

Projekt Velox

Stavba lineárního urychlovače částic
Hynek Uvíra, Ondřej Martinák, Richard
Komínek, David Zapletal

Obsah

Projekt Velox	1
Obsah	2
Historie a druhy urychlovače	3
Počátek urychlování	3
Elektrostatické urychlovače	3
Cyklotron	6
Betatron	8
Synchrotron	8
Lineární urychlovač	10
Teorie	10
Princip, součásti a fungování urychlovače	10
Střední vzdálenost	13
Technika a stavba	14
Vnější trubky	14
Zdroj častic	15
Čtyřpolový magnet	15
Hlavní urychlovací část	16
Atmosféra v komoře	17
Počítač a výpočetní technologie	18
Software	18
Měřící technika	19
Vyhodnocení měření	20
Hmotnostní spektrometrie	20
Osciloskop	21
Faradayův pohárek	21
Horká katoda	22
Bezpečnost	24
Radiace	24
Faradayova klec	24
Tloušťka skla	24
Hašení	25
Výpočty	25
Shrnutí	28
Zdroje	29
Zdroje informací	29
Zdroje obrázků	30

Historie a druhy urychlovače

Počátek urychlování

Objev urychlování částic byl motivován zejména tím, že vědci o jistý čas dříve poprvé objevili subatomární částice (v roce 1896 J. J. Thompson dokázal jejich existenci a v roce 1911 E. Rutherford popsal stavbu atomu) a bylo potřeba je více studovat. Urychlování částic se stalo první objevenou metodou štěpení atomů, neboť pomocí urychlovače částic bylo možné částice akcelerovat na takovou rychlosť, že když do sebe narazily, došlo ke štěpení.

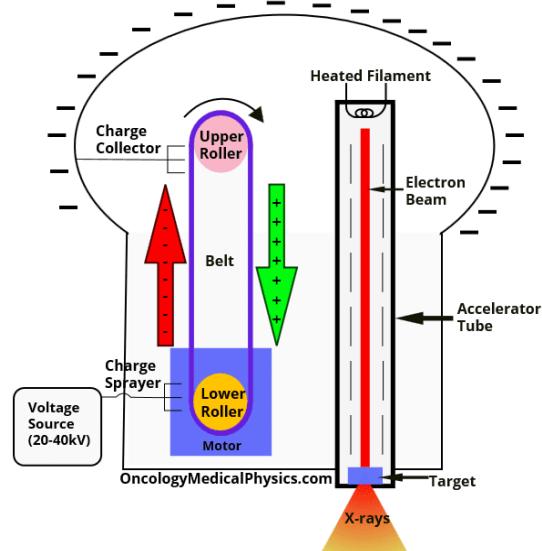
Elektrostatické urychlovače

Prvním druhem urychlovače částic je elektrostatický. Ten jednoduše využívá princip urychlení částice tím, že je vpuštěna do statického elektromagnetického pole o vysokém napětí. Sice neurychlí částici tak moc, jako elektromagnetický, avšak je levnější a vytváří větší paprsek částic, proto je nejvíce používán, zejména v jednodušším výzkumu a v průmyslu.

První elektrostatický urychlovač částic byl uveden do provozu 14. dubna 1932. Sestavili ho Rutherfordovi žáci John Cockcroft a Ernest Walton v Cavendish laboratory. K jeho napájení sestavili tzv. Cockcroft-Waltonův generátor, což byla série kapacitorů zvyšujících napětí. Provedli v něm vůbec první štěpení atomu v historii. Urychlili zde jádro vodíku až na energii 280 keV a nasměrovali je k nárazu do atomu lithia, čímž ho úspěšně rozštěpili na dvě alfa částice. Později za tento výkon dostali oba Nobelovu cenu.



Další takovýto urychlovač postavil Robert Van de Graaff . Zde je nejdůležitější jeho napájení, a to stále používaným a oblíbeným Van de Graafovým generátorem. Ten funguje na principu, že uvnitř vodiče nemůže být elektrické pole a všechn náboj v něm se přenese na jeho povrch. Základem zařízení je tedy kovová koule, do které je po pásu dopraven náboj. Tímto způsobem se dá na povrchu koule získat opravdu velký náboj, ten se poté dá použít na urychlení částic, a to skrz vytvoření kladného elektromagnetického pole, které přitáhne záporné částice do jeho středu - konce trubky (stejný mechanismus je i u prvního elst. urychlovače).



