

Mlžná komora s termoelektrickým chlazením

The Cloud Chamber with Thermoelectric Cooling

Středoškolská odborná činnost

Obor č. 2: Fyzika

Vedoucí práce:
Mgr. Tomáš Nečas, Ph.D.

Autor:
Antonín Baďura



Je mou povinností zde poděkovat vedoucímu práce Mgr. Tomáši Nečasovi, Ph.D., za významnou pomoc při tvorbě mé práce po stránce teoretické, praktické i formální. Tato práce byla vytvořena za finanční podpory Jihomoravského kraje.

Prohlašuji, že svou práci na téma Mlžná komora s termoelektrickým chlazením jsem vypracoval samostatně pod vedením Mgr. Tomáše Nečase, Ph.D. a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Dále prohlašuji, že tištěná i elektronická verze práce jsou shodné a nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a změně některých zákonů v platném znění.

V Brně dne 11. února 2016

.....

Znění práce bylo dodatečně upraveno 12. května 2016.

Abstract

BAĎURA, Antonín. The Cloud Chamber with Thermoelectric Cooling. Brno, 2016. Grammar school Brno, třída Kapitána Jaroše.

The main purpose of this thesis was to design and create a functional prototype of a diffusion cloud chamber, which could be applied in education. There were used thermoelectric elements cooled by water to reach needful environment for observation of track of ionizing radiation. Furthermore particles and radiation observed in the chamber were described, including characterization of their tracks. Result of the work is a easily operated cloud chamber, well usable in education. Attention has been also paid to observation and experiments with various emitters of ionizing radiation. The sequence of photographs so formed is attached. The work will continue through new experiments with different emitters in diverse conditions.

Keywords Cloud chamber, particle detector, diffusion, thermoelectric element, ionizing radiation, supersaturated vapour.

Abstrakt

BAĎURA, Antonín. Mlžná komora s termoelektrickým chlazením. Brno, 2016. Středoškolská odborná činnost. Gymnázium Brno, třída Kapitána Jaroše.

Hlavním účelem této práce bylo navrhnout a zkonstruovat funkční prototyp difúzní mlžné komory uplatnitelný ve školství. K vytvoření potřebného prostředí pro detekci ionizujících částic bylo využito termoelektrických článků chlazených vodou. Dále byly popsány částice a záření v komoře pozorovatelné, včetně charakteristik stop, které zanechávají. Výsledkem práce je snadno ovladatelná mlžná komora dobře upotřebitelná ve vyučování. Pozornost byla věnována také pozorování a experimentům s různými zářiči ionizujícího záření, z čehož vzniklá série fotografií je přiložena. Práce by měla pokračovat rozvojem pozorování a experimentů s novými zářiči v různých podmínkách.

Klíčová slova Mlžná komora, částicový detektor, difúze, termoelektrický článek, ionizující záření, přesycené páry.

Obsah

1 Úvod a cíl práce	6
1.1 Úvod do problematiky	6
1.2 Cíl a motivace práce	6
2 Teoretická část	7
2.1 Výzkum s pomocí mlžné komory	7
2.2 Princip činnosti mlžné komory	7
2.3 Další detektory částic	9
2.4 Srovnání mlžné komory s jinými detekčními metodami	11
2.5 Pozorovatelné částice	13
3 Praktická část	16
3.1 Konstrukce komory	16
3.2 Chladicí okruh	16
3.3 Osvětlení komory	20
3.4 Systém odpařování	21
3.5 Ovládání komory	22
3.6 Experimenty a pozorování	23
4 Výsledky	31
5 Závěr a diskuse	33
Literatura	34
Seznam obrázků	37
A Fotografie zařízení	38

1 Úvod a cíl práce

1.1 Úvod do problematiky

Mlžná komora je detektor ionizujícího záření, jenž největší rozvoj zaznamenal v první polovině minulého století. Jeho významnou roli ve výzkumu elementárních i složených částic podtrhuje objev pozitronu a mionu, který byl díky mlžné komoře v letech třicátých proveden. Jedná se o tzv. dráhový detektor, tedy zařízení, které zaznamenává průchod částic zobrazením jejich viditelné trajektorie. K dosažení tohoto jevu jsou využívány páry např. alkoholů, které při průletu částice kapalní. Aby mohly zmíněné páry kondenzovat, je nutno dosáhnout v komoře neobvykle nízkých teplot (přibližně -30 °C), což bylo hlavním problémem, se kterým jsem se v práci potýkal.

1.2 Cíl a motivace práce

Jak již bylo naznačeno v předchozích řádcích, hlavním cílem této práce bylo navrhnout a zkonstruovat funkční prototyp difúzní mlžné komory, ve kterém by k dosažení potřebných nízkých teplot využívalo termoelektrických článků.

Motivací pro vytvoření takovéhoho zařízení byly experimenty s mlžnou komorou, jež je součástí inventáře mojí školy. Jedná se o několik desítek let staré zařízení, které je chlazeno pomocí suchého ledu, přičemž výsledky pozorování a experimentů s ním prováděné nebyly ani v nejmenší míře uspokojivé: stopy částic v něm nebyly vůbec nebo pouze velmi málo patrné a celý proces byl poměrně časově náročný. Za největší nevýhodu tohoto zařízení však považuji již zmíněné chlazení pomocí suchého ledu, který není dobře dostupný ani dlouhodobě skladovatelný. Uvedené nedostatky vytyčily vlastnosti, kterých by moje zařízení mělo dosahovat. Především se jedná o bezúdržbový provoz bez nutnosti předchozí přípravy, snadnou a uživatelsky přívětivou obsluhu, relativně kompaktní rozměry s nízkou hmotností a dosažitelnou cenu. Jednoduše tedy o zařízení, které by stačilo zapojit do elektrické sítě a bylo možné s ním ihned pracovat. Tyto vlastnosti rovněž souvisí s využitím zařízení v didaktice, pro které jej koncipuji. Abych mohl splnit stanovený cíl, byl jsem donucen nalézt vhodnou metodu, která dosáhnout dostatečně nízké teploty za splnění výše uvedených podmínek – řeším pro můj záměr bylo použití Peltierových termoelektrických článků.

Kromě samotné konstrukce komory, bylo mým záměrem navrhnout a provést experimenty s komorou realizovatelné, včetně určení typů částic, které lze pozorovat, a popsání stop, jež zanechávají.

2 Teoretická část

Cílem experimentů s částicovými detektory je co nejpřesnější charakteristika pozorované částice – jedná se především o určení její energie, hybnosti a dráhy. Díky těmto údajům lze dále předpovědět její chování v experimentu či vůbec stanovit, o jaký druh částice se jedná. Jednotlivé typy částic jsou ovlivňovány různými ze základních čtyř interakcí – gravitací, elektromagnetickou, silnou jadernou a slabou silou – což představuje účinný prostředek pro identifikaci (pomineme-li gravitační interakci, která je v porovnání s ostatními velice slabá).

Nabité částice, které jsou pozorovány nejčastěji, interagují s elektromagnetickou silou – lze tak přímo pozorovat chování částice v magnetickém poli (například ohyb dráhy částice Lorentzovou silou). Dále může elektrické pole nabitě částice excitovat či ionizovat své okolí (to však mohou i neutrální částice – např. neutron) – následná deexcitace pak poskytuje informaci o energii prolétající částice. Spíše okrajovou metodou je potom detekce rychlých částic pomocí Čerenkovova záření (záření, které vydávají částice pohybující se rychleji než světlo v daném prostředí) v tzv. Čerenkovových čítačích.

Neutrální částice je obtížnější detekovat nežli částice nabitě – identifikují se prostřednictvím sekundárních produktů, které vznikají při jejich interakci s okolím.

2.1 Výzkum s pomocí mlžné komory

Když v roce 1895 objevil W. C. Röntgen rentgenové záření, začal se zářením X experimentovat i britský přírodovědec Charles T. R. Wilson. Ten již dříve zkoumal kondenzaci přesycené páry a v roce 1896 zjistil, že rentgenové záření dokáže vytvářet kondenzační jádra. Svoji aparaturu v následujících letech zdokonaloval a v roce 1911 představil první expanzní mlžnou komoru vybavenou obloukovou lampou a fotoaparátem.

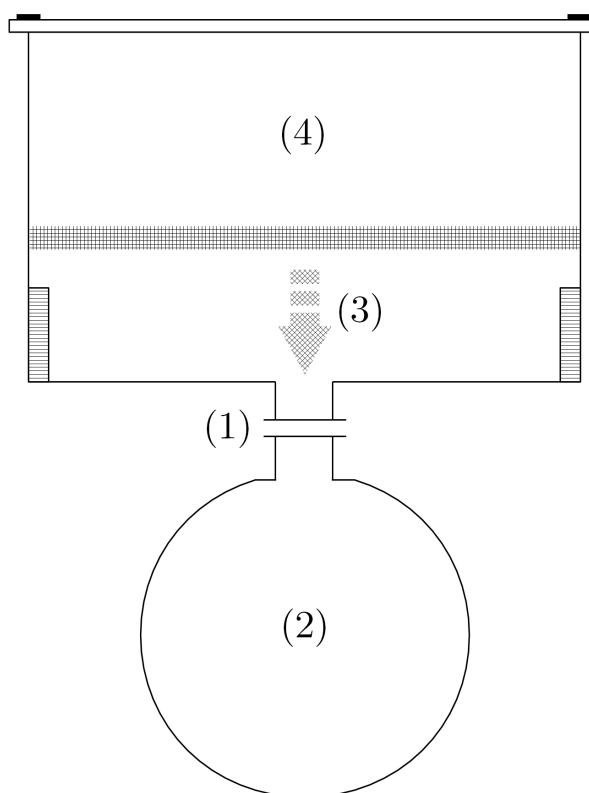
Částice letící v magnetickém poli zakřivuje díky Lorentzově síle svoji dráhu – ze zakřivení pak lze určit znaménko náboje a hybnost částice. Tento jev lze pozorovat i v mlžné komoře a právě umístěním mlžné komory do elektromagnetického pole se podařilo v roce 1932 objevit americkému fyzikovi Carlu D. Andersonovi pozitron a o čtyři léta později také mion. Mlžnou komoru pak roku 1936 zdokonalil americký fyzik Alexander Langsdorf, když postavil první difúzní mlžnou komoru [5].

2.2 Princip činnosti mlžné komory

Nejpodstatnějším prvkem chodu mlžné komory je kondenzace páry ve stopě částice. Pro vznik takovéto situace je nutno splnit několik předpokladů. Celý děj se odehrává v prostředí bohatém na tzv. přesycené páry, to jsou takové páry, jejichž teplota je nižší než teplota rosného bodu, ale zároveň nedošlo k jejich kondenzaci. Toto je způsobeno absencí kondenzačních jader (objektů, na nichž pára zkapalňuje; mohou jimi být např. mořská sůl či prach), v této situaci kondenzují páry až při zvýšeném tlaku. Při průchodu částice

takovýmto prostředím dochází v blízkosti trajektorie částice k vytvoření iontů okolního plynu, ty pak mohou sloužit jako kondenzační jádra a dochází tedy ke zkapalňování. Při vhodném osvětlení lze pozorovat zkondenzované kapičky kapaliny, které vyznačují dráhu částice. Podle způsobu dosažení přesycenosti par se mlžné komory dělí na komory expanzní a difúzní [14].

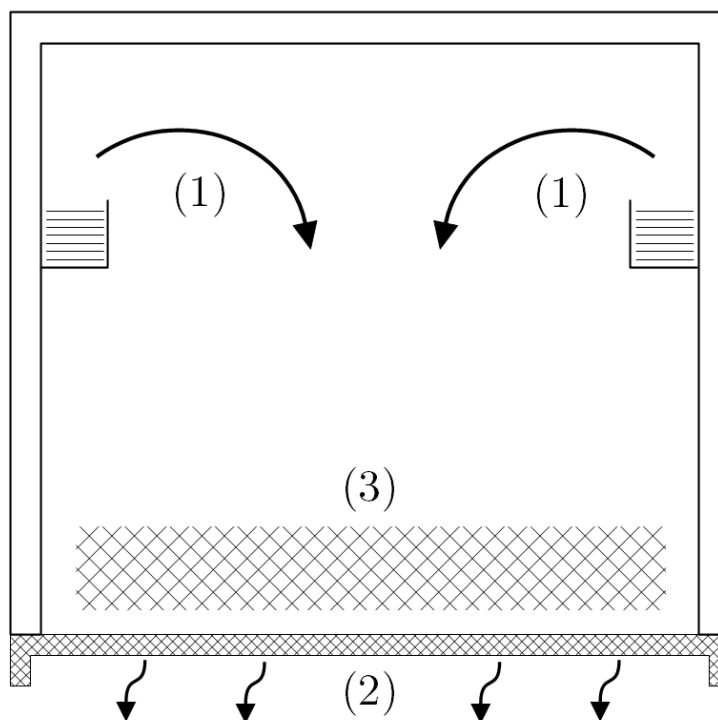
Expanzní mlžná komora Pro dosažení přesycených par se zde používá adiabatická expanze – tedy zvětšení objemu uzavřeného plynu ve velmi krátkém čase a následné prudké snížení tlaku a tedy i pokles teploty (ze stavové rovnice: $pV = nRT$). Pro vysvětlení celého děje použijte obr. 2.1: ventilem (1) dojde ke spojení komory a vzduchoprázdné nádoby (2), píst v komoře (3) rychle zvětší objem plynu (4) a je tak dosažena adiabatická expanze. Nevýhodou tohoto typu mlžné komory je velice krátká doba jednoho cyklu, ve kterém je možno částici detekovat: pohybuje se od 0,05 do 2 sekund. Proto jsou také expanzní mlžné komory většinou spínány časovačem nebo dalšími detektory [14].



