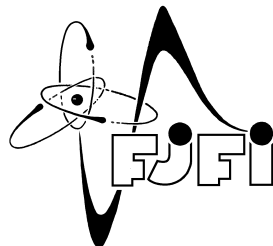


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská



Technical Design Report

Urychlovače nabitých částic

PPRA kolaborace
(letní semestr akademického roku 2011/2012)

PPRA kolaborace

Rozdělení experimentu:

- Elektrostatický urychlovač – Miroslav Šimko
- Indukční urychlovač – Oleksandr Korčak
- Fokusace svazku – Ota Kukral
- Diagnostika svazku – Jaroslava Hrtánková

Mluvčí kolaborace: Jaroslava Hrtánková

Koordinátor projektu: Miroslav Šimko

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Klasifikace urychlovačů	1
1.2	Principy urychlování	1
1.3	Laboratorní podmínky	2
1.4	Konstrukce experimentu	2
2	Elektrostatický urychlovač	5
2.1	Konstrukce urychlovače	5
2.2	Zdroj napětí	6
2.2.1	Konstrukce zdroje	6
2.2.2	Měření napětí zdroje	7
3	Indukční urychlovač	10
3.1	Úvod	10
3.2	Teoretický popis	11
3.3	Konstrukce urychlovače	13
3.4	Součástky urychlovače	14
4	Fokusace svazku	16
4.1	Návrh konstrukce	16
4.2	Provedení konstrukce	18
5	Diagnostika svazku	21
5.1	Konstrukce elektrostatického spektrometru	21
5.2	Konstrukce proudového transformátoru	22
6	Závěr	25

Kapitola 1

Úvod

Tento dokument shrnuje výstup z dvousemestrální práce pro předmět pokročilé praktikum na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské České vysokého učení technického v Praze.

Účelem tohoto experimentu [1] je vytvoření sady urychlovačů, které budou urychlovat nabitě částice na energie desítek keV. Součástí urychlovačů je také fokusace a diagnostika svazku.

1.1 Klasifikace urychlovačů

Urychlovače nabitých částic slouží jako hlavní vědecká zařízení téměř všech hlavních výzkumných center částicové fyziky. Mají však též řadu praktických využití v medicíně i průmyslu [2].

Urychlovače můžeme dělit podle několika různých hledisek: Podle tvaru dráhy na lineární a cyklické; podle urychlovaných částic na urychlovače elektronů, pozitronů, protonů, iontů atd.; podle režimu práce na spojitě a pulzní. Dále je možné rozdělit urychlovače podle toho, zda se urychlí jen jednou etapou urychlovacího procesu, nebo postupným urychlováním díky mnohonásobnému působení elektromagnetického pole.

V elektrostatických (též vysokonapěťových) urychlovačích se urychluje pomocí elektrostatického pole, v indukčních elektrických polem vytvořeným proměnlivým magnetickým polem a ve vysokofrekvenčních (též rezonančních) proměnlivým vysokofrekvenčním elektrickým polem.

1.2 Principy urychlování

Na nabitou částici s nábojem q působí v elektromagnetickém poli tzv. Lorentzova síla [3]

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (1.1)$$

kde \mathbf{E} je intenzita elektrického pole, \mathbf{B} je magnetická indukce a \mathbf{v} je rychlost částice. Přírůstek kinetické energie bude integrál z Lorentzovy síly přes dráhu

$$\Delta E_{\text{kin}} = \int \mathbf{F} \, ds.$$

Ze vztahu (1.1) tedy plyne

$$\Delta E_{\text{kin}} = q \int \mathbf{E} \, ds + q \int (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \mathbf{v} \, dt,$$

kde výraz $(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \mathbf{v}$ je nulový. Ke změně energie tedy přispívá pouze intenzita elektrického pole a platí

$$\frac{dE_{\text{kin}}}{dt} = q\mathbf{v} \cdot \mathbf{E}. \quad (1.2)$$

Indukční urychlovače fungují tak, že se změnou magnetické indukce vytvoří elektrické pole podle 2. Maxwellovy rovnice

$$\operatorname{rot}\mathbf{E} = -\frac{d\mathbf{B}}{dt}. \quad (1.3)$$

1.3 Laboratorní podmínky

Pro konstrukci experimentu máme k dispozici válcovou vakuovou komoru (viz obr. 1.1) s vnitřním průměrem ≈ 50 cm a délkou ≈ 55 cm. Komora je vyrobena z nerezové oceli a je evakuována olejovou a turbomolekulární vývěvou. Skrz stěnu vedou zatavené vodiče pro připojení elektrického proudu.



Obrázek 1.1: Fotografie vakuové komory.

Vakuová komora slouží zároveň jako stínění před ionizačním zářením. Jelikož je v nejslabším místě (plášť válce) silná $\approx 1,2$ cm, s přehledem odstíní jakékoli záření vylétající z experimentu (to je také dáno poměrně malou energií urychlených částic: max. 50 keV).

Z předchozího roku fungování pokročilého praktika je zprovozněno elektronové dělo coby zdroj elektronů.

1.4 Konstrukce experimentu

Experimentální sestava je nakreslena na obr. 1.2. Celá sestava se musí vejít do vakuové komory, která je dlouhá 55 cm. Při návrhu jednotlivých komponent byl tedy kladen veliký důraz na kompaktnost.

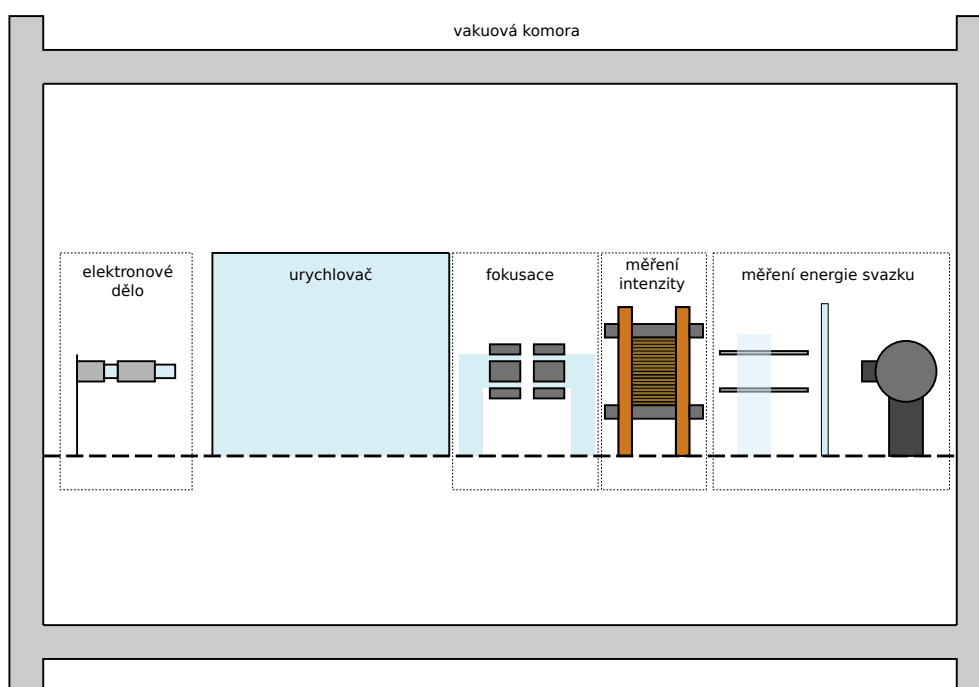
Jako zdroj nabitých částic slouží elektronové dělo, ze kterého vylétávají elektrony do urychlovacího prvku. Původní plán byl zkonstruovat také iontový zdroj [1], z čehož ale kvůli technické náročnosti sešlo. Všechny prvky experimentu jsou tedy navrženy tak, aby dokázaly fungovat jak pro elektrony tak pro kladně nabité ionty.