Tento urychlovač se dá ještě vylepšit na tzv. Tandemový urychlovač, kde je urychlovací část dvakrát delší, a to proto, že když částice dorazí do středu urychlovacího kladného elektrického pole, dostanou se do nové součástky zvané “stripper”, která jim odebere elektrony tak, aby najednou měly kladný náboj. Dá se odebrat i více elektronů pro silnější náboj. Částice je tedy najednou od středu pole odpuzována až do cíle. Tímto vylepšením můžeme získat více než dvakrát větší zrychlení.

V tzv. Dynamitronu z roku 1958 se využívá jiný princip napájení kaskádového generátoru, a to ne jedním přípojem dole, ale vysokofrekvenčním oscilujícím napětím mezi dvěma elektrodami.

Poslední typ, který rozebereme, je Pelletronový urychlovač. Byl vyvinut v 60. letech v Národní elektrostatické laboratoři ve Wisconsinu. Zde je místo pryžového pásu v generátoru použit kovový řetěz rychleji přenášející náboj.



Jedním z využití těchto urychlovačů, a zde zejména prvního z nich, je v průmyslu, jelikož se dají použít jako (v rámci mezí) levný zdroj volných neutronů. Tento neutronový generátor funguje na bázi jaderné fúze deuteria či tritia a jeho iontu. Aby se tato fúze podařila, je nutné ionty patřičně urychlit a dodat jim energii, což dělá právě náš CW urychlovač. Pomocí urychlování se dají vyrobit či uvolnit i jiné částice.

Další z popsaných urychlovačů jsou vhodné pro svou schopnost vytvořit paprsek iontů o velké škále možné energie (i když ne tak velké, jako u elmag. urychlovačů). Proto jsou využívány ve fyzice třeba pro analytické

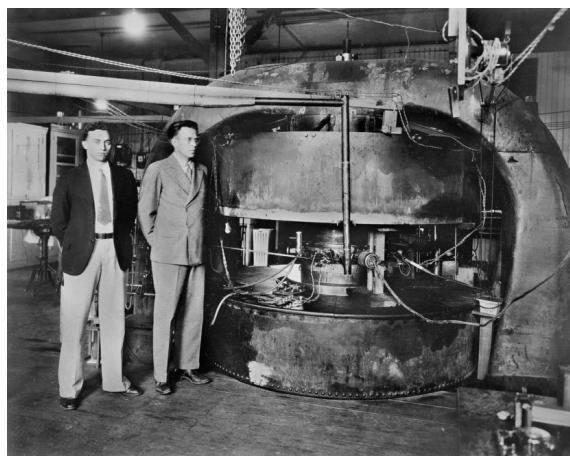
metody ke zjištění složení látek, například metoda RBS, kdy se na látku namíří náš paprsek a poté jsme schopni velmi přesně určit dokonce i složení atomů, podle toho, kolik iontů se odrazilo zpět a jak (ranou formou této metody bylo ostatně objeveno jádro atomu).

Menší verze těchto urychlovačů se často používají v průmyslu či medicíně pro urychlení paprsků na velmi vysoké energie, například pro vytváření Rentgenového záření, zpracování různých materiálů atd.

Cyklotron

Současně s Cockroftem a Waltonem, avšak na druhé straně Atlantiku, pracoval Ernest Lawrence na stavbě prvního cirkulárního urychlovače. Jeho výzkum probíhal na univerzitě v Berkeley (Kalifornie, USA) a byl podnícen E. Rutherfordem, který k pokusům potřeboval částice o mnohonásobně vyšší energii, než jaké byly v přírodě přirozeně dostupné. Inspirace k sestrojení zařízení přišla z článku norského technika Rolfa Wideröeho, který na papíře navrhl nákres přístroje, který by používal stejný el. potenciál vícekrát. Lawrencovi se tento návrh líbil, jelikož shledal, že použití lineární verze není kvůli délce přístroje zrovna vhodné při urychlování lehčích částic.