Obrázek 2.1: Popis expanzní mlžné komory

Difúzní mlžná komora Jednodušším a novějším typem mlžné komory je difúzní mlžná komora, jejíž konstrukce je předmětem mého zájmu v praktické části. Její schematický popis je zobrazen obr. 2.2. Tento detektor pracuje kontinuálně – pozorování lze provádět v delším časovém úseku. V horní části komory dochází k odpařování vhodného plniva (jsou

používány alkoholy pro jejich nízkou teplotu tání (1), spodní strana komory je ochlazována (teplota dna závisí na teplotě a typu plniva) (2). Díky velkému teplotnímu gradientu dochází k difúzi par a v jisté vzdálenosti mezi chlazeným dnem a zahříváním víkem vznikají přesycené páry (3), tedy situace vhodná pro detekci částic, jak bylo popsáno dříve.



Obrázek 2.2: Popis difúzní mlžné komory

2.3 Další detektory částic

Jaderné emulze Na počátku výzkumu radioaktivity a vysokoenergetického záření stály světlocitlivé fotografické emulze, s jejichž pomocí Henri Becquerel objevil v roce 1896 radioaktivitu. Složení jaderné emulze je podobné tomu, které se používá ve fotografii: nejvýznamnějším činitelem jsou stříbrné soli (nejčastěji jodid stříbrný a bromid stříbrný). Při průletu částice dojde k vytvoření dislokace v krystalické mřížce soli a vznikne latentní obraz, který je chemicky zesílen. Emulze poskytuje velice dobrou prostorovou rozlišovací schopnost (desetiny mikrometru), avšak další údaje lze určit pouze nepřímo [13].

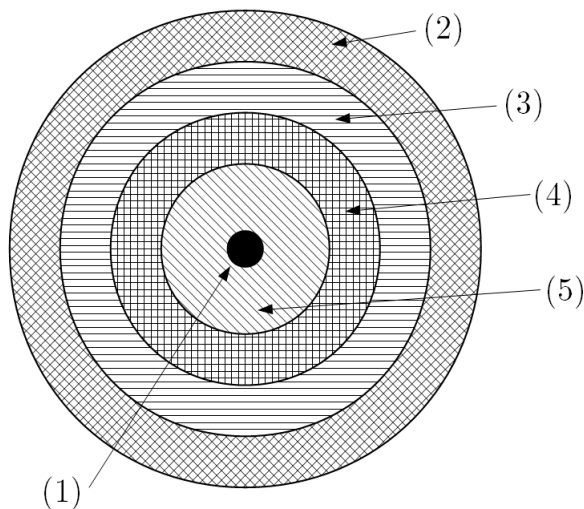
Bublínková komora Příímým nástupcem mlžných komor byly bublinkové komory. V těchto se ionizující částice pohybuje přehřátou kapalinou (nejčastěji kapalným vodíkem), přičemž ztrátou energie způsobuje na své trajektorii lokální var kapaliny – začnou se tvořit bubliny plynu [4]. Takto zobrazená dráha částic se fotografuje a dále analyzuje. Umístěním komory do magnetického pole lze ze zakřivení dráhy určit znaménko náboje a hybnost částice .

Jiskrová komora Poslední ze zobrazovacích komor je jiskrová komora. Zařízení je tvořeno paralelními elektrodami umístěnými inertním plynem, na něž je přivedeno vysoké napětí o hodnotě nižší, nežli je napětí průrazné. Prolétající nabitá částice ionizuje svým elektrickým polem okolní plyn, dojde k překonání průrazného napětí a vzniklé jiskrové výboje vytvářejí obraz trajektorie částice [4]. Citlivá doba komory je řádově 1 μ s, přičemž použitím většího množství elektrod lze dosáhnout dobrého prostorového rozlišení.

Plynové ionizační detektory Často využívanými detektory (např. v dozimetrii) jsou plynové detektory. Jsou tvořeny elektrodami ve vhodném plynu s přivedeným napětím o opačné polaritě. Při průletu částice detektorem dochází k ionizaci okolního plynu, vzniklé ionty jsou přitahovány elektrodami a následný elektrický signál lze měřit a analyzovat. Hodnota přivedeného napětí výrazně ovlivňuje počet detekovaných iontů (při nižším napětí dochází k jejich rekombinaci předtím, než dosáhnou elektrod) – rozlišují se tak tři typy detektorů: ionizační komora, proporcionální a Geiger-Müllerův počítač [12]. Ionizační komory detekují pouze primární ionty vzniklé průletem částice – výsledný proud je tak velmi malý. Při přivedení vyššího napětí jsou primární ionty urychleny do té míry, že samy ionizují okolní částice, a dochází tak k podstatnému zvýšení signálu – takto pracují proporční komory. V Geiger-Müllerově počítači dojde použitím ještě vyššího napětí k ionizaci v celém objemu detektoru, vzniká trvalý výboj, který se zhasí použitím vhodné plynové směsi.

Polovodičové detektory Při průletu částice krystalickou látkou (polovodičem) vzniká pár elektron-díra, který je při přivedení elektrického napětí detekovatelný. Při použití jednoprvkového substrátu však dochází ke ztrátě signálu v šumu vzniklém teplotou a procházejícím proudem, tento problém může být odstraněn snížením teploty, zvýšením čistoty materiálu či použitím přechodu PN, kterýžto způsob je nejobvyklejší. Při průchodu částice přechodem vzniká velké množství děr a elektronů (energie potřebná pro vytvoření jednoho páru jsou jen 3 eV) a dochází tak ke vzniku analyzovatelného elektrického napětí [14]. Pro rozšíření citlivé oblasti – hradlové vrstvy – je detektor (tedy polovodičová dioda) zapojen v závěrném směru. Polovodičové detektory dosahují velmi dobrého časového a energetického rozlišení.

Scintilační detektory Průletem částice některými látkami (tzv. scintilátory) může dojít k excitaci okolních atomů do vyšší energetické hladiny a při jejich následné deexcitaci se získaná uvolní ve formě viditelného světla nebo UV záření. Tohoto jevy využívají scintilační detektory: světelný signál ze scintilátoru (anorganické či organické krystaly, vzácné plyny) zachycují ve fotonásobiči (zařízení, které přemění světelný impuls na zesílený elektrický signál) a výsledný impuls je dále analyzován. Zesílení impulsu trvá ve fotonásobiči řádově 10^{-9} s, což umožňuje přesné měření doby průchodu scintilátorem.



Obrázek 2.3: Schematická podoba složeného detektoru (zde ATLAS)

Složené detektory Některé z výše uvedených detektorů bývají součástí větších a obsáhlejších detektorů v urychlovačích částic, které analyzují děje v urychlovači v místě srážky (1) – viz obr. 2.3. Jednou z nejdůležitějších subdetektorů ve většině urychlovačů je kalorimetr, tedy přístroj, který měří energii částic jejich podstatným zpomalením nebo úplným zastavením. Většinou se používají tzv. vzorkovací kalorimetry skládající se ze substrátu, který částici zpomalí, a detektoru (např. scintilátor či ionizační komora), jež změří zbylou energii. Kromě kalorimetrů (elektromagnetických (3) i hadronových (4)) se složené detektory skládají z dráhových detektorů (5), měřících přesné trajektorie částic, mionových detektorů (2) či jiných měřících zařízení, dle povahy experimentu [12]. V takovýchto detektorech se daří zachytit většinu déle žijících částic, avšak například miony se daří pouze zpomalit a neutrina procházejí v drtivé většině nepozorována.

2.4 Srovnání mlžné komory s jinými detekčními metodami

Detektory, kterým jsem se věnoval v této kapitole se odlišují svým určením, přesností i jejich využitím v současné době. Nejdéle používané detektory – jaderné emulze – jsou například i dnes uplatněny v experimentu OPERA (detekce mionových neutrin), ale již využití mlžných komor je v dnešní době minimální, stejně jako i provoz jiskrových komor, které byly nahrazeny moderními plynovými detektory. Přestože k vrcholnému využití bublinkových komor došlo v 70. letech minulého století, i dnes je lze nalézt v částicových experimentech. Přes uvedené výjimky byly tyto detektory v drtivé většině nahrazeny moderními přístroji, které mohou pracovat kontinuálně a po dlouhou dobu (je tak umožněno statistické šetření), jež měřené impulsy převádějí na dobře analyzovatelný elektrický

¹hodnota závisí na rozměrech detektoru

Detektor	Časové rozlišení [s]	Prostorové rozlišení [m]	Mrtvá doba [s]	Objem [m ³]
Jaderná emulze	–	10 ⁻⁶	–	do 10 ⁻²
Expanzní mlžná komora	10 ⁻²	5 · 10 ⁻⁴	100	do 10 ⁻¹
Difúzní mlžná komora	10 ⁻²	5 · 10 ⁻⁴	10	10 ⁻² –10 ⁻¹
Bublinková komora	10 ⁻³	5 · 10 ⁻⁵	1	do 5
Jiskrová komora	10 ⁻⁶	5 · 10 ⁻⁴	10 ⁻³	do 1
Ionizační komora	10 ⁻³	N ¹	10 ⁻²	10 ⁻⁶ –10 ⁻¹
Proporcionální a Geiger-Müllerův počítač	10 ⁻⁶	N ¹	10 ⁻⁴	10 ⁻⁶ –10 ⁻²
Polovodičový detektor	10 ⁻⁸	5 · 10 ⁻³	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶ –10 ⁻²
Scintilační detektor	10 ⁻⁸	N ¹	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶ –10 ⁻²

Tabulka 1: Srovnání detekčních metod [14]

signál a jejichž obsluha je snadná. Mezi tyto patří zejména plynové detektory (MWPC – mnohohrátkové proporcionální komory či driftové komory) a polovodičové detektory [15].

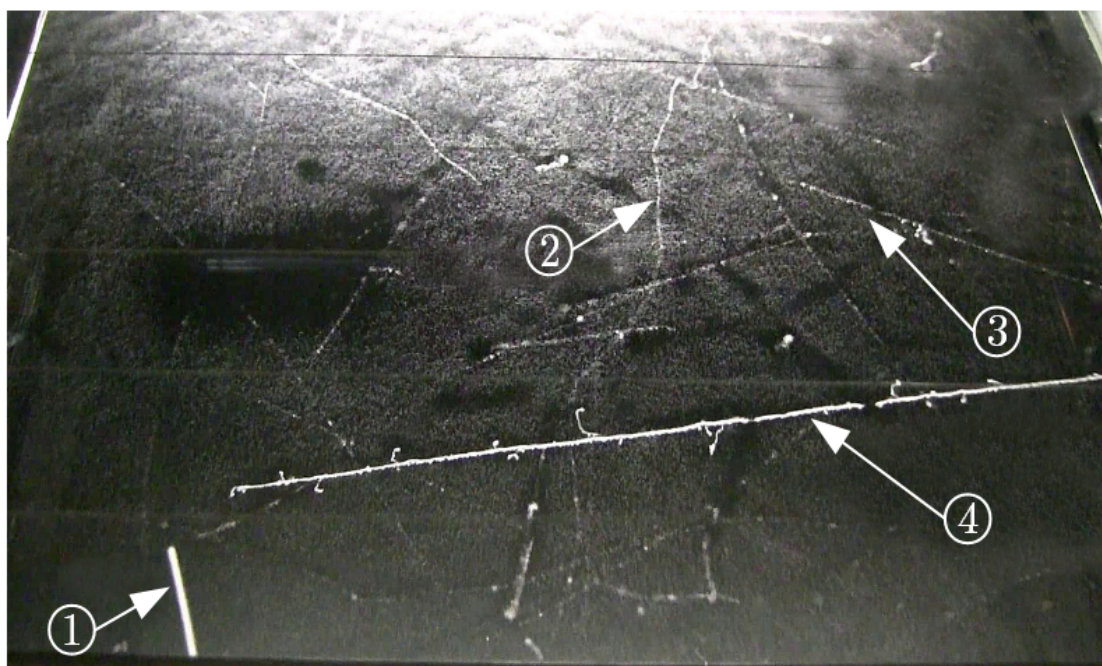
V tabulce 1 srovnávám nejvýznamnější činitele, kterými lze charakterizovat přesnost a určení jednotlivých detektorů.

- **časové rozlišení** – nejmenší možný časový interval mezi dvěma detekovatelnými průlety částice
- **prostorové rozlišení** – minimální vzdálenost dvou částic, kterou je zařízení schopno rozlišit
- **mrtvá doba** – časový interval po průchodu, během kterého není zařízení schopno detekovat zařízení další
- **objem** – obvyklý objem

Z tabulky i výše uvedených informací vyplývá, že mlžná komora není v dnešní vědě dobře upotřebitelná, nabízí sice dobré prostorové rozlišení, ale její provoz je náročný a nedokáže pracovat v delším časovém úseku. Proto je také její využití omezeno především na didaktiku a popularizaci vědy.