Urychlovače jsou sestaveny dva: jeden elektrostatický a druhý indukční. Elektrostatický urychlovač je tvořen čtyřmi po sobě jdoucími měděnými elektrodami nabitými na různé napětí. Tento urychlovač by měl urychlit částice na energii ≈ 50 keV. Indukční urychlovač je tvořen jednou cívkou a je schopen urychlit prolétávající částice na energii ≈ 30 keV. Oba urychlovače fungují v pulzním režimu.

Urychlený paprsek je třeba zfokusovat. K tomu slouží dva kvadrupólové magnety umístěné těsně za urychlovač. Magnety jsou nastaveny tak, aby částice zfokusovaly na jedno místo na terčiku.

Na konec je umístěna sestava pro diagnostiku svazku, která se skládá z měření intenzity a energie svazku. Intenzitu svazku měříme proudovým transformátorem vytvořeným z cívky připojené na digitální osciloskop.

Energie se měří elektrostatickým spektrometrem, jež se skládá z dvou nabitých elektrod, které zahýbají svazek podle toho, jakou má energii. Svazek se detekuje na



Obrázek 1.2: Nákres experimentální sestavy.

stínítku tvořeném obrazovkou z osciloskopu, již snímá webkamera připojená k počítači.

Kapitola 2

Elektrostatický urychlovač

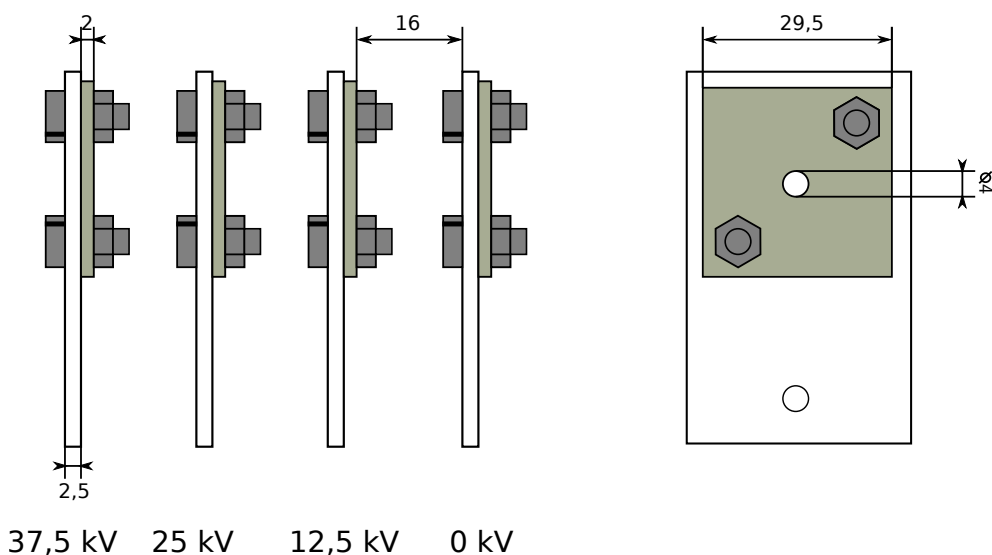
Tento typ urychlovače [2] používá k urychlování elektrostatické pole. Jeho přednostmi jsou jednoduchost a možnost urychlení jakýchkoli nabitých částic. Nevýhodou je, že napětí je možné přiložit jen jednou (nebo dvakrát v případě tandetronu, kde se ale mění polarita částic), což snižuje možnou dosaženou energii částic.

Kinetická energie urychlených částic je limitována dosaženým napětím na zdroji napětí

$$E_K = qU, \quad (2.1)$$

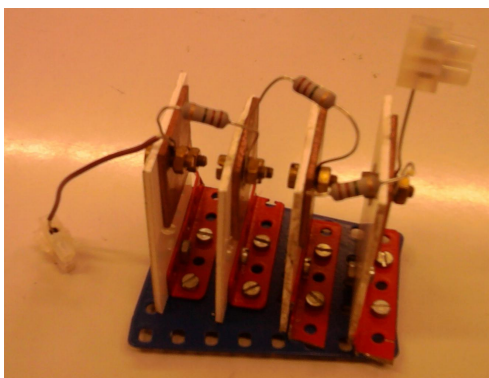
kde q je náboj částice a U je napětí na elektrodách urychlovače. Očekáváme, že maximální napětí na našem zdroji bude ≈ 51 kV (viz podkapitola 2.2), nejvyšší dosažená energie tedy bude ≈ 51 keV pro elektrony a ionty s jedním odtrženým elektronem.

2.1 Konstrukce urychlovače



Obrázek 2.1: Nákres elektrostatického urychlovače s příslušnými napětími na elektrodách. Vlevo je pohled z boku, vpravo pohled zepředu.

Náš urychlovač je tvořen čtyřmi elektrodami ve tvaru čtverce s kruhovou dírou uprostřed (viz Obr. 2.1), kudy budou prolétávat částice. Každá elektroda je přišroubována dvěma šrouby k plastové destičce, která je připevněna k dílu ze stavebnice Merkur, takže je udržena stejná vzdálenost mezi nimi (viz Obr. 2.2).



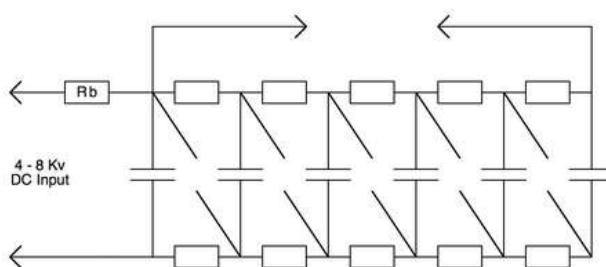
Obrázek 2.2: Fotografie sestaveného elektrostatického urychlovače mimo vakuovou komoru.

Částice budou vylétávat ze zdroje na napětí ≈ 50 kV, přičemž poslední elektroda je uzemněna. Zbylé tři elektrody jsou odstupňovány vždy po 12,5 kV. Takže napětí mezi dvěma sousedními elektrodami i mezi první elektrodou a zdrojem částic je vždy 12,5 kV, což je napětí, při kterém by ve vakuu nemělo docházet k púrazu [6, 7]. Jako děliče napětí jsou použity 1 M Ω rezistory (šedé válečky na fotografii 2.2).

2.2 Zdroj napětí

2.2.1 Konstrukce zdroje

Jako zdroj napětí jsme zvolili Marxův generátor. Jedná se o zdroj vysokého napětí, které se zpouští v krátkých impulzech.



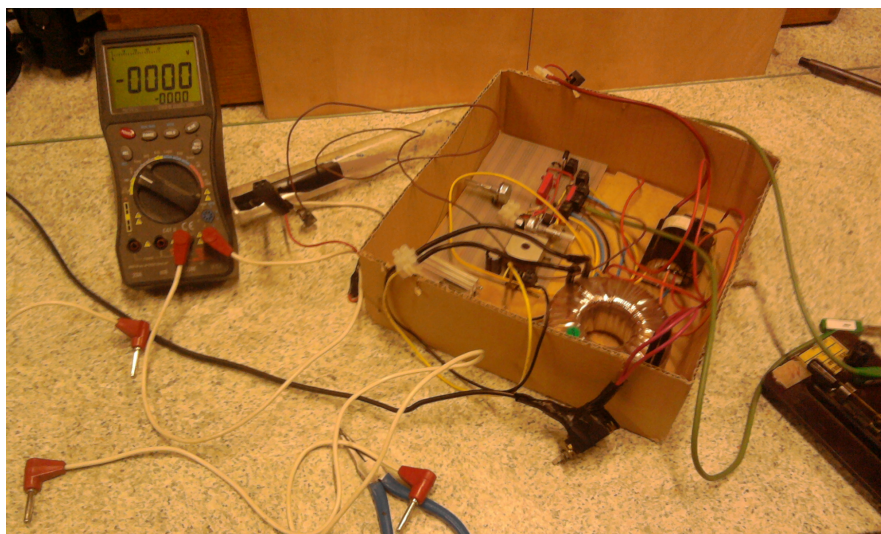
Obrázek 2.3: Schéma Marxova generátoru [8].

