilační materiály jsou organického a anorganického druhu. Pro jiskrovou komoru bude potřeba mít 2 scintilátory, jeden z nichž bude umístěn nad komorou a druhý pod ní. V našem experimentu je použit organický scintilátor dodaný společností Nuvia [12] o velikosti 20×20 cm a tloušťce 2 cm, jehož vlastnosti jsou shrnuty v Tabulce 3.1.

Hustota	$1,03 \text{ g/cm}^3$
Index lomu světla	1,57
Světelný výtěžek	65 % (vzhledem k antracenu)
Doba dosvitu	2,5 ns
Maximální vlnová délka	420 - 440 nm

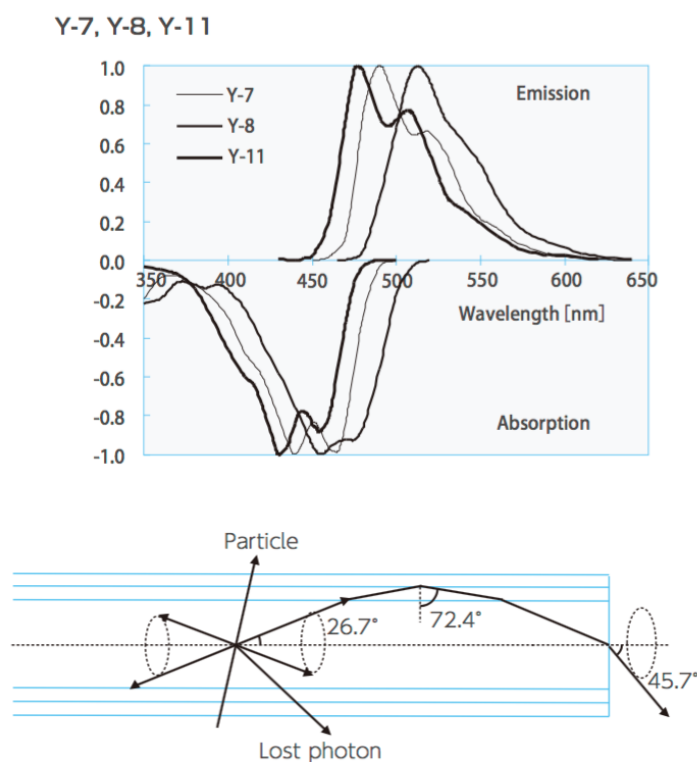
Tabulka 3.1: Vlastnosti použitého scintilátoru [12].

3.2 WLS vlákna

Po průchodu nabité částice scintilátorem se vyzářené fotony sbírají měniči vlnové délky (Wave Length Shifters). Tato vlákna jsou vybavena aktivním materiálem, který absorbuje fotony a následně je vyzáří s vyšší vlnovou délkou. Část zachycených fotonů je pak vedena k dalšímu vyčítání. V našem detektoru jsou použity zelené WLS typu Y-11(200)M od Kuraray. Základní vlastnosti jsou v Tabulce 3.2 a na Obrázku 3.3.

Typ	$peak_{em.}[\text{nm}]$	$peak_{em.}[\text{nm}]$	$d[\text{mm}]$	n	$\varepsilon[\%]$	$P[\%]$
Y-11(200)M	476	430	1,0	1,59	5,4	30

Tabulka 3.2: Vlastnosti použitých WLS vláken: píky emisního a absorpčního spektra, průřez, index lomu jádra, účinnost absorpce fotonů, pravděpodobnost, že vyzářené fotony neopustí WLS vlákno, převzato z [13].