2.5 Pozorovatelné částice

Podle dostupných zdrojů se mi podařilo zjistit, že v mlžné komoře lze v experimentální praxi pozorovat následující částice: elektrony (na obr. 2.4 (2) a (3)), pozitrony, protony (4), miony, alfa (1) a gama záření [8] [10]. Identifikovat zmíněné částice z fotografií jejich stop je možné z následujících parametrů: délky a šířky stopy a chování částice v magnetickém poli. Z délky a šířky stopy lze je možné přibližně určit energii či hybnost částice (částice s vyšší rychlostí zanechává tenkou a dlouhou stopu), energii částice je rovněž možné určit podle tvaru stopy, neboť částice s nízkou energií mají dráhu nepravidelnou (mají nižší hybnost – při srážce se snáze vychýlí)[6]. Další velmi významnou metodou je umístění mlžné komory do homogenního magnetického pole – u nabitých částic dojde k ohybu jejich dráhy podle Lorentzovy síly ($\vec{F} = Q(\vec{v} \times \vec{B})$). Z uvedeného vztahu lze odvodit, že u částice s nižší hybností bude pozorované zakřivení výraznější nežli u částice s hybností vyšší. Díky této metodě je rovněž možné určit znaménko náboje, neboť dráha kladné částice se bude zakřivovat na opačnou stranu než dráha záporné částice (vektor \vec{F} bude opačný).



Obrázek 2.4: Fotografie stop částic (přirozené pozadí) v difúzní mlžné komoře na hoře Pic du Midi (2877 m n. m.)

Částice alfa Částice alfa jsou představovány jádry helia 4 (${}^4_2\text{He}^{2+}$ – tedy částicemi s dvěma protony a neutrony) – jedná se tak o částice ionizující. K jejich vzniku dochází při alfa přeměně, kdy se izotop radioaktivního prvku přemění na izotop prvku s atomovým číslem

nižším o 2 (viz obecná rovnice č. 1 [17]):



Takto vzniklý prvek však nemusí být stabilní a může se dále rozpadat. Lze tak vytyčit tzv. rozpadové řady, podle kterých se prvky přeměňují: přirozené jsou tři a tyto jsou zakončeny u stabilních izotopů olova [16]. Poločas přeměny u jednotlivých prvků pak ukazuje, jak je daný izotop aktivní.

Stopa částice alfa v mlžné komoře je široká a krátká – to je dáno relativně nízkou rychlostí (v porovnání s ostatními typy záření) a také nízkou pronikavostí (částice alfa pro svou velkou hmotnost i náboj rychle interagují s okolním prostředím).

Částice beta Jako částice beta se označují elektrony či pozitrony, které vznikají při beta minus (β^-), resp. při beta plus přeměně (β^+). V případě obou typů přeměny sice dochází k zachování celkového počtu nukleonů v jádře, ale za beta minus přeměny se transmutuje neutron na proton (zůstávající v jádře) a na elektron s elektronovým antineutrinem, jež uniknou, u beta plus přeměny se pak proton mění na neutron, pozitron a elektronové neutrino. Ze zmíněných údajů vyplývá, že za β^- přeměny vzniká nový atom s vyšším atomovým číslem o 1 (rovnice č. 2), u β^+ přeměny pak izotop se stejnou měrou zmenšeným atomovým číslem (rovnice č. 3 [17]):



V rozpadových řadách zmíněných u alfa částic se atomy nepřeměňují pouze přeměnou α , nýbrž i přeměnami β – z jediného zářiče tak můžeme pozorovat vícero typů emitovaných částic. Beta částice jsou přibližně $1,4 \cdot 10^4 \times$ méně hmotné nežli částice alfa a mají rovněž podstatně menší průřez – následkem toho jsou jejich pozorované stopy úzké a výrazně delší. Jak již bylo nastíněno v úvodu kapitoly, částice o nižší rychlosti snáze změňují svoji dráhu po srážce – toto je dobře patrné na obr. 2.4: (2) představuje elektron s nízkou rychlostí a (3) naopak s rychlostí vyšší.

Gama záření Gama záření (γ) je elektromagnetické záření o frekvenci vyšší než $2,42 \cdot 10^{18}$ Hz [7]. Elektromagnetické záření nenesé žádný náboj ani hmotnost – nemůže tedy jednoduše ionizovat okolní plyn za vzniku kondenzačních jader. Svě okolí může ovlivňovat jinými cestami: fotoelektrickým jevem, Comptonovým rozptylem či vytvořením páru elektron-pozitron [8]. Při fotoelektrickém jevu předá foton γ všechnu svoji energii elektronu z obalu okolního atomu, která umožní elektronu opustit atom a dále ionizovat své okolí (jako částice β^-) – tento jev je dominantním při energii fotonu do 50 keV. Comptonův rozptyl je převažujícím efektem u fotonů s energií 50 keV – 10 MeV a představuje opět

předání energie z fotonu na elektron v obalu, tentokrát však kromě úniku elektronu vzniká i nový energetický foton. Pro vytvoření elektronového–pozitronového páru je potřeba nejvyšší energie (alespoň 1,02 MeV), přičemž pozitron ve velmi krátké chvíli anihiluje za vzniku dvou energetických fotonů. Stopy gama záření jsou pro poměrně složitou cestu, kterou své okolí ionizují, nespojitě a zakřivené [8].

Kosmické záření Jako kosmické záření se označují vysokoenergetické částice, které dopadají na povrch Země a jež pocházejí z okolního vesmíru. Tyto (tzv. primární složka) mohou dále interagovat v atmosféře Země a vytvářet tak tzv. kosmickou spršku (neboli sekundární složku kosmického záření). Primární částice jsou v drtivé většině představovány protony a alfa částicemi, sekundární složka pak především mezony π , miony a elektrony [9]. Problematické je zachycení kosmického záření v mlžné komoře nejen pro jeho vysokou energii, ale zároveň i kvůli směru, kterým přichází – záření většinou dopadá kolmo na projekční rovinu komory a poměrně tenká citlivá vrstva přesycených částic nedokáže zachytit částici pohybující se vertikálně.

3 Praktická část

V praktické části věnuji hlavnímu předmětu mé práce – návrhu konstrukce a stavbě difúzní mlžné komory, v závěru pak i experimentům, které lze s tímto zařízením provádět, a popisu stop pozorovaných částic.

3.1 Konstrukce komory

V této části je podrobně popsána stavba zařízení a zároveň i diskutovány postupy, které jsem při konstrukci použil.

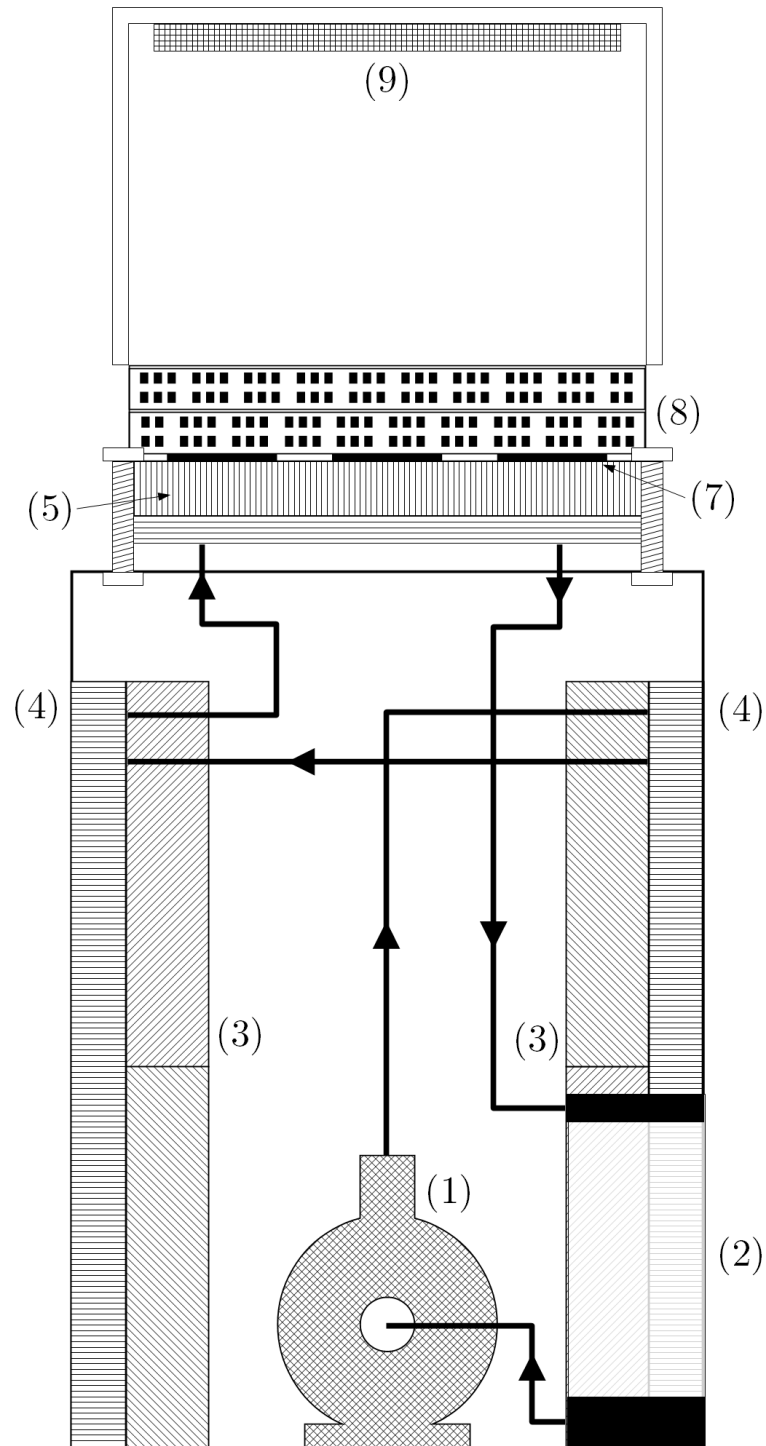
Celé zařízení je usazeno v kostře ze svařovaných hliníkových profilů, která je kryta pláštěm z hliníkového plechu. Hliník, jako základní konstrukční materiál, jsem vybral především pro jeho nízkou hustotu a dále i pro pevnost a dobrou opracovatelnost. Nevýhodou je pak nutnost svařování v ochranné atmosféře – tento úkon jsem zadal odborné firmě. Výška zařízení je 560, šířka 233 a hloubka 220 mm. Značné rozměry zařízení jsou způsobeny snahou dosáhnout co možno největší zobrazovací plochu komory – této problematice se budu dále věnovat v kapitole 3.2. Zařízení je napájeno spínaným zdrojem, který mění síťové napětí na 12 V, s maximálním příkonem 720 W – obvyklý příkon zařízení je pak 470 W. Schematický náčrt komory je vyveden na obr. 3.1, na který se odkazují i v následujících kapitolách.

Hodnota teploty dna komory, při které dochází k difúzi par, záleží na několika parametrech: na typu použitého média, v jehož parách jsou částice zobrazovány (přesněji na jeho součiniteli teplotní vodivosti a na entalpii jeho par), objemu vypařovaných par a na výšce komory [18]. Jako plniva jsem použil (z důvodů uvedených v kapitole 3.4) isopropylalkohol – v tomto případě pak dno komory musí být vychlazené na přibližně $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ [5].

3.2 Chladicí okruh

Nejnáročnější i nejvíce nákladnou částí mnou konstruované mlžné komory byl chladicí okruh. Jak je i uvedeno v názvu práce, použil jsem ve svém zařízení k chlazení Peltierovy termoelektrické články. Nežli se však budu věnovat popisu chladicího systému, který jsem zkonstruoval, stručně zmíním další možnosti chlazení mlžné komory, s kterými je možné se setkat.

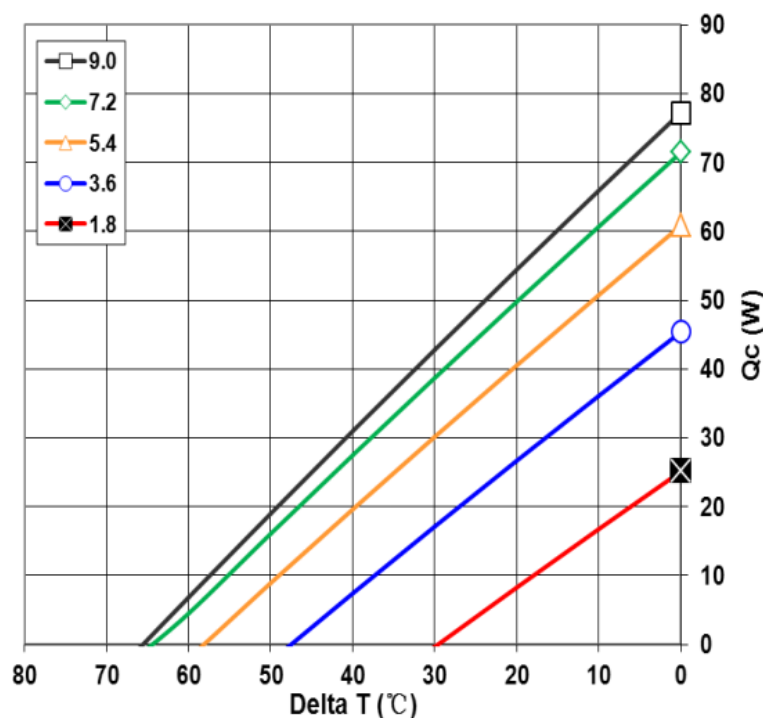
Nejobvyklejším způsobem chlazení školních mlžných komor je užití suchého ledu ($-79\text{ }^{\circ}\text{C}$), v některých případech i tekutého dusíku ($-195\text{ }^{\circ}\text{C}$) [1]. Důvodem, kvůli kterému jsem zmíněná chladicí media nepoužil, je nízká dostupnost těchto látek a náklady spojené s jejich pořizováním. Ještě častěji používanou a efektivnější metodou (zvláště u větších komor – např. v JE Dukovany) je potom chlazení pomocí kompresorového chladicího systému, tyto ale nejsou pro svoji značnou hmotnost pro moji práci vhodné. Výhodou těchto způsobů chlazení je velká plocha, kterou je možno chladit, a tedy i rozměrné pole



Obrázek 3.1: Schematický náčrt mlžné komory (černé linie s šipkami naznačují proudění chladicí kapaliny)

pro detekci částic, čehož dosažení by bylo s použitím termoelektrických článků značně náročné i nákladné. Cílem práce však není konstrukce mlžné komory s co největší detekční plochou – mohl jsem se tedy uchýlit k použití Peltierových článků.