Schéma tohoto generátoru (viz obr. 2.3) má žebříčkovou strukturu [8], přičemž každá „příčka“ se skládá ze dvou rezistorů, kondenzátoru a jiskřiště. Nejprve se všechny kondenzátory nabijí na vstupní napětí U . Po zapálení jiskry na prvním jiskřišti prudce klesne odpor mezi prvními dvěma kondenzátory, což vede tomu, že se kondenzátor vybijí a zesílí napětí na dalším jiskřišti, čímž opět vyvolá jiskru. Totéž se opakuje na dalším jiskřišti atd., až se na výstupu napětí zesílí ideálně na $n \cdot U$, kde n je počet „příček.“

Fotografie funkčního generátoru je na Obr. 2.4. Tento generátor je tvořen z 10 příček z 1 M Ω rezistorů (šedé válečky) a 10 nF kondenzátorů (modré placky). Jako jiskřiště



Obrázek 2.4: Fotografie Marxova generátoru.



Obrázek 2.5: Fotografie trafo, které napájí Marxův generátor. Nalevo je dělič napětí (průhledný válec), na nějž je připojen voltmetr měřící výstupní napětí trafo.

slouží zahnuté drátky. Generátor je připojen k trafu s napětím až 10 kV.

2.2.2 Měření napětí zdroje

Změřit vysoké napětí na zdroji, který přitom funguje pouze v krátkých pulzech je obecně velký problém. Vzhledem k tomu, že jsme neměli jiné vybavení, jež by proměřilo parametry zdroje, rozhodli jsme se pro měření pomocí průrazného napětí vzduchu.

Jako měřicí přístroj posloužily dvě vodivé koule připojené na zdroj napětí, které jsme postupně přibližovali, až došlo k průrazu. Jedna koule je vybavena mikrometrickým šroubem pro lepší přesnost měření. Měřicí zařízení je vyfotografováno na Obr. 2.6.



Obrázek 2.6: Fotografie jiskřiště použitého při měření napětí zdroje.

Na průrazné napětí ve vzduchu [4] existuje empirický vzorec

$$U = g_s \frac{x}{f}, \quad (2.2)$$

kde x je vzdálenost mezi koulemi v cm, g_s je průměrný gradient a pro průraz se rovná

$$g_s = 27,2\delta \left(1 + \frac{0,54}{\sqrt{\delta R}}\right) \quad [\text{kV/cm}].$$

V této rovnici je R poloměr koulí v cm a δ je člen, který vyjadřuje závislost na tlaku a teplotě vzduchu

$$\delta = \frac{0,392p}{273 + t},$$

kde p je tlak v mm Hg a t je teplota ve °C. Člen f v rovnici (2.2) závisí jen na x/R způsobem

$$f = \frac{1}{4} \left(\frac{x}{R} + 1 + \sqrt{\left(\frac{x}{R} + 1\right)^2 + 8} \right).$$

Pro naši sestavu, tedy pro koule s poloměrem $R = 0,725$ cm při teplotě $t = 21$ °C a tlaku $p = 743$ mm Hg, jsme dostali průraz při $x = 2,10$ cm. Odsud vychází po dosazení do (2.2) napětí $U = 50,7$ kV.

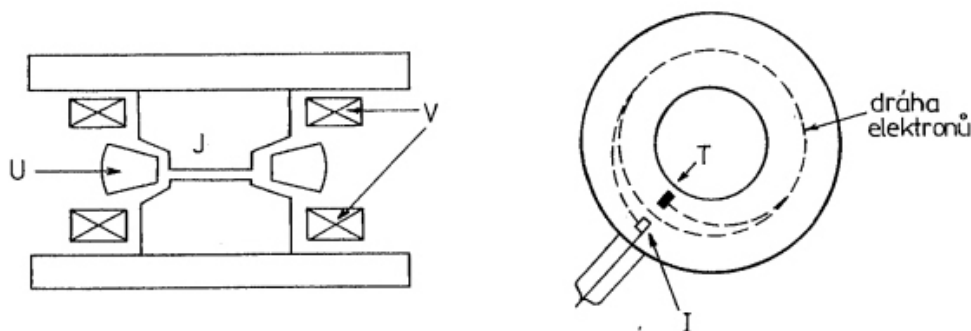
Kapitola 3

Indukční urychlovač

3.1 Úvod

Podle tvaru dráhy můžeme rozdělit urychlovače na lineární a kruhové čili cyklické [14].

Betatron je příkladem **cyklického indukčního urychlovače** elektronů, kde se využívá magnetické pole jak pro zrychlení elektronů tak i pro udržení částic na dráze o konstantním poloměru (viz obr. 3.1). Malý betatron s maximální (kinetickou) energií 2,3 MeV a frekvencí 600 Hz urychlí elektrony za dobu 415 ms, přitom elektrony vykonají 260 000 oběhů a urazí vzdálenost 125 km. Betatrony se nehodí pro urychlování protonů a těžších iontů [14].



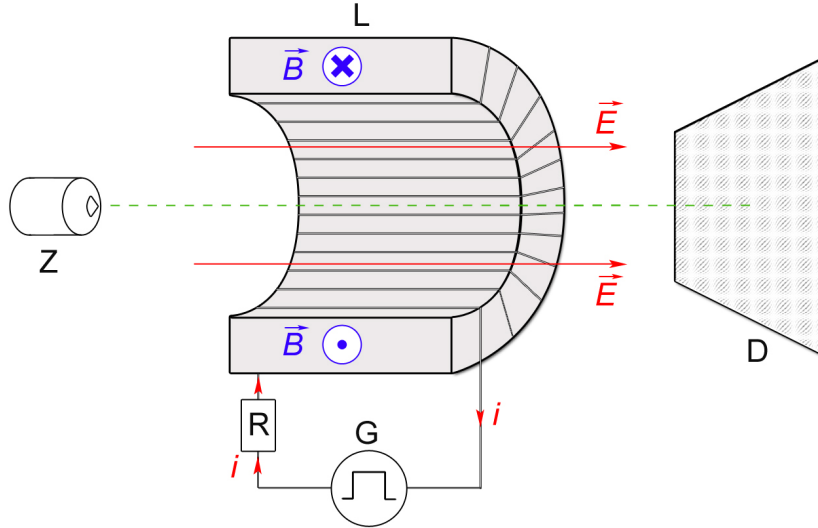
Obrázek 3.1: Shéma betatronu. J – jádro elektromagnetu; V – vinutí, U – kruhová urychlovací trubice; I – zdroj elektronů; T – terčik [14].

Lineární indukční urychlovače fungují na principu elektromagnetické indukce. Jsou to pulzní urychlovače. Ke zrychlení částic v tomto typu urychlovače dochází působením vírového elektrického pole, které vzniká v cívkách instalovaných podél osy svazku, působením proměnného magnetického pole, které vzniká v důsledku průchodu elektrického pulzu vinutím cívky [2].

Vzhledem k tomu, že konstrukce lineárního urychlovače je mnohem jednodušší a hodí se pro urychlování iontů a elektronů na energie ~ 30 keV, rozhodli jsme se pro konstrukci lineárního indukčního urychlovače.

Shématicky je návrh konstrukce urychlovače zobrazen na obr. 3.2. Částice se budou urychlovat uvnitř cívky ve tvaru toroidu (viz obr. 3.2: L). Pro tvorbu proměnného magnetického pole uvnitř cívky budeme potřebovat pulzní proud, který poteče vinutím cívky. Vhodného náběhu pulzu proudu se dá dosáhnout využitím zdroje vysokého napětí, anebo pulzního zdroje napětí resp. proudu. Pro konstrukci našeho urychlovače

by se hodilo použít pulzní zdroj napětí, který by dovolil náběh napětí na 100 V za 10^{-8} s. Urychlovač bude tedy tvořen RL-obvodem s pulzním zdrojem napětí.