Jeho zařízení začalo vznikat na počátku roku 1930 a za rok bylo hotové. Nový přístroj urychlil s průměrem trubky 11,4 cm ionty vodíku až na 80 keV. Nicméně Lawrence a Livingston nedokázali dost brzy najít výzkumné využití tohoto přístroje, tento závod tedy vyhráli Cockcroft a Walton.



Cyklotron je první ze druhé skupiny urychlovačů, tzv. elektromagnetických, které se vyznačují užitím ne statického, nýbrž oscilujícího elektromagnetického pole. Cyklotron je kruhové zařízení, u jehož obvodu je velký elektromagnet tvořící statické magnetické pole. Když je částice umístěna do středu tohoto kruhu, začne na ní působit Lorentzova síla přitahující ji po spirálovité dráze k elektromagnetu na kraji.

Do kruhu se naproti sobě umístí dvě elektrody známé jako "Dees", jelikož mají tvar D, aby sedely do kruhu. Mezi nimi tedy máme pruh volného prostoru, kde se vytvoří oscilující elektrické pole. To mění svou polaritu tak, že vždy, když se částice dostane do pruhu s polem, siločáry míří stejným směrem, jako částice, takže pole částici pokaždé urychlí. Tak je částice mnohonásobně urychlena na poměrně malém prostoru.

V následujících letech po první konstrukci se zjistilo, že má nové zařízení i lékařské užití, a začaly se stavět další přístroje, přičemž v roce 1940 už bylo na světě 35 funkčních cyklotronů (z toho 24 v USA).

V roce 1952 vznikla verze jménem synchrocyclotron, zde je hlavní rozdíl od běžného cyklotronu ten, že u synchrocyclotronu se zmenšuje frekvence pole, aby odpovídala relativistickým jevům, kdežto u normálního cyklotronu je stále stejná. Dalším typem je izochronní cyklotron, který výše zmíněný nedostatek nevynahrazuje změnou frekvence, nýbrž používá speciální magnety, pomocí nichž je možno dosáhnout jiné intenzity magnetického pole na různých místech, což nedostatek kompenzuje.

V současnosti se cyklotrony používají zejména pro účely jaderného výzkumu v laboratořích, ale také významně pomáhají léčit rakovinu. Největší z nich se nachází v laboratoři TRIUMF v kanadském Vancouveru.

Nejsilnější cyklotron se nachází v Japonsku, v Nishinském centru pro výzkum urychlovačů. Je speciální tím, že magnet je zde rozdělen do šesti sektorů. Z cyklotronů má paprsek o nejvyšší intenzitě a dokáže se dostat až na 70 procent rychlosti světla. Také má 100krát nižší spotřebu energie než u obvyklých cyklotronů, a to díky použití supravodivosti, kde vodiče nekladou žádný odpor.

Betatron

Betatron je urychlovač velmi podobný synchrotronu (níže). Narozdíl od cyklotronu neurychlují částice po spirálovité dráze, nýbrž po stále se opakující kruhové. Částice také nejsou urychlovány dvěma velkými magnety, ale jen jedním. Částice tedy obíhají kolem dokola a jsou stále urychlovány magnetem měnícím směr tak, aby byly vždy urychleny a ne zpomaleny, který je zároveň drží na jejich dráze. Naneštěstí má tenhle systém limitaci síly, a to hodnotou nasycení magnetu, kdy už síla magnetického pole nemůže dále vzrůstat a proto už částice nejsou dále urychlovány, pouze si udrží rychlosť. Synchrotron tento problém řeší tím, že nepoužívá k urychlování magnety. Betatrony urychlují zejména elektrony a beta částice.

Synchrotron

U synchrocyclotronu jsme si mohli všimnout postupného snižování frekvence kvůli relativistickým změnám ve větších rychlostech. Touto metodou se však dá pokrýt i zvyšování rychlosti částic v normální fyzice, které bylo u cyklotronu vyřešeno tím, že když zde částice putuje ve spirále, uráží stále větší dráhu mezi jednotlivými zrychleními, vypočtenou, aby zvýšení rychlosti vyrovnalala. To však nutně přináší komplikaci s velikostí přístroje (čím větší chceme dosáhnout energie, tím větší musí spirála být).