Termoelektrické články pracují na základě Peltierova jevu: průchodem proudem polovodiči typu P a typu N v sérii zapojenými dochází na jejich rozhraní k produkci či pohlcování tepla [2]. Každý článek obsahuje množství takovýchto předělů – na článku je tak vytvořena jedna strana, která teplo pohlcuje a druhá, která jej produkuje. Při velkém rozdílu teplot na obou stranách však článek dosahuje nízké účinnosti. Na grafu (obr. 3.2) je uvedena závislost chladicího výkonu na rozdílu teplot na článku (rozdíl teploty na horní studené a spodní teplé straně) typu TEC1-12709 podle procházejícího proudu:



Obrázek 3.2: Závislost chladicího výkonu na rozdílu teplot na článku TEC1-12709

Z grafu lze tedy určit, že např. pro $\Delta T = 50$ °C a $I = 9$ A je účinnost chlazení jen 10 % (el. odpor článku je při 25 °C na teplé straně 1,488 Ω). Z toho vyplývá, že pokud je nutno dosáhnout dostatečného chladicího výkonu, je třeba řádně chladit i zahřívající se stranu článku. K chlazení je možno použít vzduch nebo kapalně médium. Vzduchem chlazený článek je umístěn na vhodném kovovém chladiči, za kterého je teplo odváděno pomocí ventilátoru, vodou chlazený je rovněž připevněn ke kovovému chladiči, který je ale chlazen kapalinou a voda dále ztrácí teplo v radiátorech s ventilátory. Po experimentech s oběma variantami jsem zvolil chlazení pomocí kapaliny (použil jsem destilovanou vodu), neboť voda dokáže rychleji odvádět teplo z chladiče (měrná tepelná kapacita vody je

asi čtyřikrát vyšší nežli vzduchu), což je u termoelektrických článků nezbytné (je nutno udržovat konstantní nízkou teplotu na zahřívající se straně článku).

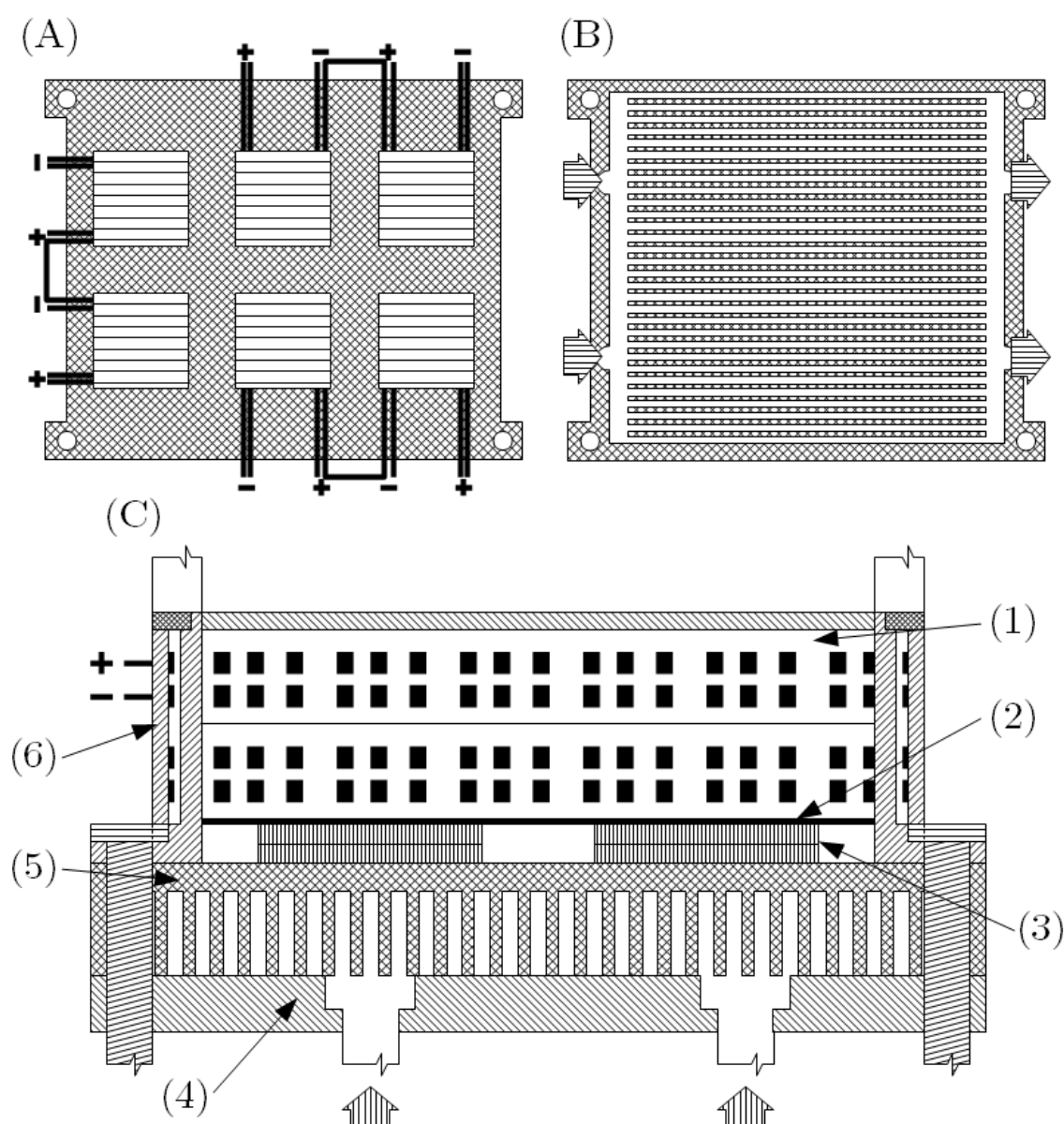
I přes velmi dobré odvádění tepla z horké strany článku jsem však nedosahoval potřebné teploty (nejníže jsem dosáhl -25 °C s mizivým chladicím výkonem). Začal jsem tedy experimentovat s dvojicí článků vertikálně spojených (typ článku TEC1-12709), přičemž spodní článek chladil teplotu stanu vrchního článku. Takováto soustava však nemohla dosahovat dobrých výsledků, neboť spodní článek nemohl dostatečně chladit horní článek o stejném výkonu. Tento problém jsem vyřešil snížením příkonu horního článku (použil jsem poloviční napětí). Ještě lepších výsledků jsem pak dosáhl výměnou spodního článku TEC1-12709 za výkonnější typ TEC1-12710 (toto vylepšení pochází z [3]). Články mezi sebou i s chladičem jsem spojoval pomocí teplovodivé pasty, která zajistila vyplnění případných nerovností mezi jednotlivými povrchy a tedy i lepší odvod tepla.

Chladicí systém komory je složen ze šesti výše uvedených dvojic termoelektrických článků (na obr. 3.1 je to (7)), hliníkového chladiče (5), čerpadla (1), radiátorů (4) s ventilátory (3) a expanzní nádoby (2). Jak již bylo zmíněno, vrchní (studený) článek v každé dvojici vyžaduje nižší napětí, čehož jsem docílil zapojením těchto článků po dvou do série (viz na obr. 3.3 (A)). Články (viz na obr. 3.3 (C):(3)) jsou uspořádány v mřížce (3×2) na hliníkovém chladiči (5), mezery mezi nimi byly vyplněny pěnovým polystyrenem. Chladič byl odbornou firmou vyfrézován a je krytý dnem z plexiskla (4). Tvar žebroví chladiče byl zvolen pro co nejrovnoměrnější a nejrychlejší odvádění tepla: chladicí kapalina vstupuje ve dvou otvorech, protéká skrze systém žebroví a na druhé straně vytéká opět dvěma vývody (obr. 3.3 (B)).

Cirkulaci vody v okruhu zajišťuje čerpadlo o maximálním průtoku $1,5\text{ m}^3\text{h}^{-1}$, výtlaku 3,7 m a příkonu 23 W. Voda je chlazená ve dvou radiátorech pomocí čtyř ventilátorů, tři o průtoku vzduchu 234 a jeden o $184\text{ m}^3\text{h}^{-1}$. Pro vyrovnávání objemu kapaliny (například kvůli výparu vody v napojení hadic) byla do okruhu připojena expanzní nádoba, pomocí které je možné kapalinu doplňovat. Propojení jednotlivých prvků je zajištěno pomocí polyethylenových hadic o průměru 10 mm.

Aby bylo dno komory chlazené rovnoměrně, byla pomocí teplovodivé pasty na chladnou stranu článků připevněna měděná deska (o síle 0,55 mm a rozměrech $180\times 120\text{ mm}$) v černé barvě (na obr. 3.3 (2)). Černá barva byla zvolena kvůli lepší pozorovatelnosti stop částic. Deska je na svém místě udržována pomocí rámu z plexiskla (6), který je zároveň nosičem osvětlení komory (1).

Vinou nerovnoměrného spojení článků dohromady i k chladiči a výrobními vadami, není teplota na dnu komory homogenní, ale pohybuje se mezi -33 °C a -30 °C . Teplota v komoře je dále podstatnou měrou ovlivňována teplotou okolního vzduchu, kterým je okruh chlazený.

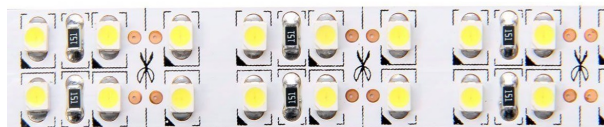


Obrázek 3.3: Řez a pohledy na chladič a chladicí systém

3.3 Osvětlení komory

Řádné osvětlení komory je podmínkou pro dobrou viditelnost stop prolétávajících částic, neboť dráhy je možno pozorovat pouze díky světlu, které se láme v kapičkách zkondenzovaného plniva.

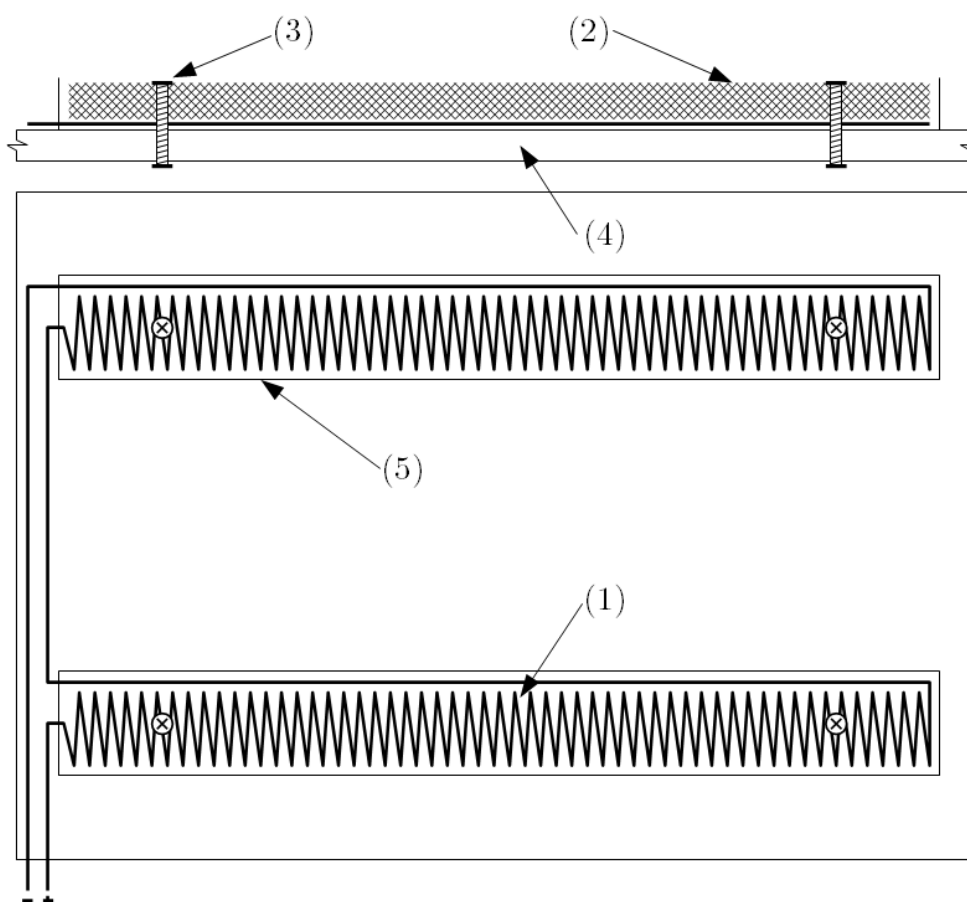
Původní Wilsonova komora byla osvětlena obloukovou lampou, která nabízí vysoký světelný tok, stejně jako později často používané lampy z projektorů. Dále se rovněž nabízí použití výbojkových trubíc. Uvedené zdroje světla však mají několik nevýhod, které mne odradily od jejich použití: jsou příliš prostorově i energeticky náročné a dosahují nízké účinnosti. Proto jsem se rozhodl využít pásu ze svítivých diod (na obr. 3.1 je to (8)). Pás je složen z paralelně zapojených dílů o šesti diodách a je možné jeho délku upravovat. V typu,



Obrázek 3.4: Část použitého pásu LED

který jsem použil, jsou diody umístěny ve dvou řadách o 240 LED na běžný metr s teplotou chromatičnosti 6500 K. Vyzařovací úhel diody 120° a celkový svítivý tok přibližně 1000 lm zajišťuje dostatečné osvětlení celé komory. Při napětí 12 V je celkový příkon osvětlení asi 24 W. Pás je v komoře umístěn ve dvou řadách po jejím celém obvodu (viz obr. 3.3 (1)).