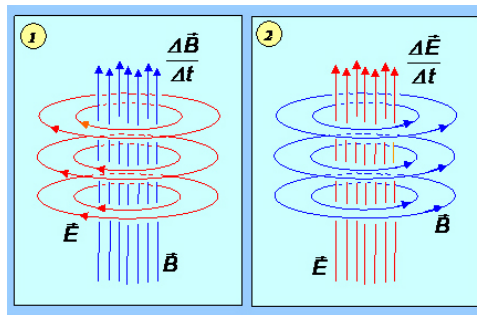


Obrázek 3.2: Návrh konstrukce lineárního indukčního urychlovače; Z – zdroj částic, G – generátor pulzního napětí, R – rezistor, L – cívka ve tvaru toroidu, D – detektor.

3.2 Teoretický popis

Jak bylo řečeno, částice se budou urychlovat působením vírového elektrického pole indukovaného proměnným magnetickým polem, což popisuje 2. Maxwellova rovnice:

$$\text{rot}\mathbf{E} = -\frac{d\mathbf{B}}{dt} . \quad (3.1)$$



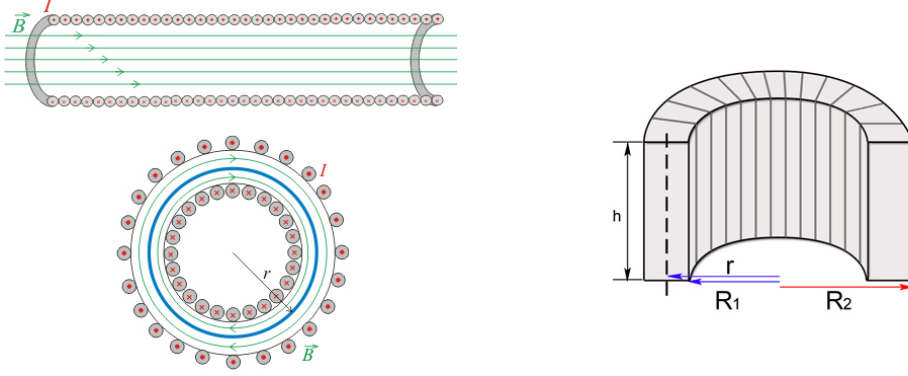
Obrázek 3.3: Siločáry elektrického a magnetického pole [12].

Toroidální cívka je vlastně solenoid (dlouhá úzká hustě vinutá cívka) stočená do tvaru prstence. Magnetickou indukci uvnitř toroidu lze určit pomocí magnetického pole solenoidu, protože toroid můžeme charakterizovat v určitém přiblížení jako solenoid stočený do tvaru prstence [15].

Indukční čáry uvnitř toroidu tvoří soustředné kružnice. Pole uvnitř toroidu v určitém přiblížení můžeme uvažovat za homogenní a vně toroidu nulové. Směr magnetické indukce je určen pravidlem pravé ruky [15].

Vztah pro velikost vektoru magnetické indukce uvnitř toroidu [10]:

$$B = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot N \cdot I}{2\pi \cdot r}. \quad (3.2)$$



Obrázek 3.4: Solenoid ve tvaru toroidu [15].

Vztah pro velikost indukčnosti solenoidu ve tvaru toroidu (viz. obr. 3.4) [10]:

$$L = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot h \cdot N^2}{2\pi} \cdot \ln \left[\frac{R_2}{R_1} \right]. \quad (3.3)$$

Rychlost změny magnetického pole závisí na rychlosti změny proudu:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot N}{2\pi \cdot r} \cdot \frac{di}{dt}. \quad (3.4)$$

Ze vztahu pro proud na cívice v RL-obvodu [15]:

$$i_L(t) = \frac{U(t)}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3.5)$$

dostáváme vztah pro rychlost změny proudu:

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{U(t)}{R} \cdot \frac{1}{\tau} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{dU(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (3.6)$$

kde τ ($\tau = L/R$) je časová konstanta – čas, za který se napětí na cívice zmenší e-krát. Je vidět, že rychlost změny proudu na cívice závisí jak na velikosti napětí tak i na rychlosti náběhu napětí.

Z (3.4) a (3.5) plyne:

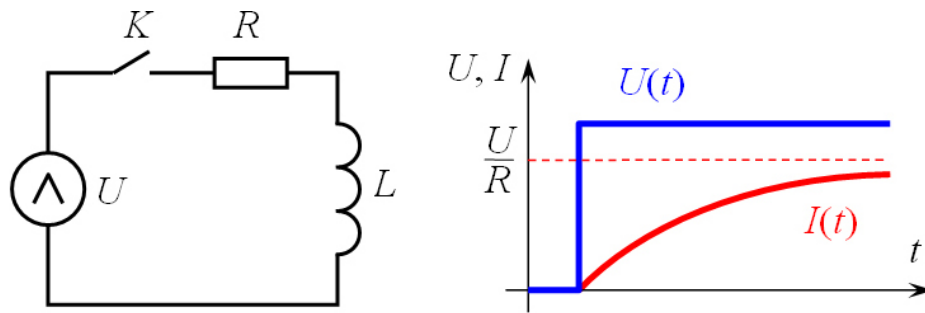
$$\frac{dB(t)}{dt} = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot N}{2\pi \cdot r} \cdot \frac{U(t)}{R} \cdot \left[\frac{1}{\tau} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{dU(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \right]. \quad (3.7)$$

Ze zákona zachování energie vyplývá, že:

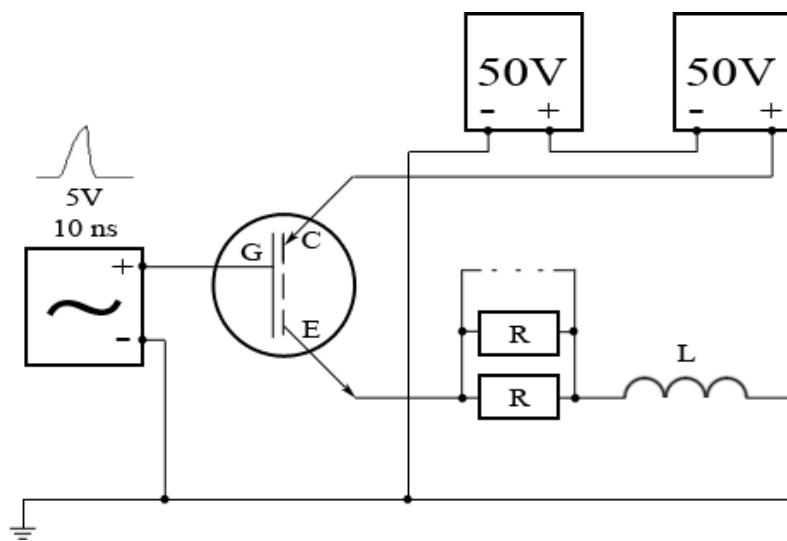
$$30 \text{ keV} = q \cdot E \cdot h, \quad (3.8)$$

kde velikost vektoru elektrického pole je z 2. Maxwellovy rovnice (3.1) určena vztahem:

$$E = r \cdot \frac{dB}{dt}. \quad (3.9)$$



Obrázek 3.5: RL-obvod.[16]



Obrázek 3.6: Schématické zobrazení návrhu indukčního urychlovače.