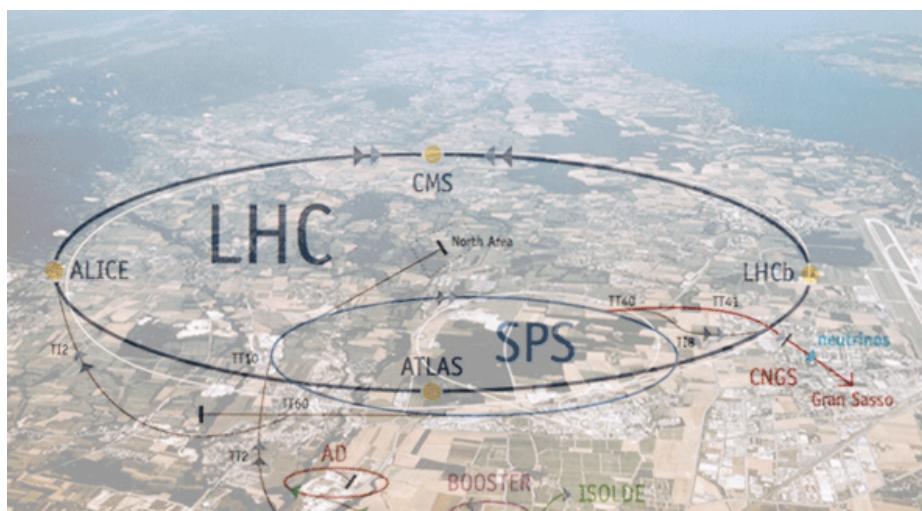
Synchrotron tento problém řeší právě změnou frekvence oscilace elektromagnetického pole. Částice je zde vpuštěna do kruhového tunelu a magnety po celé své trase usměrňována, aby se držela kruhové dráhy. Princip urychlení v poli mezi dvěma magnety opačné polarity zůstává stejný, avšak díky přizpůsobené frekvenci oscilace může být částice urychlována na stejně trase stále dokola. Synchrotron, ač technicky velmi složitý na postavení, výrazně šetří prostor a když hodnotíme rychlosť částice, která je například v LHC 99.9999991 procent rychlosti světla, je ze všech urychlovačů nejvýkonnější. Protony zde byly urychleny až na energii 1,18 TeV.

Jako vynálezci principu synchrotronu jsou označováni sovětský Vladimir Veksler a americký Ed Macmillan. První byl Veksler v r. 1944, nicméně Macmillan podal návrh o rok později nezávisle na něm. První

synchrotron byl ve skutečnosti konvertovaným betatronem, byl postaven v Británii v roce 1952 a urychloval elektrony až na 8 MeV.

Synchrotron většinou kvůli výzkumu nestojí sám o sobě. Místo toho jsou částice urychleny lineárním urychlovačem na nějakou počáteční rychlosť, než jsou vpuštěny do stroje, a po jejich urychlení na co nejvyšší rychlosti se přesunou do skladovacího prstence, několikanásobně většího kruhu kolem urychlovače, kde si udrží svou rychlosť po zhruba 20 hodin (různí se). Zde můžou být zkoumány například nárazy urychlených částic do sebe, ale hlavním účelem dlouhého přenechávání urychlení bývá to, že částice vyzařuje tzv. synchrotronovou radiaci nebo synchrotronové světlo, což je druh elektromagnetického záření vyzařovaný částicemi pohybujícími se po křivce. Toto záření se velmi hodí ke vědeckým účelům a ke zkoumání mnoha látek.

Největším a nejvýkonnějším synchotronem (a také urychlovačem obecně) je Velký hadronový urychlovač (Large Hadron Collider - LHC) ve švýcarském CERNu. Je to 27 km dlouhý prstenec, který urychlí elektrony až na výše zmíněných 99,9999991 % rychlosti světla. CERN obsahuje i další urychlovače (včetně několika LINACů). Je zde i nejsilnější urychlovač protonů, a to sedmikilometrový Super Proton Synchrotron.