3.4 Systém odpařování

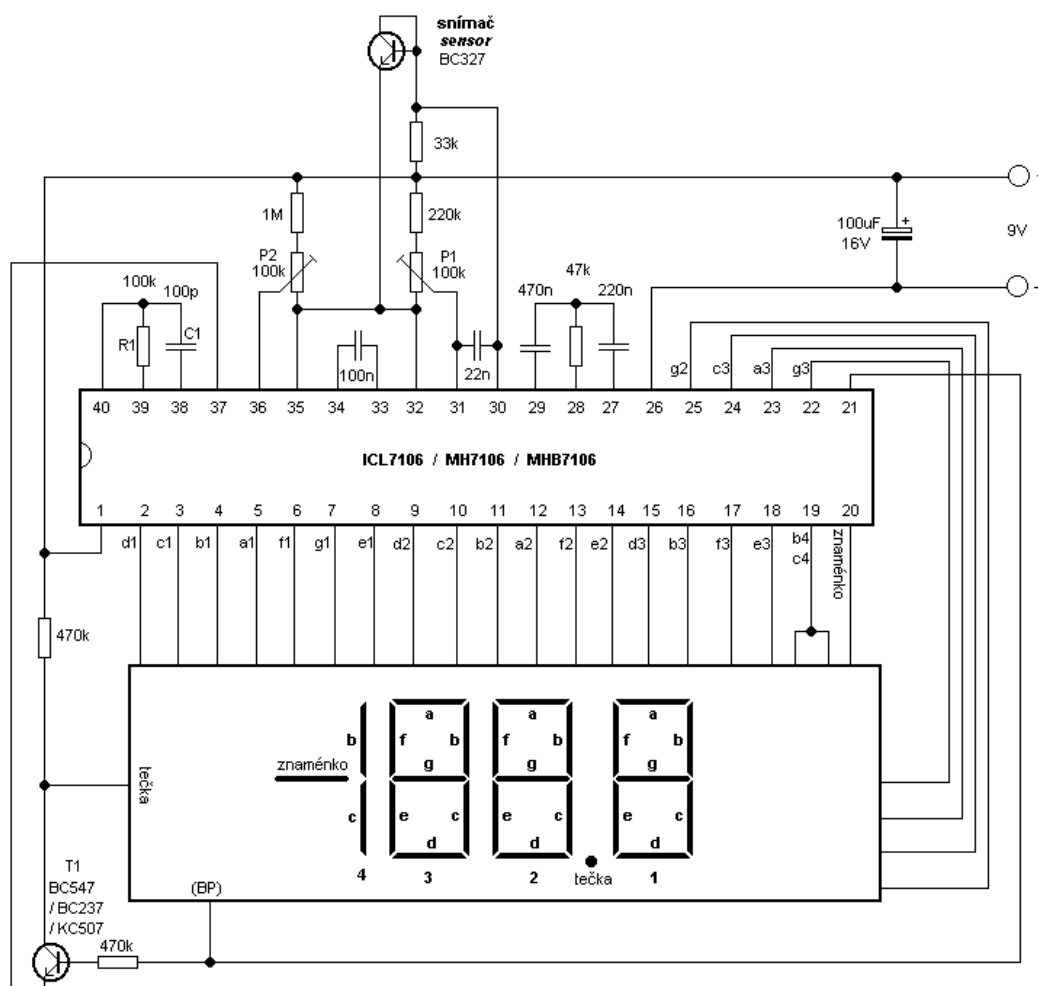


Obrázek 3.5: Odpařovací systém

Kromě dostatečného chlazení je velmi důležitým prvkem komory vhodná distribuce plniva, v jehož přesycených parách pak lze pozorovat stopy částic. Plnivem jsou většinou

alkoholy, dříve byl využíván i vodní páry. Alkoholy jsou používány pro jejich nízký bod tání (v komoře nezamrzají) a dosažitelný bod varu – nejčastěji jsou jimi ethylenglykol, ethanol či mnou použitý isopropylalkohol (IPA) [5].

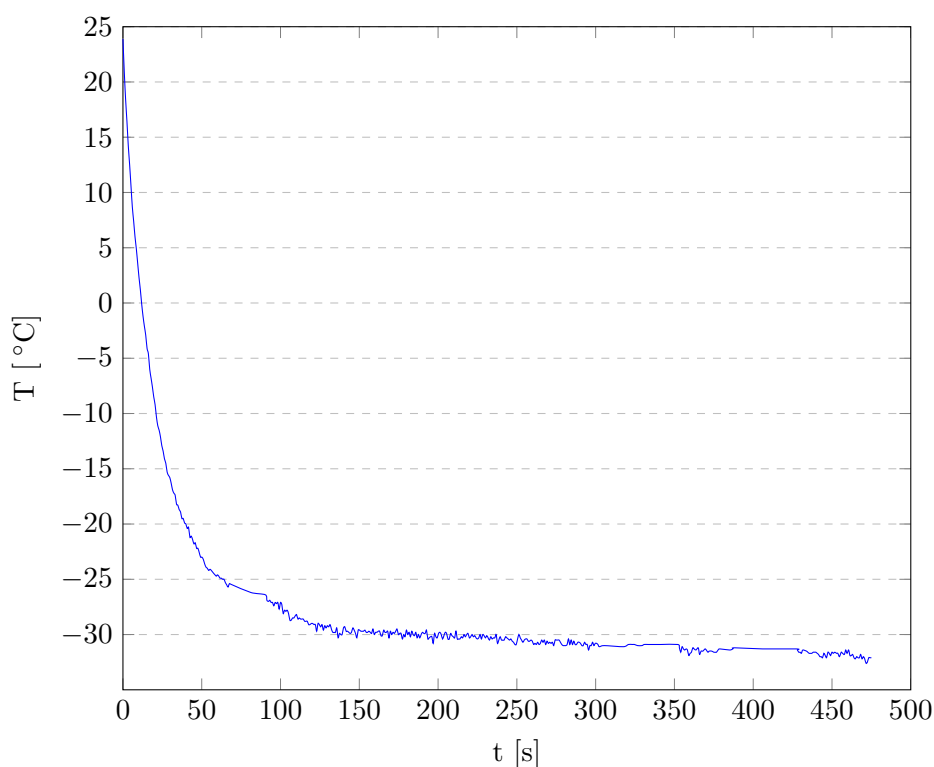
Systém odpařování je tvořen dvěma žlábkami z hliníkového plechu, které se nacházejí na horní straně skleněné komory (na obr. 3.1 je to (9)). Ve žlábkách (na obr. 3.5 (5)) jsou umístěny desky z technické plsti (2) o síle 8 mm, v nichž je napuštěn IPA. Plst je připevněna pomocí šroubů (3), které rovněž spojují žlábkou se stěnou komory (4). Pro zvětšení objemu odpařovaného alkoholu je plst zahřívána odporovým drátem kanthal o průměru 0,5 mm a odporu $6,98 \Omega \text{m}^{-1}$. Drátu jsem použil 2,5 m – topicí výkon tak při 12 V je 0,69 W. Celý žlab se tak zahřívá na přibližně 45°C (teplota varu IPA je 82°C).



Obrázek 3.6: Schema elektronického teploměru, který měří teplotu dna komory

3.5 Ovládání komory

V komoře je možné spínat všechny tři výše uvedené systémy (chlazení, osvětlení a vypařování) samostatně pomocí vypínačů na předním panelu, kde se nachází i centrální vypínač.



Obrázek 3.7: Graf závislosti teploty dna komory na čase (od teploty 24 °C)

Vypařování a osvětlení je spínáno přímo, chladicí systém pak pomocí tří relé, neboť proud jedné dvojice termoelektrických článků je přibližně 5,5 A a celkový proud asi 33 A není možné spínat jediným vypínačem. Dále se v přístrojové desce nachází obrazovka elektronického teploměru, který je v zařízení instalován a jenž měří teplotu dna komory. Elektronické schéma teploměru (obr. 3.6), podle kterého jsem teploměr vyrobil, jsem převzal s laskavým svolením autora ze stránky <http://www.danyk.cz>.

3.6 Experimenty a pozorování

Díky experimentům s dostupnými zářiči jsem zjistil, že z pozorovatelných částic z oddílu 2.5 je možné v této komoře zachytit alfa, beta a gama záření a dále přirozené pozadí, což je směs přirozeného radioaktivního záření vyvolaného podloží a kosmického záření. Jednou z metod analýzy částicových stop bylo v oddíle 2.5 zmíněné použití magnetického pole. Aby bylo možno předvídat a popsat chování nabitých částic v takovémto poli, je nezbytností jeho stejnorodost, čehož lze docílit pomocí tzv. Helmholtzových cívek – tedy dvou kruhových cívek ve společné ose. Touto osou rovněž prochází vektor magnetické indukce – rovina, ve které má být docíleno homogenního pole, tak musí být na vektor (a tedy i na osu) kolmá. To značí, že by se dvojice cívek měla nacházet pod a nad plochou, kde se zobrazují částice, což však z konstrukčních důvodů není u mé komory možné.

Na základě experimentů jsem zjistil, že kvalita pozorovaných stop částic je ovlivněna následujícími faktory: teplotou okolního vzduchu, množstvím vypařovaného isopropylalkoholu a úhlem, pod kterým jsou částice pozorovány. Teplota okolního vzduchu velmi významně ovlivňuje teplotu dna komory, neboť chladicí kapalina je právě dále ochlazována okolním vzduchem, a teplota dna určuje objem přesycených par v komoře, jež jsou citlivou složkou detektoru. Na obr. 3.7 je vykreslen graf závislosti teploty dna komory na čase po sepnutí chladicího okruhu. Z počáteční teploty okolí 24 °C se dno komory zchladí do nejvyšší teploty, kdy lze pozorovat částice (−26 °C), asi za 80 s a pracovní teploty −30 °C dosáhne dno komory za přibližně 200 s. Teplota dále klesá a po 7,5 min se ustálí na −32 °C .

Dalším faktorem je úhel, pod kterým pozorovatel komoru sleduje. Jelikož ke vzniku přesycených par (kde se nachází citlivá oblast komory) dochází v malé vzdálenosti ode dna komory, lze odvodit, že úhel, pod kterým se světlo v kapkách IPA odráží, je výrazně ostrý, a úhel, pod nímž se světlo prochází a láme, značně tupý. Z toho vyplývá, že nejlepší výsledky lze dosáhnout při pozorování z boku detektoru, přesto jsou výsledky i ze stropu komory poměrně uspokojivé.