3.3 Konstrukce urychlovače

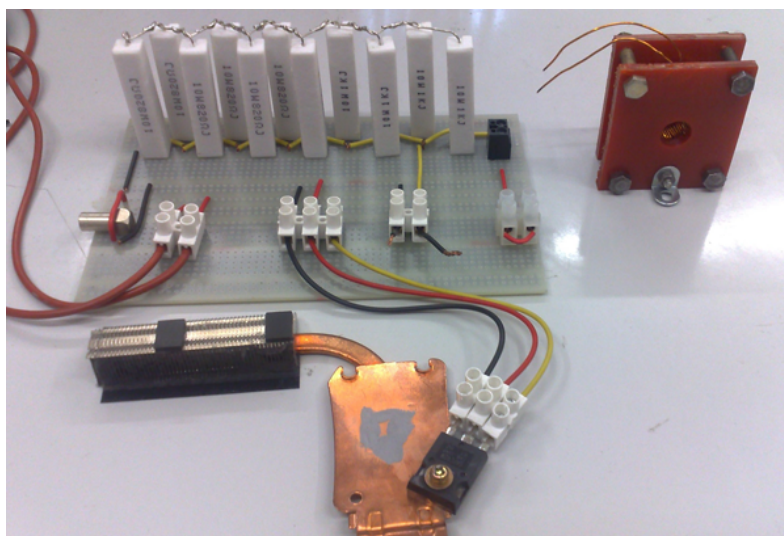
Na obrázku 3.6 je schématické zobrazení návrhu konstrukce indukčního urychlovače. Jako pulzní zdroj napětí byl použit stejnosměrný zdroj napětí spolu s IGBT tranzistorem, který bude řízen pulzním zdrojem napětí. Pomocí této kombinace lze dosáhnout nutné rychlosti náběhu napětí. Během testování bylo dosaženo až 10^{11} V/s při minimálním požadavku 10^9 V/s.

Tranzistor (Obr. 3.7) byl řízen pulzním zdrojem napětí: 5 V/10 ns.

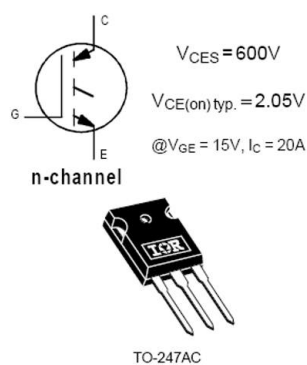
Kvůli tomu, že obvodem poteče proud kolem 1 A místo jednoho odporu (100Ω , podle výpočtu) bylo použito 10 paralelně připojených odporů $1 \text{ k}\Omega$ každý (viz Obr. 3.7). Každým odporem tedy poteče proud desetkrát menší.

Urychlovací cívka je tvořena Feritovým toroidním jádrem ($35.6 \times 22.9, 12.7 \text{ mm}$) s vinutím (měděný drát, tl. 1 mm) 60 závitů. Při těchto parametrech má cívka indukčnost $L = 3.43 \text{ mH}$ a odpor $R_L = 67.95 \text{ m}\Omega$.

Tato konstrukce indukčního urychlovače dovolí urychlit nabitě částice na energie v řádu desítek keV. Jedná se o pulzní urychlovač. Změnou rychlosti náběhu a amplitudy napětí na cívce se dá regulovat frekvence pulzů a velikost hodnoty zrychlení částic v pulzu.



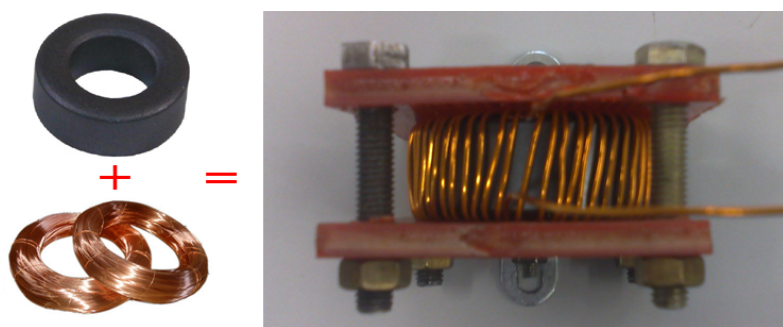
Obrázek 3.7: Praktická realizace návrhu indukčního urychlovače



Obrázek 3.8: IGBT tranzistor; provedení: vývodové , $I_c = 40 \text{ A}$, $U_{ce} = 600 \text{ V}$, $P_d = 160 \text{ W}$, pouzdro TO247AC

3.4 Součástky urychlovače

- **Stejnoseměrný zdroj napětí, 100 V:** v podmínkách naší laboratoře je možné použít 2 paralelně připojené zdroje 50 V každý.
- **Pulzní zdroj napětí:** 5 V, 10 ns.
- **Tranzistor:** IGBT tranzistor; provedení: vývodové , $I_c = 40 \text{ A}$, $U_{ce} = 600 \text{ V}$, $P_d = 160 \text{ W}$, pouzdro TO247AC.
- **Odpor, 100 Ω :** 10 paralelně připojených odporů 1 k Ω , 10 W každý.
- **Toroidální cívka:** Feritové toroidní jádro (35.6 \times 22.9, 12.7 mm) + vinutí (měděný drát, tl. 1 mm, délka 3.5 m).



Obrázek 3.9: Cívka: Feritové toroidní jádro (FT 140-43) + měděný drát, tl. 1 mm, 60 závitů.

Kapitola 4

Fokusace svazku

Z elektrostatického urychlovače přichází svazek, který je lehce rozbíhavý [18]. Úkolem fokusace je tento svazek soustředit na pokud možno co nejmenší plochu ve vzdálenosti, ve které by se provádělo měření. K tomuto účelu se používá soustavy permanentních magnetů. Návrh je vytvořený jak pro svazek iontů N_2^+ , tak pro elektrony, předpokládaná kinetická energie částic je 30 keV.

4.1 Návrh konstrukce

Na nabitou částici pohybující se v magnetickém poli bude působit Lorentzova síla

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (4.1)$$

kde q je náboj částice, v rychlost pohybující se částice a B magnetická indukce. Pohybuje-li se částice ve směru osy z kolmo na homogenní magnetické pole B_y , dojde k zakřivení její dráhy ve směru osy x o úhel daný vztahem (4.2)

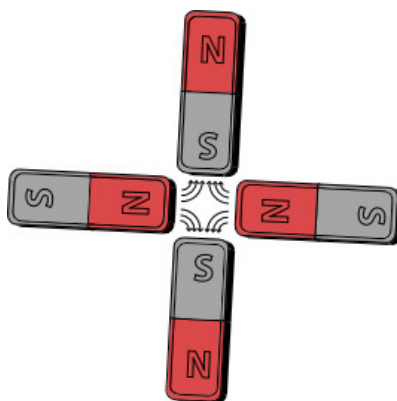
$$\alpha_x = \frac{qB_y L}{p}, \quad (4.2)$$

L je dráha, kterou částice v poli uletí, p její hybnost [2]. Protože chceme, aby se částice ohýbala k ose svazku tím více, čím je dále od jeho osy, volíme takové pole, které je lineárně závislé na vzdálenosti r od osy svazku $B = gr$. Tuto podmínku splňuje kvadrupól, g je gradient pole. V tomto poli se pak částice odchýlí o úhel α daný rovnicí

$$\alpha = -\frac{q}{p}grL. \quad (4.3)$$

Vidíme, že pro částice s různým nábojem a hybností bude úhel odklonění a tím i fokusační vzdálenost rozdílná. Je tedy třeba tyto údaje o svazku alespoň přibližně znát a podle toho konstruovat odpovídající kvadrupól.