Obrázek 3.3: Nahoře: Emisní a absorpční spektrum WLS. Dole: průchod částic vláknem. Převzato z [13]

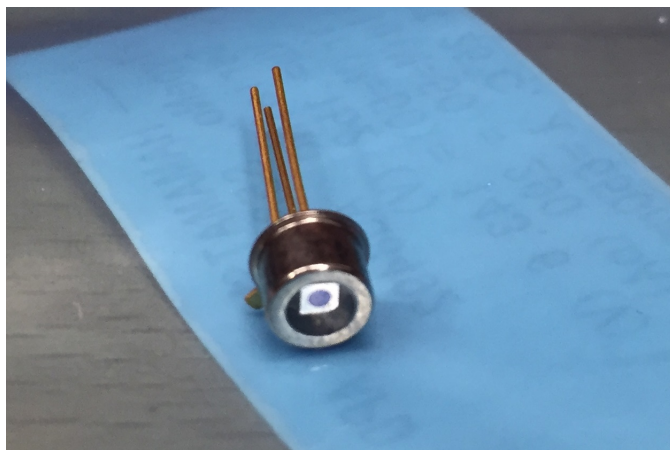
3.3 Lavinová fotodioda

K převedení fotonů ze scintilátoru na elektrický signál lze použít lavinové fotodiody (Avalanche PhotoDiode neboli APD). Dopadající světlo způsobí vznik páru elektron-díra, který je silným elektrickým polem transportován do "lavinové oblasti", kde je pak urychlen na takovou rychlost, že kolize s krystalovou mřížkou způsobí vznik dalšího páru elektron-díra. Nový pár je rovněž urychlen silným elektrickým polem a postupně vznikají další a další nové páry elektron-díra, čímž dochází k lavinovému efektu. Lavinové fotodiody jsou citlivější než ostatní polovodičové fotodetektory, což umožňuje jejich použití pro registraci malých světelných výkonů.

Pro naši jiskrovou komoru budou použity dvě lavinové fotodiody Si APD Hamamatsu S5343 (viz Obrázek 3.4), jejichž vlastnosti jsou shrnuty v Tabulce 3.3. Velikost citlivé plochy je kompatibilní s obsahem průřezu vlákna wavelength shifteru.

Citlivá plocha	0,78mm ²
Pík senzitivity	650 nm při 25°C
Kvantová účinnost	80 %
Zesílení	50×
Při reverzním napětí	420 - 440 nm

Tabulka 3.3: Vlastnosti Si APD Hamamatsu S5343 [14].

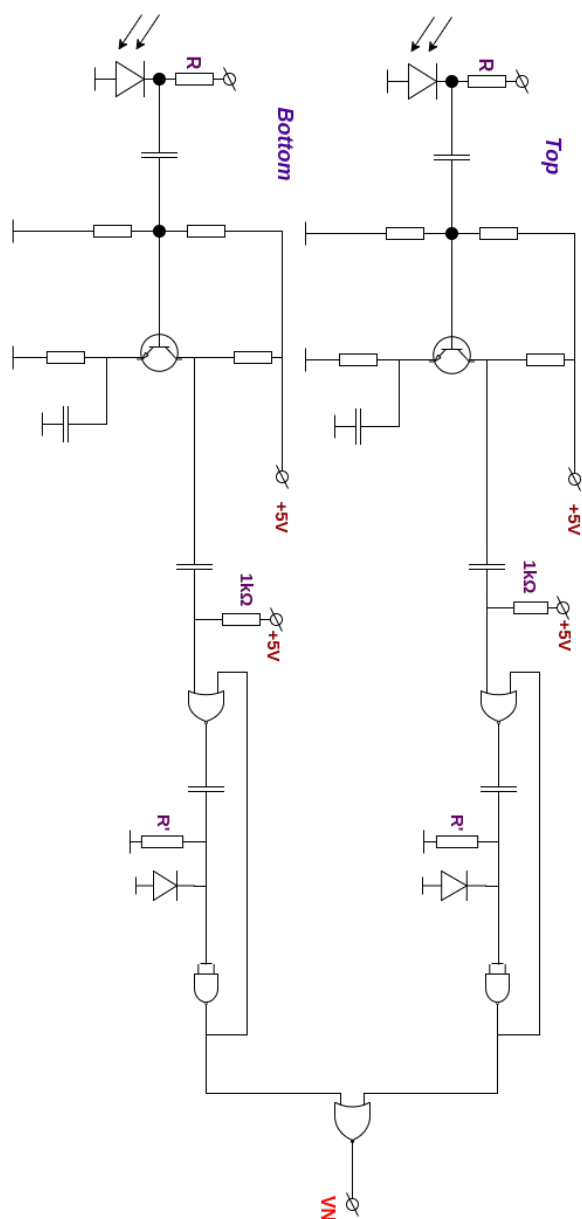


Obrázek 3.4: Lavinová fotodioda Hamamatsu S5343.