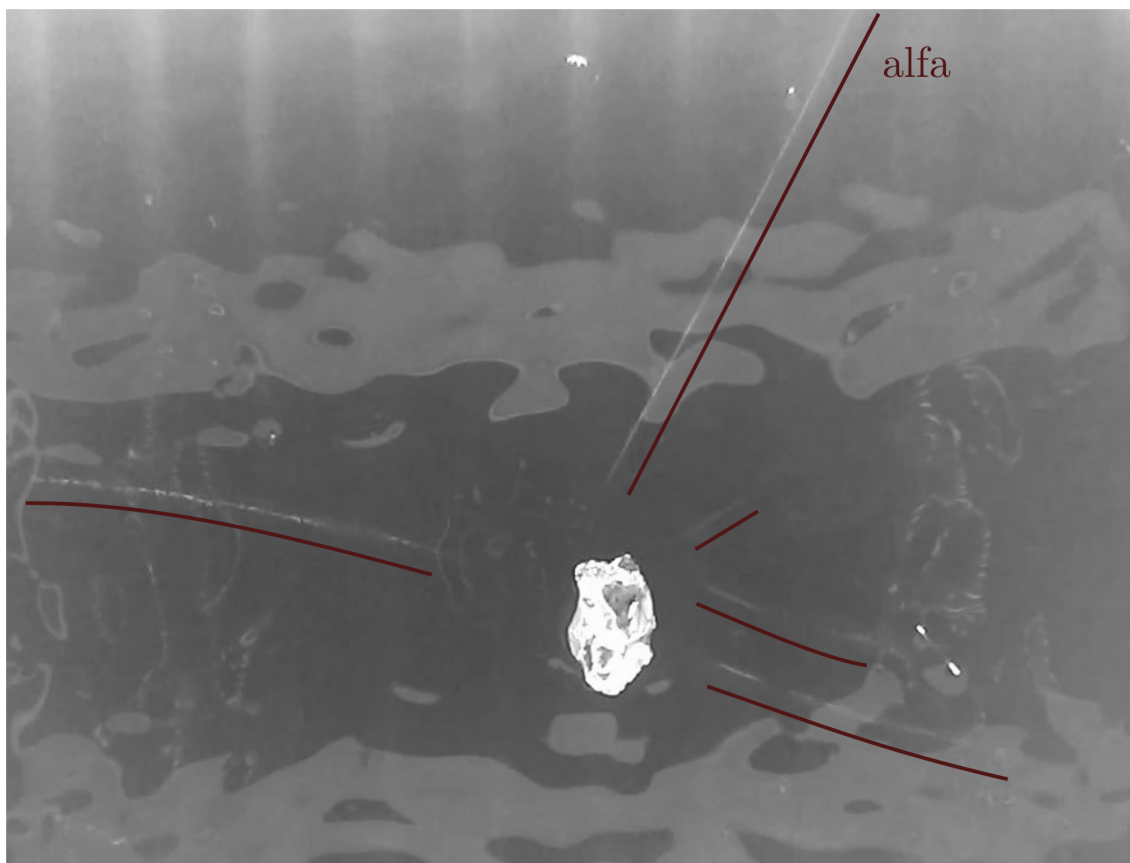
Děje v komoře jsou poměrně rychlé (stopa je zobrazena přibližně 1 s), pro jejich rozbor je tak nejvhodnější je fotografovat a fotografie dále analyzovat. Proměnlivé prostředí v komoře je velmi obtížné zachytit obyčejnou fotografií – místo fotografií jsem tak použil snímky z videosekvence. Problematické je ale samotné zachycení stop snímacím čipem kvůli vysokému kontrastu a odrazům za dna komory (z vrstvy již zkondenzovaného IPA). Následkem toho nejsou stopy na výsledných snímcích tak zřetelné jako ve skutečnosti. Snímání fotografií uvedených v práci probíhalo svrchu, v případě fotografování méně zřetelného záření i zboku. Neboť nevlastním žádný digitální fotoaparát, použil jsem kameru mobilního telefonu o rozlišení 1920×1080 obrazových bodů. Fotografie jsem pořídil černobíle pro eliminaci rušivých prvků.

Částice alfa Pro pozorování alfa částic jsem měl k dispozici úlomek smolince, tedy minerálu UO₂. V drtivém množství je v něm zastoupen izotop uranu 238, který se transmutuje alfa přeměnou na thorium podle rovnice č. 4. Stopy alfa částic tohoto zářiče jsou silné a dobře zřetelné.



Kinetickou energii alfa částice vzniklou z této přeměny lze spočítat ze znalosti celkové energie, která byla v přeměně uvolněna a jež je součtem kinetické energie atomu thoria a α částice (ze zákona o zachování energie):

$$E_{KTh} + E_{K\alpha} = (m_U - m_{Th} - m_\alpha)c^2 \quad (5)$$



Obrázek 3.8: Fotografie alfa částic ze smolince zachycených v mlžné komoře

Ze zákona o zachování hybnosti vyplývá, že velikost hybnosti atomu thoria i alfa částice musí být stejná – lze tak jednoduše rychlost atomu thoria vyjádřit pomocí hmotnosti obou částic a rychlosti alfa částice:

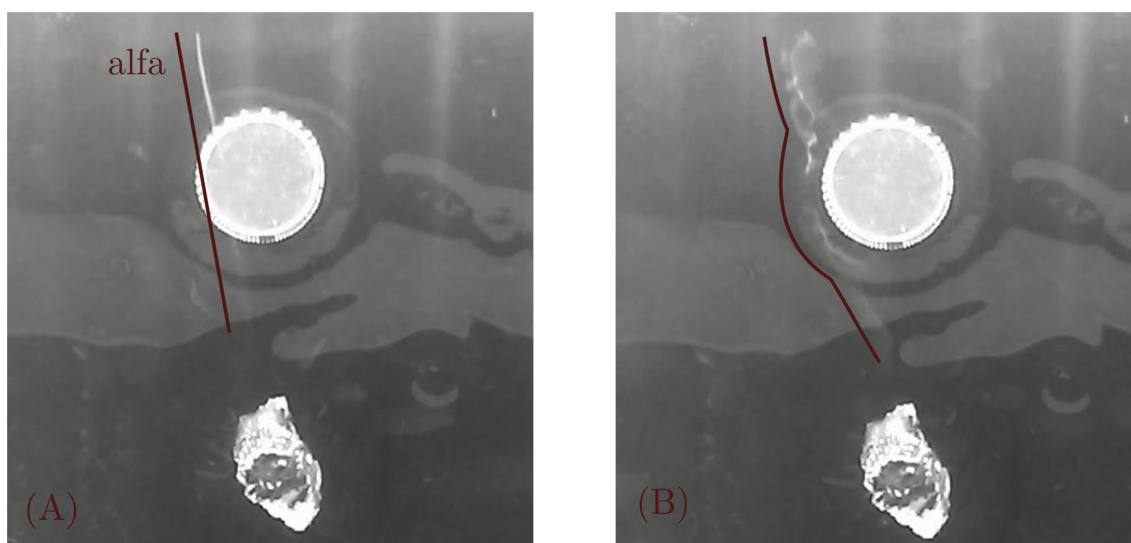
$$\begin{aligned} m_{Th}v_{Th} &= m_{\alpha}v_{\alpha} \\ v_{Th} &= \frac{m_{\alpha}v_{\alpha}}{m_{Th}} \end{aligned} \quad (6)$$

Dosazením rovnice č. 6 do rovnice č. 5 dojde k vyjádření kinetické energie alfa částice:

$$\begin{aligned} E_{KTh} + E_{K\alpha} &= (m_U - m_{Th} - m_{\alpha})c^2 \\ \frac{1}{2} m_{Th}v_{Th}^2 + \frac{1}{2} m_{\alpha}v_{\alpha}^2 &= (m_U - m_{Th} - m_{\alpha})c^2 \\ \frac{1}{2} m_{Th} \left(\frac{m_{\alpha}v_{\alpha}}{m_{Th}} \right)^2 + \frac{1}{2} m_{\alpha}v_{\alpha}^2 &= (m_U - m_{Th} - m_{\alpha})c^2 \\ E_{K\alpha} &= \frac{m_{Th}}{m_{Th} + m_{\alpha}} (m_U - m_{Th} - m_{\alpha})c^2 \end{aligned} \quad (7)$$

Z numerického vyjádření rovnice č. 7 lze zjistit, že alfa částice vzniklá touto přeměnou má kinetickou energii asi 5,2 MeV.

Na obr. 3.8 lze vidět smolinec a zaznačené stopy částic alfa. Přestože, jak bylo zmíněno na začátku kapitoly, jsem neměl možnost vytvořit homogenní magnetické pole, provedl



Obrázek 3.9: Zde lze vidět, jak je zprvu rovná (A) stopa alfa částice ovlivněna magnetickým polem (B)

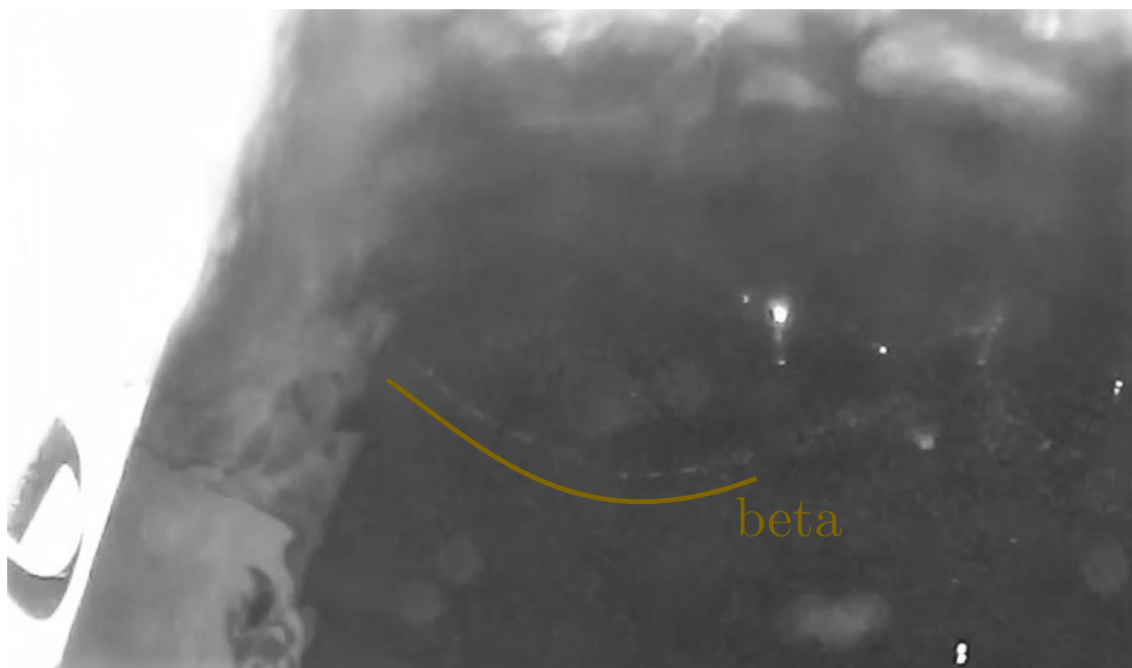
jsem experiment s nehomogenním polem neodymového magnetu. Na obrázku 3.9 lze vidět drobný neodymový magnet, nad kterým je zobrazena stopa alfa částice emitovaná úlomkem smolince. Na obrázku (A) je stopa ještě nezakřivena, neboť pro vysokou hmotnost částice α nemůže být dráha změněna. Na pozdějším snímku (B) se sice již stopa rozplývá, ale ionty vzduchu (kondenzační jádra) jsou ovlivněny magnetickým polem a pozůstatky stopy se pohybují doleva.

Částice beta Jako zdroj β^- částic jsem použil vzorek radioaktivního stroncia 90, které se beta minus přeměnou transmutuje na yttrium (rovnice č. 8).



Jak již bylo uvedeno v kapitole 2.5, částice beta jsou mnohem méně hmotné a mají menší průřez nežli částice α . Následkem toho je jejich stopa poměrně slabá, nicméně poměrně dobře pozorovatelná – problémem však bylo zachytit tyto částice na fotografii. Přesto lze na obr. 3.10 vidět stopu částice β^- snímanou z boku komory. Ze zakřivené stopy je možno soudit, že se jedná o nízkoenergetický elektron zmíněný v teoretické části. Na obr. 3.11 jsou potom zobrazeny elektrony s vyšší energií (soudím tak dle rovné stopy).

Viditelnost stopy je rovněž výrazně ovlivněna rychlostí částice – pomalejší částice dokáže ionizovat větší objem okolního plynu a je tak viditelnější. V rovnici č. 9 je uveden vztah pro výpočet kinetické energie β částice vycházející ze stejného vztahu u částice alfa, přičemž byla zanedbána hmotnost atomu yttria, neboť jeho hmotnost je o šest řádů vyšší nežli hmotnost elektronu. Numericky je potom kinetická energie β částice rovna asi 34,9 keV, tedy hodnotě asi 150krát menší než je energie α částice. Zdánlivě by tak měla β

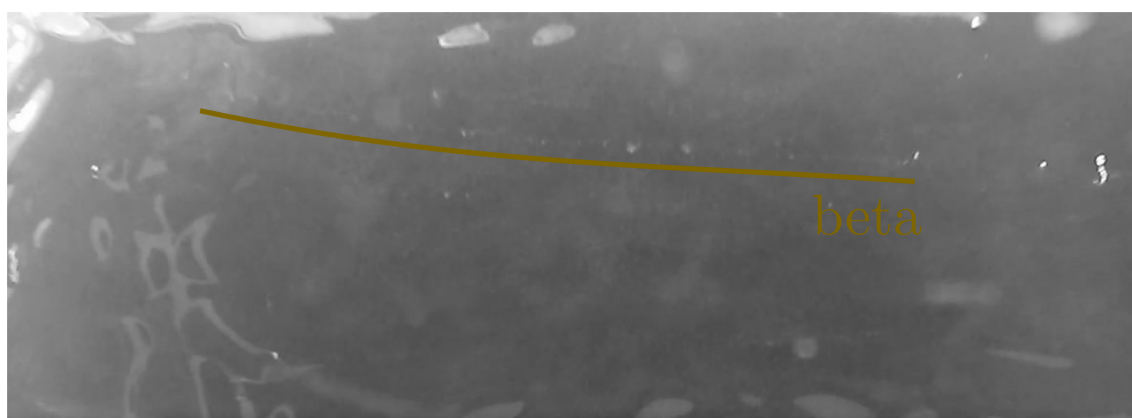
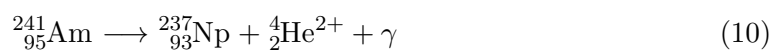