Fokusace je prováděna dvěma kvadrupóly, které jsou umístěny ve vhodné vzdálenosti za sebou. Jeden kvadrupól je tvořen čtveřicí permanentních magnetů uspořádaných podle obrázku 4.1. Kvadrupól působí na svazek tak, že v jedné ose ho fokusuje (ohýbá směrem ke středu svazku), v druhé ose však dochází k defokusaci (částice jsou odchylovány od středu). Proto se za první kvadrupól dává do vhodné vzdálenosti druhý, jehož orientace je otočena o 90 stupňů, čímž se docílí fokusace i v druhé ose. Vlastní návrh vycházel ze simulací v programech SIMION 8.0 a Ansoft Maxwell 13. SIMION je program určený pro simulaci pohybu nabitých částic v elektrickém nebo magnetickém poli, Maxwell byl použit na výpočet a simulaci magnetického pole tvořeného danými magnety. Vytváření konečného návrhu uspořádání magnetů probíhalo v několika iteračních krocích:



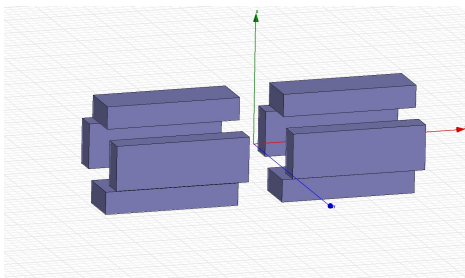
Obrázek 4.1: Kvadrupól sestavený z permanentních magnetů

1. V programu Maxwell vypočtení magnetického pole generovaného navrženým uspořádáním magnetů
2. Přenesení pole z Maxwella do programu SIMION
3. Simulace průletu částic o zvolené energii a rozložení tímto magnetickým polem – v programu SIMION.
4. Úprava návrhu uspořádání magnetů → návrat na začátek

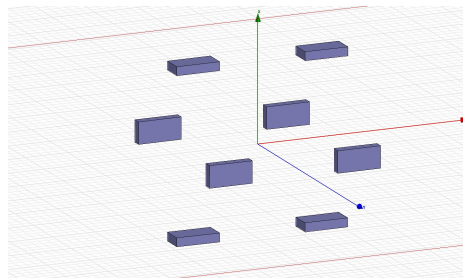
Finální návrh počítá s užitím neodymových magnetů (NdFeB) s remanencí (1,33 – 1,38) T v uspořádání závislém na typu prolétávající částice:

- Ionty N_2^+ : Magnety o velikosti 30 mm délka, 10 mm šířka, 5 mm výška ve vzdálenosti 7 mm od osy svazku. Vzdálenost hran obou kvadrupólů je 1 cm.
- Elektronů: Magnety o velikosti 10 mm délka, 5 mm šířka, 2 mm výška ve vzdálenosti 18 mm od osy svazku. Vzdálenost hran obou kvadrupólů je 2 cm.

Na obr. 4.2 a 4.3 je vidět návrh uspořádání pro iontový, resp. elektronový svazek.



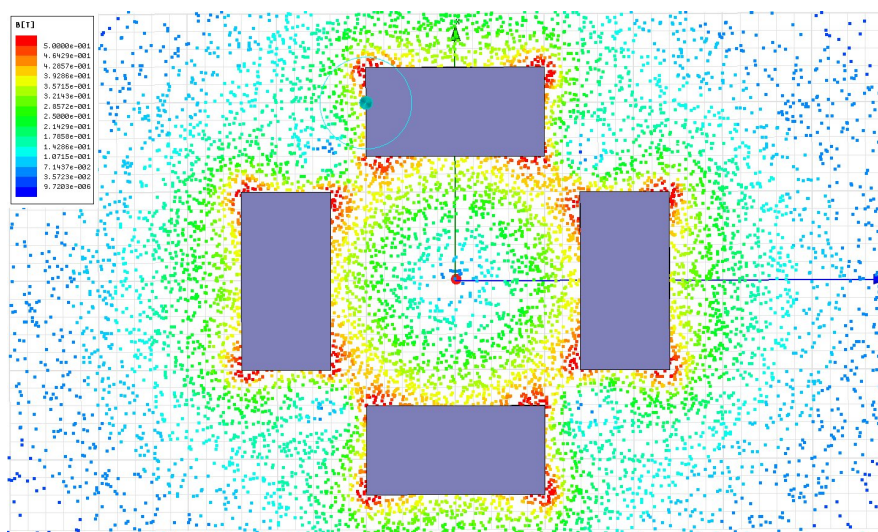
Obrázek 4.2: Rozložení magnetů pro svazek iontů



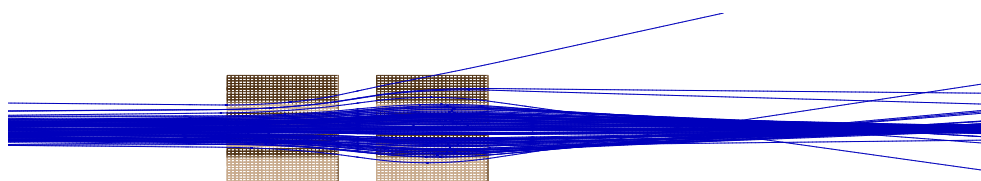
Obrázek 4.3: Rozložení magnetů pro elektronový svazek

Výsledné magnetické pole je na obr. 4.4. Je patrné, že velikost magnetické indukce je v oblasti mezi magnety přímo úměrná vzdálenosti od osy svazku

Na obr. 4.5 je vidět svazek iontů N_2^+ prolétávající v navrhovaném uspořádání magnetů. Zleva přichází svazek z elektrostatického urychlovače (není na obrázku), prochází magnety a fokusuje se. V pravé části by byla umístěna detekce. Fokusační vzdálenost (vzdálenost, ve které je průřez svazku nejmenší) lze do jisté míry měnit přibližováním nebo oddalováním obou kvadrupólů.

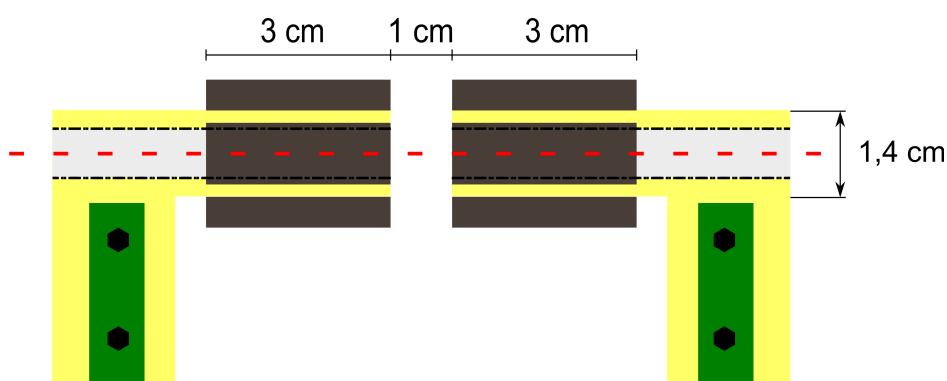


Obrázek 4.4: Hodnota magnetické indukce při uspořádání magnetů do kvadrupólu. Simulace v programu Ansoft Maxwell.



Obrázek 4.5: Svazek iontů N_2^+ prolétající magnety zleva doprava. V pravé části by byla umístěna detekce. Simulace v programu SIMION.

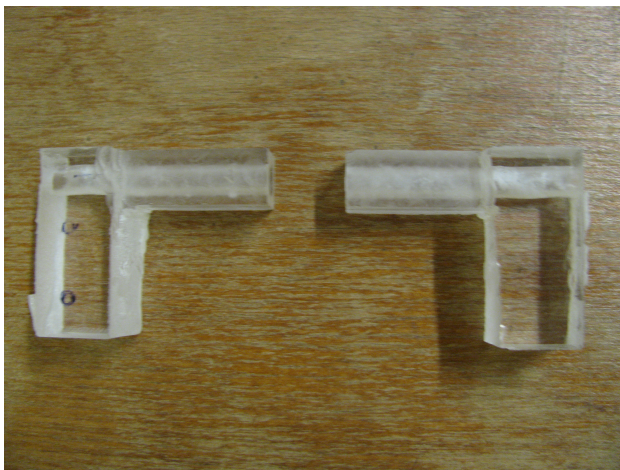
4.2 Provedení konstrukce



Obrázek 4.6: Nákres držáků pro iontový svazek. Červená přerušovaná čára je osa svazku, žlutě jsou držáky z plexiskla, zeleně jejich úchyt k podložce. Magnety jsou naznačeny hnědšedou barvou.

Magnety určené pro iontový svazek jsou uchyceny pomocí dvou držáků vyrobených z průhledného plexiskla. Nákres držáků s magnety je vidět na obr. 4.6. Fotografie držáků bez připevněných magnetů jsou vidět na obr. 4.7 a 4.8 Při výrobě byly držáky

nejdříve nahrubo vyříznuty, poté ofrézovány do požadovaného tvaru a nakonec v nich byly vyvrtány otvory, kterými bude procházet svazek. Problémem při opracovávání byla nízká teplota, při které se zvolené plexisklo taví. Magnety jsou k plexisklu přichyceny dvojsložkovým epoxidovým lepidlem, které je určeno pro lepení ve vakuu. Držáky na magnety v uspořádání pro elektrony nebyly vyrobeny.