Postavit synchrotron, zvláště dost velký, je samozřejmě extrémně drahé a náročné, proto na světě existuje jenom zhruba 70 těchto strojů.

Lineární urychlovač

Princip lineárního urychlovače zde nebude rozebíráno, je popsán níže.

První návrh lineárního urychlovače částic přišel od švédského fyzika Gustava Isinga v roce 1924. V jeho původním návrhu bylo užito pulzujícího proudu, což je stejnosměrný proud, jehož hodnota však pulzuje. Roku 1928 byl však místo něj navržen střídavý proud s RF zdrojem, jaký se dnes používá nejčastěji a jaký budeme používat i my.

V praxi byl LINAC poprvé postaven již v roce 1931. Obsahoval 30 DT, ve kterých se ionty rtuti urychlovaly až na energii 1.25 MeV (později se 36 DT až na 2,8 MeV). Celé zařízení sestrojoval zejména David Sloan, s pomocí výše zmíněného E. Lawrence v Berkeley. Přístroj dosahoval délky asi 2 metry.

Tento urychlovač od té doby neprošel žádnou velkou změnou, ačkoli se dosahovalo stále větších energií díky novým pokrokům ve vědě a díky práci s jinými typy urychlovačů, jež také přinesla mnoho užitečných informací.

Teorie

Princip, součásti a fungování urychlovače

Urychlování částic je nedílnou součástí celé řady každodenních technologií, které významně ovlivňují náš život. Například zářivky, které se běžně používají k osvětlení našich domovů, využívají principy urychlování částic ke generaci světla. Podobně monitory s katodovou trubicí (CRT), které byly kdysi standardem v televizorech a počítačových obrazovkách, využívají urychlené elektrony k vytváření obrazu nárazem na fosforeskující materiály. Mikrovlnné trouby také využívají urychlování částic k ohřevu potravin pomocí excitace molekul vody. Jednou z nejdůležitějších využití je v lékařství, zejména při léčbě rakoviny. V této souvislosti se používá metoda využívající urychlené elektrony, které se srážejí se speciálně chlazeným wolframovým terčem. Vzniklé vysokoenergetické rentgenové záření je pak přesně nasměrováno na rakovinové buňky.

Tento druh urychlovače jsme vybrali, protože nemusí využívat další magnety na řízení částic správným směrem, takže se můžeme soustředit čistě na urychlování, narozdíl od cyklotronů a synchrotronů, které využívají drahých magnetů na řízení částic. Jednou z hlavních nevýhod je však délka. U kruhových urychlovačů bychom mohli stále dokola urychlovat částice na rychlosti přibližující se k rychlosti světla, zatímco zde bychom museli postavit desítky kilometrů dlouhou komoru, což je velmi nevýhodné.

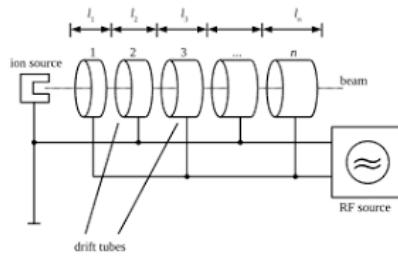
Oproti synchrotronům je potenciální energie mnohem vyšší, protože částice se zde setkávají se synchrotronovou radiací, objevující se u částic s kruhovou dráhou (tohle se děje např. u elektronů obíhajících černou díru).

Lineární urychlovače také mohou udržet stálý tok částic, což může vést k přesnějším měřením (záleží na kapacitaci kondenzátoru). Urychlovače s pulzujícím odevzdáním částic mohou výrazně zhoršit přesnost měření. Stálý tok částic je možný (později vysvětleno), protože se frekvence nemění a částice prostě mohou pokračovat dále a dále.

V našem projektu budeme urychlovat izotopy helia-4, kterým se říká alfa částice (2 protony, 2 neutrony). Nazvali jsme ho Projekt Velox (Velox - latinsky rychlosť). K tomu využijeme lineární urychlovač částic neboli LINAC (LINEar ACcelerator) navrhnutý Gustavem Isingem.