3.4 Trigger

Na zpracování signálu z diody bude použit logický obvod, který je znázorněn na Obrázku 3.5. Na začátku je potřeba zesílit signál z obou fotodiod, což realizuje tranzistor. Zesíleny ana-

logový signál je velice krátký. Aby porovnání signálu bylo možné, je potřeba, aby se časové délky obou signálů překrývaly. Kvůli tomu, že časové délky zesílených signálů jsou úzké, je nutné je prodloužit pomocí tzv. monostabilního klopného obvodu. Výsledné signály se pak porovnají v součtovém hradle a v případě podobnosti bude poslán signál o velikosti 5 V do napájecího zdroje.



Obrázek 3.5: Schéma zapojení. VN je výstupní napětí.

Kapitola 4

Napájecí zdroje

4.1 Požadované vlastnosti

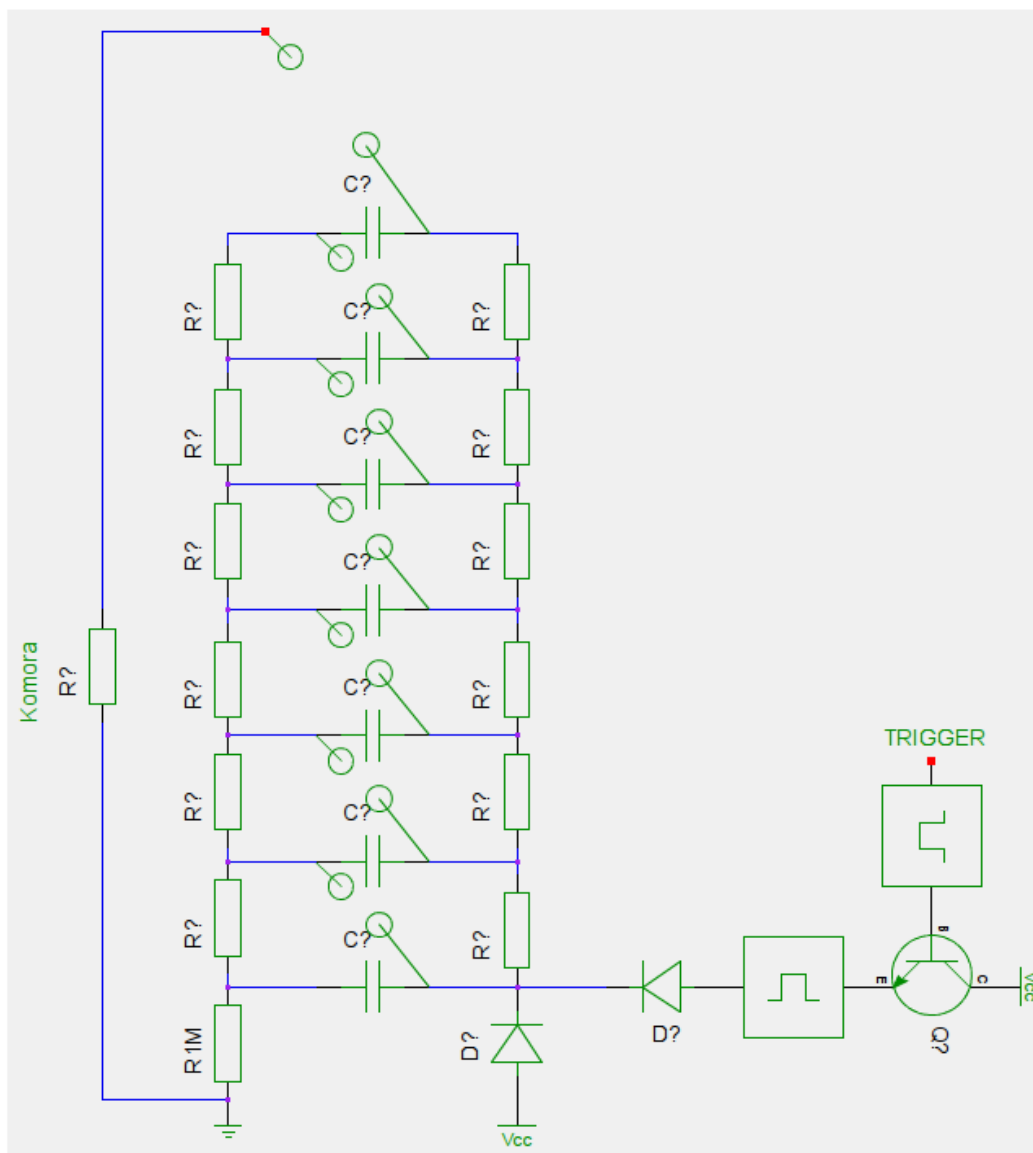
Ke správné funkci jiskrové komory je nutné, aby napětí na deskách vzrostlo na průraznou hodnotu za dobu kratší než ~ 500 ns od průletu částice scintilátory/triggerem. Mezi další požadavky patří zvýšení triggerovacího napětí o faktor vyšší než 1000. A to z toho důvodu, že z triggeru přijde signál o velikosti řádově jednotek voltů, kdežto průrazné napětí je odhadováno na cca 10 kV. V ideálním případě by měl být zdroj dostatečně rychlý, aby bylo možné pozorovat více částic za jednotku času. Nakonec by bylo vhodné, aby zdroj měl dlouhou životnost a nízké pořizovací náklady.