Obrázek 4.7: Držáky bez přilepených magnetů.



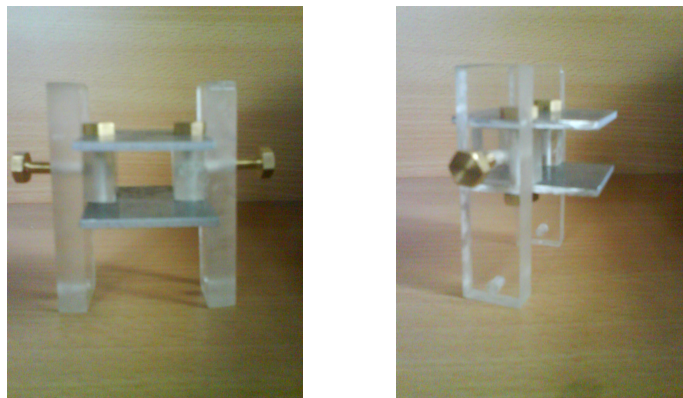
Obrázek 4.8: Čelní pohled na držák.

Kapitola 5

Diagnostika svazku

5.1 Konstrukce elektrostatického spektrometru

Pro měření svazku iontů N_2^+ urychlených na 20 – 30 keV jsme vyrobili elektrostatický spektrometr. Pro jeho konstrukci jsme použili dva hliníkové obdélníkové pláty o rozměrech 5×4 cm a tloušťce 2,7 mm. Oba pláty jsou zasazeny do rámu z plexiskla 1,9 cm od sebe. Na vrchní elektrodu bude přivedeno napětí 400 V, dolní bude uzemněna. Svazek bude procházet středem spektrometru po celé jeho délce, t.j. 5 cm, a bude dopadat na 4 cm vzdálené fluorescenční stínítko. Stínítko bude snímat web kamera připojená k počítači. Celá konstrukce bude připevněna ke kovové podložce a spolu s dalšími součástmi experimentu vložena do vakuové komory. Elektrostatický spektrometr je zobrazen na Obr. 5.1.

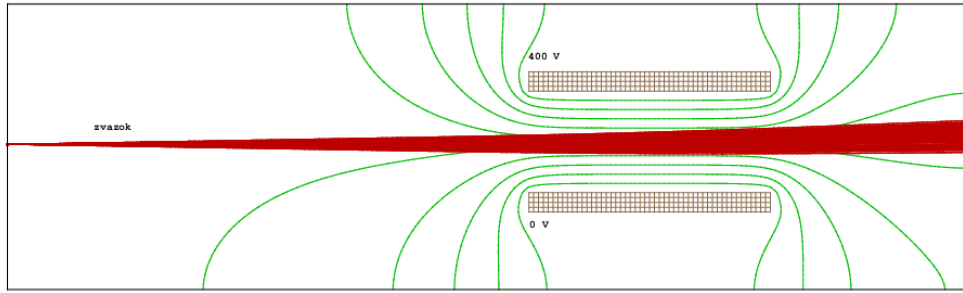


Obrázek 5.1: Elektrostatický spektrometr.

Spektrometr jsme zkušebně připojili ke zdroji napětí a voltmetrem změřili přivedené napětí na elektrodách.

V Tab. 5.1 jsou uvedeny výchylky iontů N_2^+ a elektronů při požadovaných energiích získaných ze simulací v Simionu (při změně energie částice o 1 keV se změnila výchylka přibližně o 0.055 mm) a na Obr. 5.1 je znázorněna simulace spektrometru v programu Simion.

Zkonstruovaný spektrometr s uvedenými parametry by měl být tedy vhodným detektorem pro měření energie urychlených iontů v rozsahu 20 – 30 keV.



Obrázek 5.2: Simulace spetrometru v programu Simion.

Tabulka 5.1: Výchylky iontů N_2^+ a elektronů v elektrickém poli při různých energiích.

E [keV]	$\Delta y_{N_2^+}$ [mm]	Δy_{e^-} [mm]
30	1.58	1.62
25	1.90	1.94
20	2.37	2.41

5.2 Konstrukce proudového transformátoru

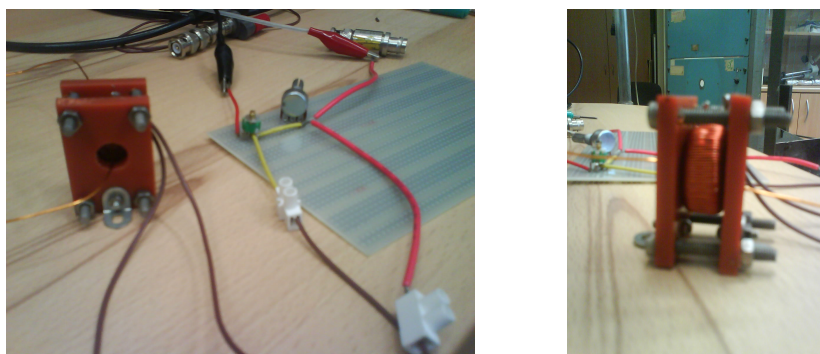
Náboj svazku bude měřit cívka, která je zapojena v obvodu s odporem a kondenzátorem. Cívka se skládá z feritového jádra, na kterém je navinutý měděný drát a je umístěna ve stojanu tvořeném dvěma obdélníky spojenými šrouby, viz Obr. 5.3. Jako kondenzátor byl použit kapacitní trimr s rozsahem 2.5–22 pF a jako odpor jsme použili lineární potenciometr s max. odporem 1 k Ω .

Tabulka 5.2: Parametry cívky

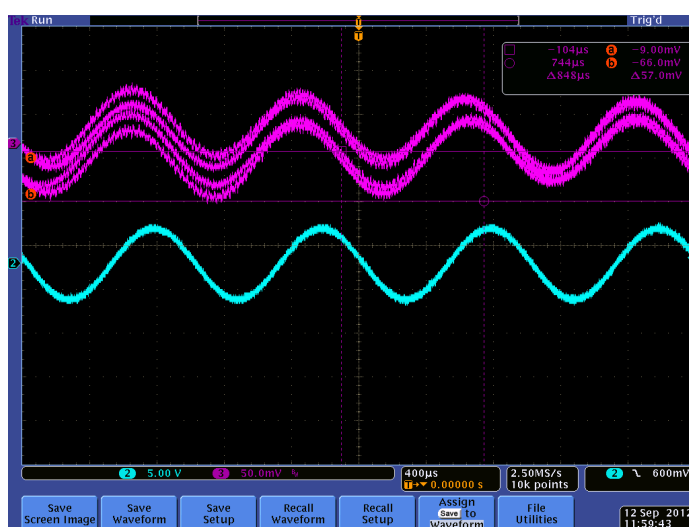
Indukčnost	470 μ H
R _{dc}	0.322 Ω
I _{dc}	0.5 A
Vnější průměr	20 mm
Vnitřní průměr	10 mm
Délka	9 mm

Pro testování jsme zvolili pulzní zdroj, ke kterému byl připojen měděný drát. Ten procházel jádrem cívky a simuloval svazek částic. Na osciloskopu jsme pozorovali průběh signálu generovaného cívkou i pulzním zdrojem. Na Obr. 5.4 a Obr. 5.5 je znázorněn průběh signálu z cívky pro dva různé typy signálů ze zdroje. Signál z cívky je znázorněn fialovou a signál ze zdroje modrou barvou. Můžeme vidět, že cívka poměrně dobře kopíruje tvar signálu ze zdroje.