Než se pustíme do složitého procesu urychlování částic, je nutné vytvořit v komoře urychlovače vakuum. Vytvoření vakua znamená dosažení mimořádně nízkého tlaku, přibližně 2 Pascaly (Pa) nebo nižšího, aby se výrazně snížila pravděpodobnost srážky mezi urychlovanými částicemi a zbývajícími molekulami vzduchu v komoře. Jedním z problémů, které musíme řešit, je přítomnost vody, ta může poničit přístroje aktivní v komoře. K řešení tohoto problému nasadíme turbomolekulární pumpu. Jakmile bude vytvořeno vhodné vakuum, zavedeme do komory helium a budeme pokračovat v odčerpávání veškerého dalšího znečištění.

Nejdříve iontový generátor ionizuje atom helia-4, čímž se vytvoří alfa částice. Helium bude vpouštěno přímo k ionizátoru (aby se kladně nabilo co největší procento). Částice následně putují do části zařízení zvané “*drift tubes*” (tento pojem se nedá dobře přeložit z angličtiny, nicméně jsou to trubky, kterými částice putuje). Jednotlivé “*drift tubes*” (nadále bude používán výraz DT) mají střídavou polaritu tak, aby vždy první byla pozitivní, druhá negativní atd. Než částice dojde k další mezeře, polarita, která pravidelně osciluje za frekvence nižší VHF (*very high frequency*), se změní, a částice je tak urychlena i v každé z dalších mezer (vždy, když prochází mezerou, předchozí trubka má pozitivní polaritu a ta následující negativní). Musíme přihlížet k tomu, že oscilace se nezrychluje, zatímco částice ano. Proto je každá trubka o něco delší než předchozí, v závislosti na zrychlení částice.



U zdroje bude umístěn čtyřpolový magnet ve formaci připomínající znak plus. Polarita magnetů kolmo k sobě bude opačná, aby byly ionty v urychlovači magnety orientovány správně do malého iontového paprsku. S dostatečnými finančními zdroji by bylo možno postavit magnet šestipolový, což by tvořilo paprsek soustředěnější. Hlavním účelem magnetu je, aby byly



částice správně usměrněné a nelétaly pryč, protože poté by se jich nedostalo dost do samotného urychlovače. Použitím magnetů těmto ztrátám zamezíme.

Alternativním přístupem k prostému prodlužování délky DT je pravidelné zvyšování frekvence systému těsně před výstupem částic z trubky. Tato metoda sice potenciálně zvyšuje přesnost, ale přidává další vrstvu složitosti, pokud jde o výpočty a nastavování systému. Proto budeme v zájmu jednoduchosti a snadné implementace pokračovat ve strategii prodlužování trubek.



U urychlovačů musíme rozlišovat mezi dvěma druhy, a to mezi těmi s progresivním a stacionárním vlněním. Progresivní vlnění v podstatě přenáší i energii, nemění se zde vůbec nic. U stacionárního vlnění se energie jen přenáší tam a zpět mezi potenciální a kinetickou. Kmitají zde všechny body mezi dvěma uzly se stejnou fází, ale různou velikostí výchylky. Mohli bychom si dát příklad vlny a tsunami. Tsunami je příkladem progresivního vlnění, které přenáší energii a vlny jsou příklad vlnění stacionárního.