Obrázek 3.10: Fotografie beta částice o nízké energii z rozpadu stroncia

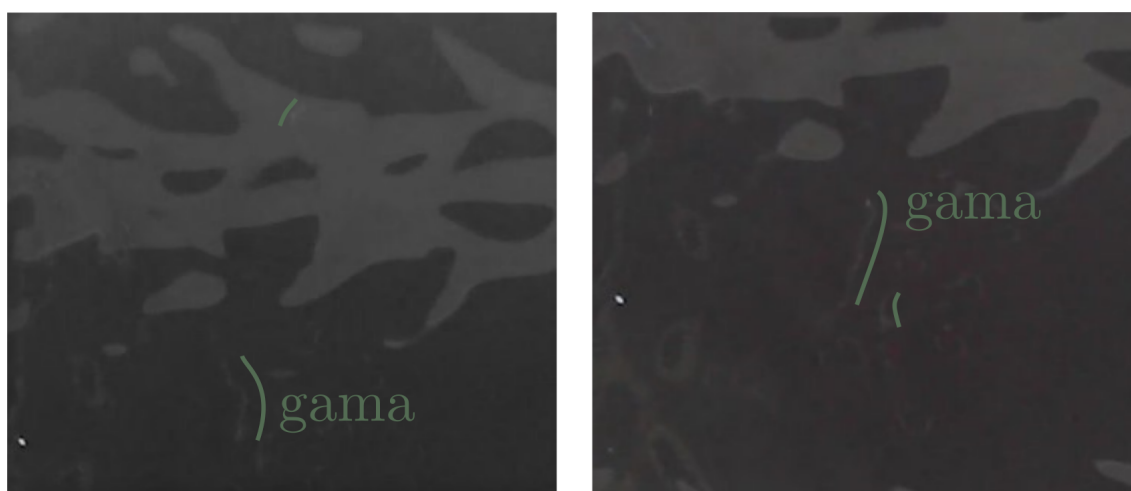
částice vytvořit výrazně viditelnější stopu, hmotnost alfa částice je ale o čtyři řády vyšší a společně s neporovnatelně větším účinným průřezem ji činí daleko zřetelnější.

$$E_{K\beta} = (m_{Sr} - m_Y - m_e)c^2 \quad (9)$$

Gama záření K pozorování gama záření jsem použil vzorek americia 241, které se sice transmutuje na neptunium α přeměnou, ale zároveň dochází k vyzáření energie γ záření (viz rovnice č. 10).

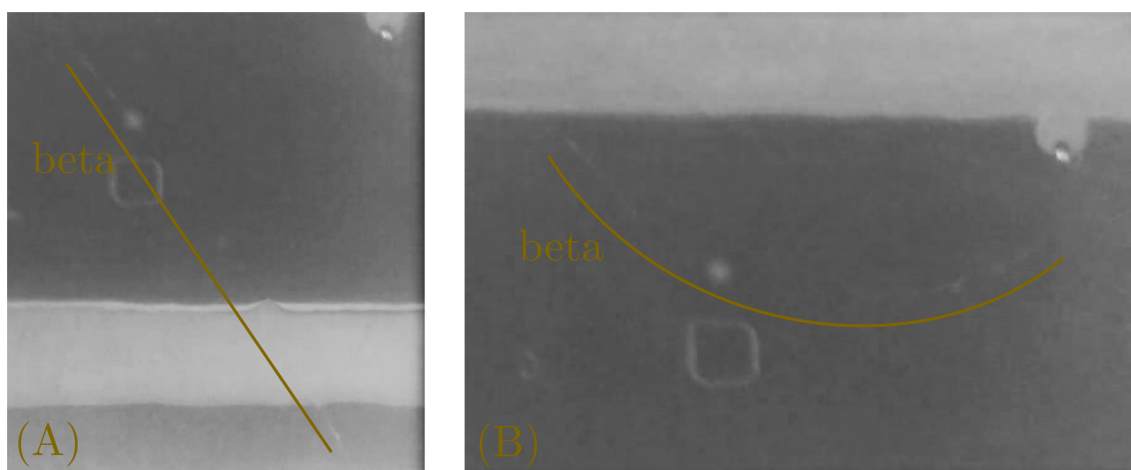


Obrázek 3.11: Fotografie beta částice o vyšší energii z rozpadu stroncia



Obrázek 3.12: Stopy ionizace způsobené průchodem gama záření

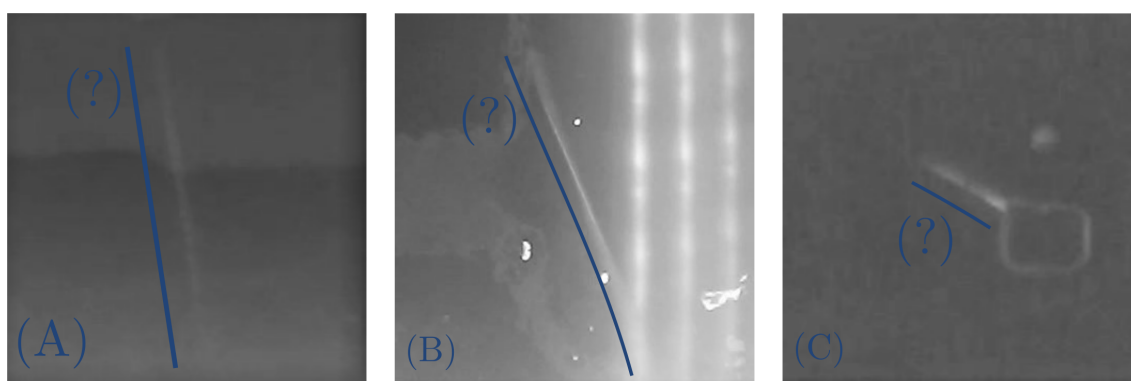
Protože gama záření neionizuje své okolí přímo, ale pomocí dějů zmíněných v kapitole 2.5 (tedy fotoelektrickým efektem, Comptonovým rozptylem a vznikem páru elektron-pozitron), není ani jeho stopa spojitá a jednolitá, ale projevuje se jako soubor menších stop (viz obr. 3.12). Popis tohoto jevu se mi nepodařilo nalézt v dostupné literatuře, proto jsou zmíněné vývody pouze mojí dedukcí založené na znalosti výše uvedených jevů a také na základě pozorování množství nepravidelných stop při vložení zářiče do komory. Zachycení stop gama záření na fotografii předčilo svou náročností α i β částice pro jejich nepatrnost a špatnou viditelnost.



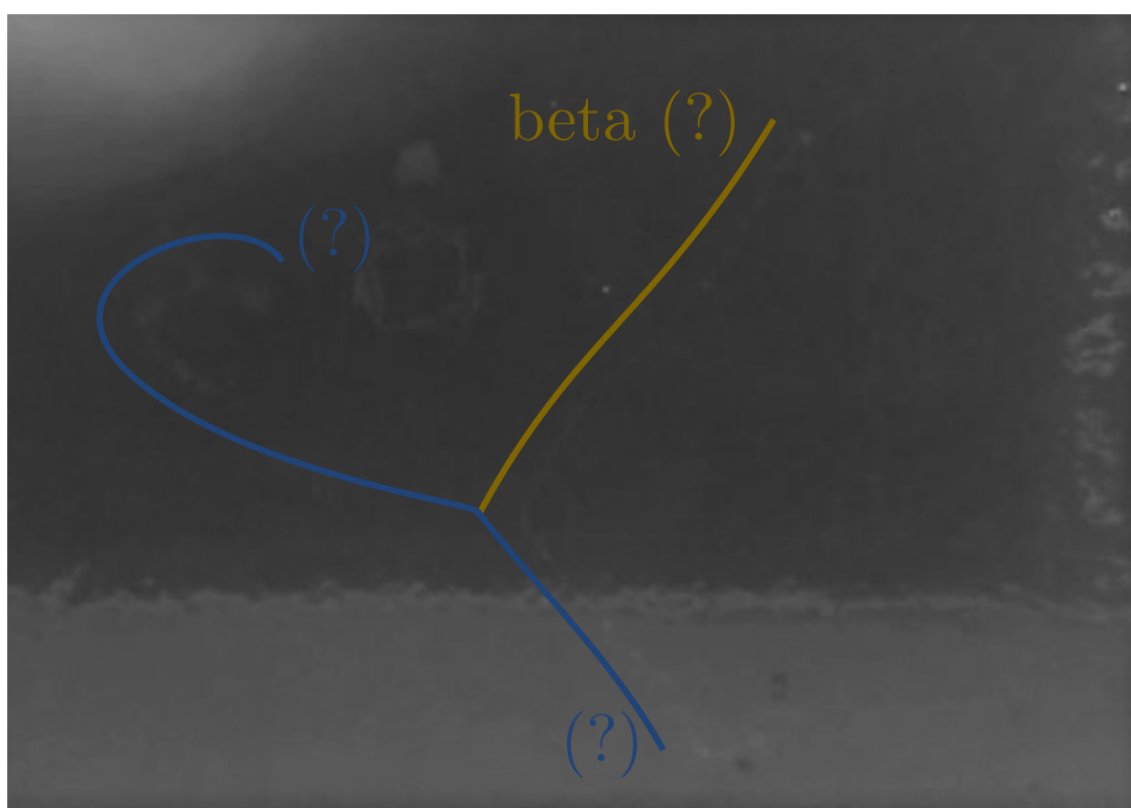
Obrázek 3.13: Zachycené stopy elektronů přirozeného pozadí, přičemž zakřivená stopa částice na obr. (B) jasně ukazuje na svoji nižší energii než je energie částice na obr. (A). (Pozn.: stříbrný čtverec na dně komory je odrazem objektivu fotoaparátu.)

Přirozené radioaktivní pozadí Přirozené radioaktivní pozadí je ionizující záření přirozeně se vyskytující v životním prostředí. Je způsobeno zejména kosmickým zářením, radioaktivi-

tou hornin a přítomností přírodního radioaktivního plynu radonu. Z kosmického záření lze zachytit alfa částice, miony, elektrony a protony; horniny pak emitují α , β a γ záření a radon se transmutuje na polonium především alfa přeměnou. Kosmické záření je obtížně zachytitelné (jak bylo zmíněno v kap. 2.5 dopadá kolmo na zobrazovací rovinu komory), v případě zachycení je pro svoji krátkou stopu špatně identifikovatelné. U ostatních stop nelze jednoduše určit původ částice, ale např. alfa částice radonu přese stěnu komory proniknout nedokáží. Neznalost původu částice dále podstatně znesnadňuje identifikaci stop, ale například β^- částice jsou stále poměrně dobře identifikovatelné. Na obrázcích 3.13, 3.14 a 3.15 jsou zobrazeny stopy přirozeného radioaktivního pozadí, u některých stop však byla identifikace značně nejasná nebo nebyla vůbec možná.



Obrázek 3.14: Stopy těchto částic jsem nedokázal identifikovat. Domnívám se, že na obr. (A) by mohla být stopa částice alfa kvůli tvaru a povaze stopy; na obr. (B) a (C) jsou pravděpodobně stopy kosmického záření – usuzuji tak z poměrně krátké a výrazné stopy, když částice vstoupila do citlivého pole komory pod poměrně značným úhlem.



Obrázek 3.15: Pozoruhodná situace, v níž se pravděpodobně beta částice sráží s jinou částicí, přičemž povahu produktů jejich srážky nebylo možno určit. (Z fotografie tento děj sice není dostatečně zřejmý, ale původní videozáznam oddělení dvou částic od částice původní zřetelně ukazuje.)

4 Výsledky

Nejpodstatnějším výsledkem této práce je zkonstruování funkčního prototypu termoelektricky chlazené mlžné komory (který je vyobrazen na obr. 4.1). Použitý způsob chlazení činí komoru dobře přenosnou, což by v případě např. kompresorového chlazení nebylo možné, a rovněž nezávislou na vnějším chladicím médiu, jakým by byl suchý led nebo tekutý dusík. Stále však je přístroj nutné napájet z elektrické sítě a jeho mobilita je mírně znesnadněna poměrně značnou hmotností, která činí přibližně 11 kg. Komfort uživatele je zajištěn jednoduchým ovládáním, možností kontrolovat teplotu dna komory a také např. madly pro snazší přenos.

Z konstrukčního hlediska je největším nedostatkem přehřívání některých částí komory – např. relé spínající termoelektrické články dosahují za provozu až 45 °C, což je ovšem podstatně méně, než je provozní maximum, a dále se také zahřívá spínaný zdroj, ale rovněž v normě. Další nevýhodou je závislost chladicího systému komory na teplotě okolního vzduchu, což se projevuje v kvalitě a objemu pozorovaných částic. Podstatnou nutností při provozu zařízení je doplňování chladicí kapaliny (několikrát do roka), z důvodu jejího výparu.

Z časových důvodů jsem se nezabýval pozorováním částic do míry, do níž jsem plánoval. Přesto se mi podařilo pozorovat v poměrně dobré kvalitě stopy částic ze zářičů, které jsem měl k dispozici – tedy alfa, beta a gama záření, a dále také přirozeného pozadí. V praktické části jsem také popsal stopy jednotlivých typů částic a podpořil je výpočtem kinetické energie částic. Experimentálně se mi podařilo splnit teoretické premisy z teoretické části – například pozorováním nízkoenergetických elektronů či sekundární ionizace gama zářením.