4.2 Rešerše možných řešení

První možnost je zakoupení SSR (solid state relay), které splňuje všechny požadované vlastnosti až na jednu – a tou je cena. Takže i když lze s tímto relé spínat více než 10 kV s náběhovým časem v řádech jednotek ns a spínacím napětím v jednotkách voltů, nelze tento spínač brát v úvahu.

Další možnost je využití transformátoru ke zvýšení triggerovacího napětí, a dále pak použití jiskřiště jako spínače vysokého napětí. Výhodou jiskřiště je rychlost sepnutí, která se pohybuje v řádech desítek nanosekund. Nevýhodou tohoto řešení je výroba transformátoru a také fakt, že se napětí signálu musí zvýšit na vyšší napětí, než jaké je spouštěno.

Požadované vlastnosti nejlépe splňoval Marxův zdroj [15, str. 31], jehož schéma jsme dále upravili tak, aby bylo možné výboj přesně časově řídit. Předpokládaná funkce je následující: pomocí jednoho VN zdroje stejnosměrného napětí budou kondenzátory nabity pod průrazné napětí. Jakmile přijde signál na tranzistor, spojí se druhý VN zdroj, který kondenzátorům dodá náboj, který zvýší jejich napětí nad průraznou hladinu. Schéma 4.1 zobrazuje elektrické zapojení součástek.



Obrázek 4.1: Nákres zapojení VN pulzního zdroje.

Mezi nevýhody Marxova zdroje patří především nutnost vysoké přesnosti při vytváření jiskřišť. Z dielektrické pevnosti vzduchu a schématu, ve kterém je potřeba spustit první jiskřiště při napětí 1700 V je jasné, že vzdálenost mezi elektrodami je menší než 0,5 mm. Mezi další neznámé patří především náběhový čas, který je zatím blíže neurčen. V [16] je udána doba spuštění jiskřiště 200 ns. Otázkou ale zůstává jak se tato doba mění při zapojení více jiskřišť za sebou.