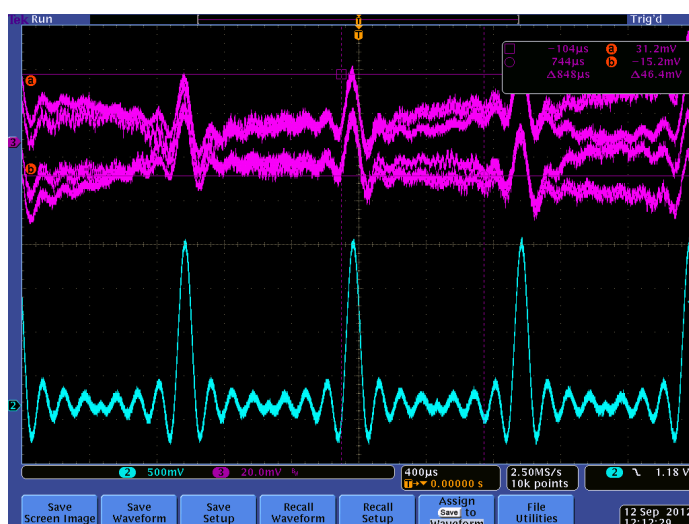
Pro signál zdroje $\sin x$ jsme změřili amplitudu signálu generovaného cívkou. Zdroj generoval pulzy s frekvencí 1 kHz a k měděnému, který procházel cívkou byl připojen ještě pomocný odpor o velikosti 1 k Ω . Výsledky měření jsou uvedeny v Tab. 5.3. Při amplitudě zdroje 2 V je již signál z cívky skryt v šumu, proto je hranice detekovatelnosti proudu procházejícího cívkou v řádu mikroampér. Po odstranění šumu bychom teoreticky mohli detekovat i mikroampéry, protože proud generovaný zdrojem částic bude v řádech mili až mikroampér. Zkonstruovaný detektor sestávající z cívky a RC



Obrázek 5.3: Cívka zapojená v obvodu s odporem a kondenzátorem.



Obrázek 5.4: Signál produkovaný cívkou (fialová) při pulzu ve tvaru $\sin x$ (modrá).



Obrázek 5.5: Signál produkovaný cívkou (fialová) při pulzu ve tvaru $(\sin x)/x$ (modrá).

obvodu je tedy vhodný pro detekci proudů v řádech miliampér a pro naše účely měření náboje částic by měl být postačující.

Tabulka 5.3: Výsledky měření amplitudy signálu.

Amplituda zdroje [V]	9	3	2
Amplituda signálu [mV]	66	36	14.5
Amplituda šumu [mV]	28.5	23	23.2
Proud procházející cívkou [mA]	9	3	2

Kapitola 6

Závěr

Všechny součásti experimentu jsou sestaveny a připraveny k měření. Sestavili jsme dva typy urychlovačů: jeden elektrostatický, druhý indukční. Indukční urychlovač dokáže urychlovat nabitě částice na energie až 30 keV, elektrostatický dokonce 50 keV. Urychlujeme elektrony tvořené elektronovým dělem.

Elektrostatický urychlovač je tvořen čtyřmi měděnými elektrodami umístěnými do řady a nabitými na vysoké napětí. Elektrony putují z děla nabitého na potenciál -50 kV a prolétávají elektrodami se zmenšujícím se napětím po 12,5 kV až proletí poslední elektrodou, která je uzemněna. Jako zdroj napětí slouží Marxův generátor připojený na trafo z televize. Tento zdroj napětí funguje pulzně, přičemž vrchol pulzu je na ≈ 50 kV.

Indukční urychlovač tvoří jedna cívka ve tvaru toroidu s feritovým jádrem. Elektrony se urychlují proměnným magnetickým polem, jež indukuje elektrickou intenzitu uprostřed cívky. Jako pulzní zdroj napětí byl použit 100 voltový stejnosměrný zdroj napětí spolu s IGBT tranzistorem, který je řízen pulzním zdrojem napětí. S pomocí této kombinace lze dosáhnout vhodného náběhu napětí, aby se elektrony urychlily na energie okolo 30 keV.

Svazek částic je poté fokusován dvěma kvadrupólovými magnety, jež jsou oba tvořeny permanentními magnety kvůli jednodušší konstrukci. Vzdálenost mezi magnety je uzpůsobaná vzhledem k energii částic podle simulací v programech SIMION a Maxwell.

Diagnostiku svazku provádíme dvěma detektory, z nichž jeden slouží pro měření intezity svazku a druhý k měření dosažené energie. Díky tomu, že oba urychlovače fungují v pulzním režimu, můžeme k měření intenzity použít proudový transformátor. Ten je tvořen toroidální cívkou s feritovým jádrem připojenou na digitální osciloskop, ze kterého budeme vyčítat signál.

Energii částic měříme elektrostatickým spektrometrem, jež je sestaven ze dvou rovnoběžných čtvercových elektrod nabitých na napětí 400 V. Tyto elektrody zahýbají svazek v transverzálním směru podle toho, jakou mají energii. Svazek poté dopadá na stínítko tvořené obrazovkou z vyřazeného osciloskopu. Pozice dopadajícího svazku je zaznamenána webkamerou a zobrazena na počítači. Energie je poté určena podle výchylky, která se srovná se simulacemi provedenými v programu SIMION.

Všechny komponenty je možné použít také pro urychlování iontů. Iontový zdroj se nám však nepodařilo zatím sestavit.

Literatura

- [1] APRA kolaborace, *Conceptual Design Report – Urychlovače nabitých částic*, FJFI ČVUT v Praze, 2012.
- [2] Z. Doležal, *Urychlovače nabitých částic*, Ústav částicové a jaderné fyziky, MFF UK Praha, 2011.
- [3] Z. Doležal, *Text k přednášce Urychlovače nabitých částic*, (citace z 9. 2. 2012), http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/~dolezal/teach/accel/urych_fyzika.pdf.
- [4] F. W. Peek, Jr., *The sphere gap as a means of measuring high voltage*, Trans. A.I.E.E. Vol. 31, Detroit, 1914.
- [5] P.T. Brady, *The Construction of a 200 keV Accelerator*, Houghton College, 2004, <http://www.houghton.edu/2Facademics/2Fprograms/2Fphysics/2FStudent/2520research/2FTheses/2F2004/2520Peter/2520Brady/2FThesis.pdf>.
- [6] S. Giere, M. Kurrat, U. Schümann, *HV Dielectric Strength of Shielding Electrodes in Vacuum Circuit-Breakers*, 20th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum – Tours, France, 2002.
- [7] M. Okawa, T. Shiori, H. Okubo, S. Yanabu, *Area Effect on Electric Breakdown of Copper and Stainless Steel Electrodes in Vacuum*, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 23, No. 1, pp. 77-81, 1988.
- [8] *Build a Simple Marx Generator* (citace z 12. 9. 2012), <http://www.instructables.com/id/Build-a-simple-Marx-Generator/>.
- [9] *Quick & Dirty Marx Generator* (citace z 12. 9. 2012), <http://www.electricstuff.co.uk/marxgen.htm>.
- [10] B. Sedlák, I. Štoll, *Elektřina a magnetismus, Indukčně vázané obvody str. 291, Indukce solenoidu str. 217*
- [11] Braam M. Daniels, http://www.coilgun.info/plim/braam_daniels_pulsed_linear_induction_motor.pdf
- [12] *Wikipedia. Faraday's law of induction*, http://en.wikipedia.org/wiki/Faraday%27s_law_of_induction.
- [13] *Elektromagnetická indukce*, http://webfyzika.fsv.cvut.cz/PDF/prednasky/elektromagneticka_indukce.pdf
- [14] Úlehla, M. Suk, Z. Trka, *Atomy jádra částice*, Academia,. Praha, 1990.

LITERATURA

- [15] *Sbírka řešených úloh z fyziky: Elektřina a magnetismus*,
http://www.fyzikalniulohy.cz/uloha_442.
- [16] Doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc., Ing. Petr Skala: “Vysoké napětí a elektrické přístroje”. Část I: Vysoké napětí
- [17] Diskuze na Zimní škole EJF. Bílý Potok, (17. 1. 2012).
- [18] M. Šimko, *Simulace v programu SIMION*, (20. 6. 2012).