Obrázek 4.1: Fotografie výsledného výrobku

5 Závěr a diskuse

Srovnáním cílů uvedených v úvodu a výsledků lze usoudit, že se hlavní záměr – tedy konstrukce mlžné komory – podařilo splnit. Metody konstrukce, které jsem použil, vycházejí z vlastností komory nastíněných v úvodu: tedy bezúdržbovost a snadné ovládání. Z těchto důvodů jsem vyvinul vlastní chladicí okruh založený na termoelektrických článcích stejně jako další systémy nutné k chodu komory.

Jak již bylo zmíněno v úvodu, měl by tento prototyp nalézt kvůli výše uvedeným vlastnostem své upotřebení ve školství jako pomůcka při výuce fyziky a to zvláště na středních školách – za vhodné považuji využití v kapitolách jaderná fyziky či fyzika mikrosvěta.

Na trhu s přístroji pro školní experimenty nejsou mlžné komory příliš obvyklou pomůckou, podařilo se mi však nalézt dvě společnosti, které se jejich výrobou zabývají: PASCO a PHYWE. Mlžná komora od PASCO o obsahu detekčního pole 180 cm^2 je chlazená termoelektrickými články a ledovou vodou a její cena je 23 000 Kč. Společnost PHYWE nabízí dva typy kompresorově chlazených komor o 1 600 resp. 6 400 cm^2 za 750 000 a 2 500 000 Kč. Moje konstrukce tak nabízí nepříliš drahé řešení (náklady na výrobu nové komory by činily přibližně 15 000 Kč) jednoduché a skladné mlžné komory s obsahem 220 cm^2 .

Další rozvoj této komory by měl náležet pokusům a pozorováním – především s využitím nových záříčů či umístěním komory do vyšší nadmořské výšky (kde je výrazně vyšší pravděpodobnost zachycení kosmického záření). Rovněž se plánuji zabývat experimenty s magnetickým polem, a to především pomocí permanentních magnetů, neboť z důvodů uvedených v kapitole 3.6 není možné použít Helmholtzovy cívký. Do komory rovněž bude možné umístit zdroj vysokého napětí, čímž dojde k odstranění volných iontů v komoře a zlepší se tak její zobrazovací schopnosti.

Literatura

- [1] Diffusion cloud chamber systems. *Tools for Teaching Advanced Physics* [online]. [cit. 2016-01-01]. Dostupné z: http://www.telatomic.com/nuclear/demonstration_cloud_chamber.html
- [2] Thermoelectric effect. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-01-01]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_effect
- [3] Peltier Cooler Based Cloud Chamber. *Nothing Labs* [online]. [cit. 2016-01-01]. Dostupné z: <http://www.nothinglabs.com/cloudchamber/>
- [4] MOKRÝ, Přemysl, Jan HLADKÝ a Ivan LEHRAUS. Nové metody pro zobrazení drah částic. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*. Praha: Jednota českých matematiků a fyziků, 1963, **8**(2): 71-80. ISSN 0032-2423.
- [5] Cloud chamber. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Cloud_chamber
- [6] HELLMAN, Hal. *Atomic particle detection*. Oak Ridge: United States Atomic Energy Commission Division of Technical Information, 1970, s. 23-27
- [7] Záření gama. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Z%C3%A1%C5%99en%C3%AD_gama
- [8] Gamma rays. FONTENEAU, Samuel. *Exploring radioactivity with a homemade Cloud Chamber* [online]. [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: <http://chambrebrouillard.wifeo.com/gamma.php>
- [9] WAGNER, Vladimír. *Kosmické záření* [online]. Řež, 2006 [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: <http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/prednasky/porubacyklus/zareni/zareni.ppt>. Ústav jaderné fyziky AVČR.
- [10] Interprétation des tracés. *Cloudylabs* [online]. [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: <http://www.cloudylabs.fr/wp/phys/>
- [11] BEWAN, A. R. Optimum and limiting operating conditions for downward diffusion cloud chambers. *Journal of Scientific Instruments*. 1954, **31**(2): 45-49. ISSN 0950-7671.
- [12] DOLEJŠÍ, Jiří a Olga KOTRBOVÁ. *Detektory částic* [online]. Praha, 2003 [cit. 2015-11-18]. Dostupné z: www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/dolejsi/textbook/Detectors_CZ.ppt. Univerzita Karlova v Praze.

- [13] BAY, Fatih. *Emulsion Detectors* [online]. University of Bern [cit. 2015-11-21]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/AdamSzewciw/photographic-emulsion>
- [14] SAJDL, Petr. Detekory záření [online]. 2002 [cit. 2016-01-01]. Dostupné z: <http://web.vscht.cz/sajdlp/Detektor.doc>
- [15] VALKÁROVÁ, Alice. *Dráhové detektory* [online]. Praha, 2004 [cit. 2016-01-25]. Dostupné z: <http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/~alice/lect/Trackers.pdf>. Ústav částicové a jaderné fyziky Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy.
- [16] Multimedialní encyklopedie fyziky. *Rozpadové řady* [online]. [cit. 2016-01-25]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- [17] ŠIDLÍKOVÁ, Markéta. *Alfa, beta, gama záření* [online]. [cit. 2016-01-25]. Dostupné z: <http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/Svadlenkova/Alfa,beta,gama%20zareni.pdf>
- [18] Instrumentelle Hilfsmittel der Kernphysik II. FLÜGGE, Siegfried. Handbuch der Physik. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag, 1958, s. 284-285. ISBN 978-3-642-45905-4.

Seznam obrázků

2.1	Popis expanzní mlžné komory. <i>Archiv autora</i>	8
2.2	Popis difúzní mlžné komory. <i>Archiv autora</i>	9
2.3	Schematická podoba složeného detektoru (zde ATLAS). <i>Archiv autora</i> . . .	11
2.4	Fotografie stop částic (přirozené pozadí) v difúzní mlžné komoře na hoře Pic du Midi (2877 m n. m.). Cloudy labs. <i>Une trace pour chaque particule</i> . Dostupné z: http://www.cloudylabs.fr/wp/phys/	13
3.1	Schematický náčrt mlžné komory. <i>Archiv autora</i>	17
3.2	Závislost chladičho výkonu na rozdílu teplot na článku TEC1-12709. GME. Dostupné z: http://www.gme.cz	18
3.3	Řez a pohledy na chladič a chladičí systém. <i>Archiv autora</i>	20
3.4	Část použitého pásu LED. <i>Archiv autora</i>	21
3.5	Odpařovací systém. <i>Archiv autora</i>	21
3.6	Schema elektronického teploměru, který měří teplotu dna komory. <i>Danyk</i> . Dostupné z: http://danyk.cz/teplo.html	22
3.7	Graf závislosti teploty dna komory na čase (od teploty 24 °C)	23
3.8	Fotografie alfa částic ze smolince zachycených v mlžné komoře. <i>Archiv autora</i>	25
3.9	Zde lze vidět, jak je zprvu rovná (A) stopa alfa částice ovlivněna magnetickým polem (B). <i>Archiv autora</i>	26
3.10	Fotografie beta částice o nízké energii z rozpadu stroncia. <i>Archiv autora</i> . .	27
3.11	Fotografie beta částice o vyšší energii z rozpadu stroncia. <i>Archiv autora</i> . .	27
3.12	Stopy ionizace způsobené průchodem gama záření. <i>Archiv autora</i>	28
3.13	Zachycené stopy elektronů přirozeného pozadí, přičemž zakřivená stopa částice na obr. (B) jasně ukazuje na její nižší energii než částice na obr. (A). <i>Archiv autora</i>	28
3.14	Stopy těchto částic jsem nedokázal identifikovat. Domnívám se, že na obr. (A) by mohla být stopa částice alfa kvůli tvaru a povaze stopy; na obr. (B) a (C) jsou pravděpodobně stopy kosmického záření – usuzuji tak z poměrně krátké a výrazné stopy, když částice vstoupila do citlivého pole komory pod poměrně značným úhlem.. <i>Archiv autora</i>	29
3.15	Pozoruhodná situace, v níž se pravděpodobně beta částice sráží s jinou částicí, přičemž povahu produktů jejich srážky nebylo možno určit. (Z fotografie tento děj sice není dostatečně zřejmý, ale původní videozáznam oddělení dvou částic od částice původní zřetelně ukazuje.) <i>Archiv autora</i>	30
4.1	Fotografie výsledného výrobku. <i>Archiv autora</i>	32
A.1	Útroby mlžné komory. <i>Mgr. Tomáš Nečas, Ph.D.</i>	38
A.2	Mlžná komora bez pláště. <i>Mgr. Tomáš Nečas, Ph.D.</i>	39
A.3	Zdroj použitý k napájení. <i>Archiv autora</i>	40

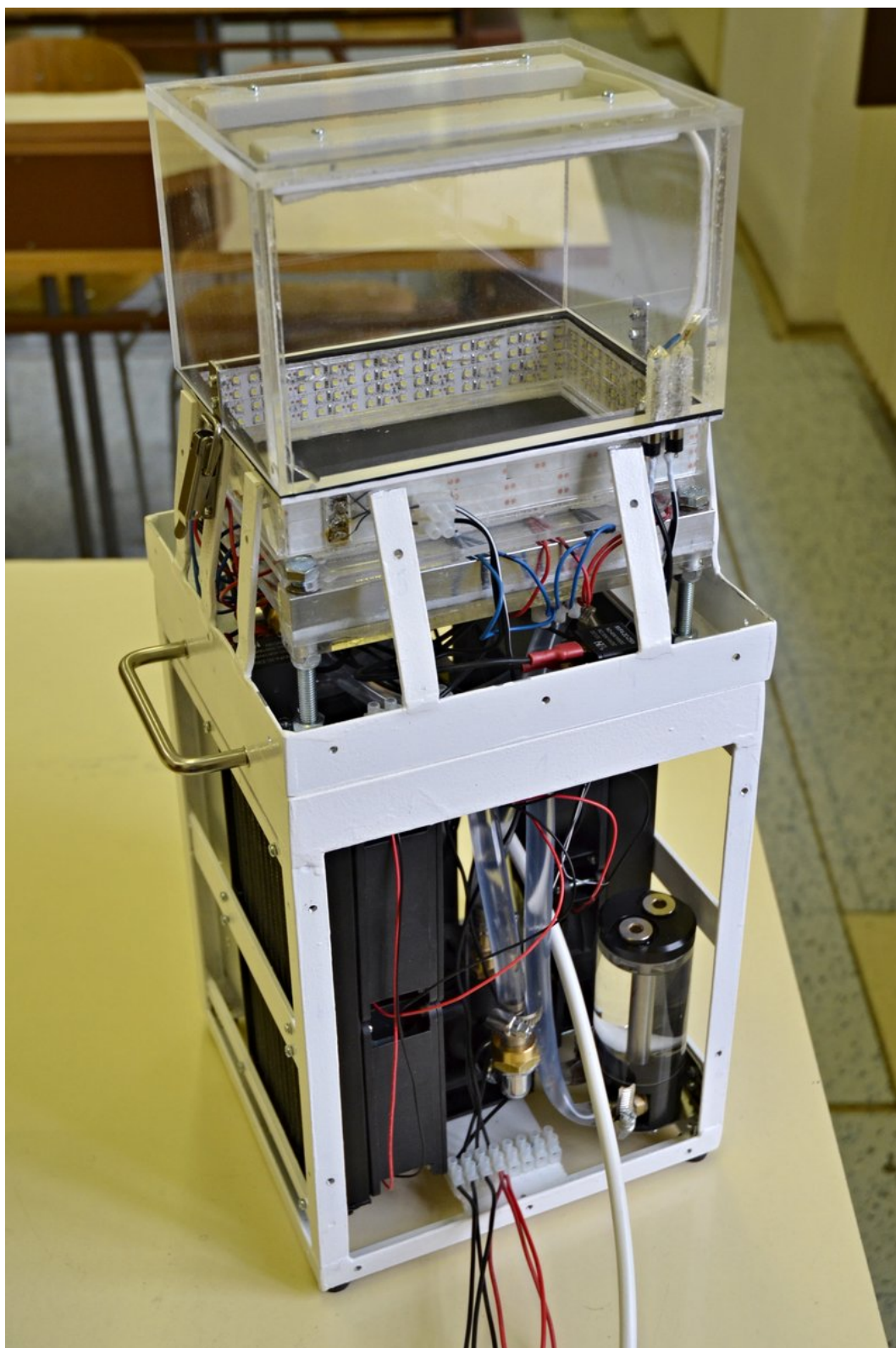
A.4	Vyfrézovaný hliníkový chladič. <i>Archiv autora.</i>	40
A.5	Čerpadlo vodního okruhu. <i>Archiv autora.</i>	41
A.6	Expanzní nádoba. <i>Archiv autora.</i>	41
A.7	Radiátor chladicího okruhu. <i>Archiv autora.</i>	42

A Fotografie zařízení

V této příloze jsou uvedeny fotografie jednotlivých částí komory.



Obrázek A.1: Útroby mlžné komory



Obrázek A.2: Mlžná komora bez pláště



Obrázek A.3: Zdroj použitý k napájení (12 V/720 W)



Obrázek A.4: Vyfrézovaný hliníkový chladič (již použitý – je pokryt vrstvou oxidu hlinitého)



Obrázek A.5: Čerpadlo vodního okruhu (12 V/23 W/1,5 m³h⁻¹)



Obrázek A.6: Expanzní nádoba



Obrázek A.7: Radiátor chladicího okruhu