4.3 Vybrané komponenty

Nejdůležitější součástí je tranzistor, který je spouštěn triggerovacím signálem. Námi vybraná součástka je IXGH6N170, která vyniká především vysokou napěťovou pevností mezi kolektorem a emitorem (1700 V) a zároveň je dostatečně proudově propustná (max. 6 A). Také se jeví jako dobrý kompromis mezi cenou, dostupností a rychlostí spínání (průměrná doba sepnutí 290 ns).

Maximální reverzní napětí usměrňovací diody je 1500 V a maximální proud v průchodném směru 3 A. Vybrané odpory mají hodnotu 1 M Ω a maximální výkon 3 W. Kondenzátory jsou dimenzovány na 3 kV a jejich kapacita je 10 nC.

Je možné, že v průběhu testování bude potřeba zakoupit tranzistor s kratší spouštěcí dobou.

Literatura

- [1] C. Patrignani et al. Review of Particle Physics. *Chin. Phys.*, C40(10):100001, 2016.
- [2] Elliott Polzin. Building a spark chamber. 2013. URL https://uomsparkchamber2013.wikispaces.com/file/view/Interim_Report.pdf. University of Manchester.
- [3] Gregory S. Tschumper Jonathan C. Rienstra-Kiracofe and Henry F. Schaefer. Atomic and molecular electron affinities: Photoelectron experiments and theoretical computations. *Chem. Rev.*, 102 (1)(10), 2012.
- [4] J.M. Meek and J.D. Craggs. *Electrical breakdown of gases*. Wiley series in plasma physics. Wiley, 1978. ISBN 9780471995531. LCCN 77002784. URL <https://books.google.cz/books?id=1Xp5AAAAIAAJ>.
- [5] A. Chachereau and S. Pancheshnyi. Calculation of the effective ionization rate in air by considering electron detachment from negative ions. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 42(10):3328–3338, Oct 2014. ISSN 0093-3813.
- [6] Norris E. Bradbury. Electron attachment and negative ion formation in oxygen and oxygen mixtures. *Phys. Rev.*, 44:883–890, Dec 1933. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.44.883>.
- [7] J. C. Bowe. Drift velocity of electrons in nitrogen, helium, neon, argon, krypton, and xenon. *Phys. Rev.*, 117:1411–1415, Mar 1960. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.117.1411>.
- [8] H. H. Wittenberg. *Gas Tube Design*. Lancaster, 1962. URL http://www.g3ynh.info/disch_tube/Wittenberg_gas_tubes.pdf.
- [9] Donald E. Groom, Nikolai V. Mokhov, and Sergei I. Striganov. Muon stopping power and range tables 10-MeV to 100-TeV. *Atom. Data Nucl. Data Tabl.*, 78:183–356, 2001.
- [10] Tom Stretton. Van der waal’s constants for real gases. URL http://www2.ucdsb.on.ca/tiss/stretton/database/van_der_waals_constants.html. [online 3.1.2017].

- [11] C. Grupen and B. Shwartz. *Particle Detectors*. Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology. Cambridge University Press, 2008. ISBN 9781139469531. URL <https://books.google.cz/books?id=XCP1JTU3GQkC>.
- [12] NUVIA. *NuDET PLASTIC Plastic Scintillation Detectors*. URL <http://www.nuvia.cz/ke-stazeni/en/products/radiometric-systems/nudet-plastic.pdf>. [online 5.12.2017].
- [13] Kuraray. *Plastic Scintillating Fibers*. URL <http://kuraraypsf.jp/pdf/all.pdf>. [online 3.2.2018].
- [14] Hamamatsu. Short wavelength type apd, si apd s5343. URL <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/212375/HAMAMATSU/S5343.html>. [online 19.12.2017].
- [15] Vladimír Lysenko. *VN zdroje - zdroje vysokého napětí pokusy a experimenty, měření a měřicí přístroje, ochranné pomůcky*. BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-235-0. [11.12.2017].
- [16] Redakce HW serveru. Z čeho jsou sestavovány přepěťové ochrany. URL <https://vyvoj.hw.cz/navrh-obvodu/z-ceho-jsou-sestavovany-prepetove-ochrany.html>.