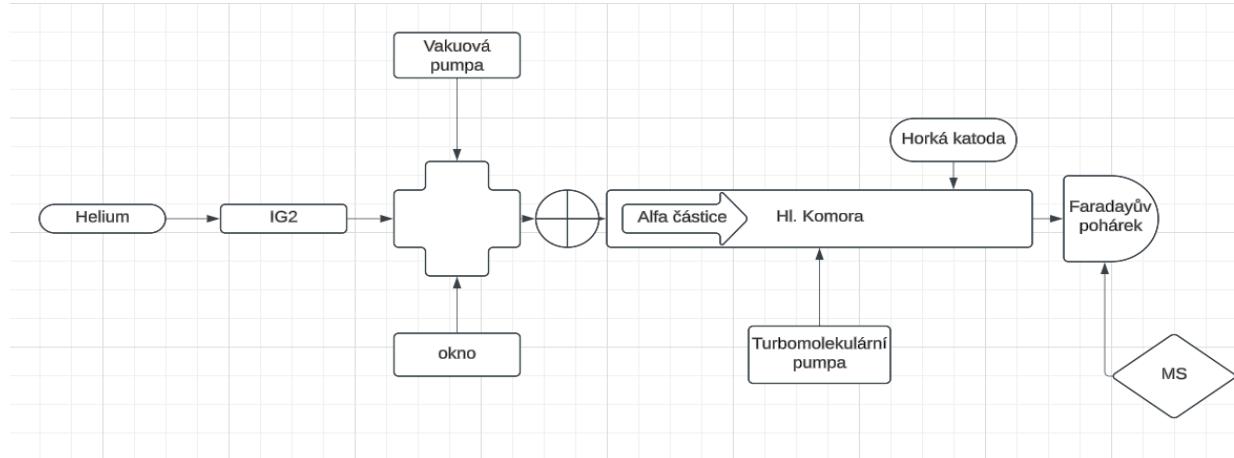
Střední vzdálenost

Střední vzdálenost, neboli také MFP (*mean free path*) je průměrná vzdálenost mezi body změny dráhy či energie pohybující se částice. Toto je většinou způsobeno nárazem do jiné částice. Kdybychom v komoře využívali atmosférického tlaku, alfa částice by se příliš daleko nedostala, protože by narazila do velkého počtu částic a tím by ztratila energii. Za atmosférického

tlaku je MFP nějakých 77 nm (velikost koronaviru), zatímco my chceme dosáhnout asi 20 cm (vysoké vakuum). S dostatečnými finančními zdroji, tak by bylo možno koupit turbomolekulární pumpu, která by nás dostala na 0,00005 Pa ($\lambda = 300$ m)

Technika a stavba

Tuto kapitolu si rozdělíme na osm části, které dopodrobna technicky i z části teoreticky rozebereme. Tyto části jsou: vnější trubky, zdroj částic, urychlovací část, Q-magnet, atmosféra v komoře (vakuum a helium), počítač a výpočetní technologie a software.



Vnější trubky

Jako vnější trubky využijeme standartní ocelové vakuové trubky, s typem příruby CF a kompletně zajištěnými konci, tvaru "nipples", což znamená s přípoji na obou stranách. Tyto budou napojené na stejný typ trubek, ale ve tvaru plus, či napojené na Faradayův pohárek. Vnější plášť pokryjeme vrstvou izolace ze skleněných vláken a výhřevem. Izolace bude dále zakryta druhou vrstvou pláště, tentokrát plastovou, vyrobenou pro všeobecnou ochranu komory.

Ve firmě Kurt J. Lesker tyto trubky vytvářejí na zakázky s různými parametry, včetně otvory pro přídavné zařízení. U této firmy si budeme moci objednat perfektní trubky přesně podle našich požadavků, takže bude celá konstrukce kvalitnější a utěsněnější.

Trubky budeme muset před sestavením utřít acetonem a isopropanolem, protože jakákoli imperfekčnost zde může znamenat místo vniku plynu do trubky.

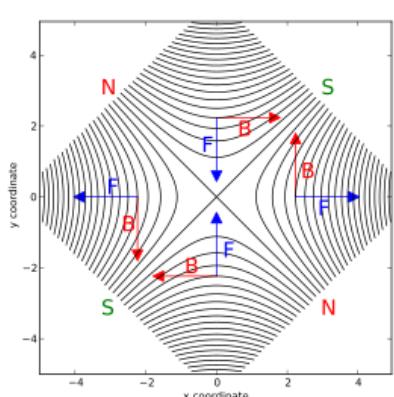
Zdroj částic

Opravdovým zdrojem částic samozřejmě bude místo, odkud odkoupíme naše helium, avšak v tomto dokumentu a v této kapitole se zdrojem myslí ionizační zařízení tvořící z těchto atomů helia alfa částice. Necháme tedy atomy helia cirkulovat kolem ionizátoru a jeho úkolem je nyní odtrhnout od nich odtrhnout dva elektrony pro tvorbu alfa částice. Ionizátorem bude jednopalcový zdroj, tzv. sputter ion source (sputtering znamená naprašování), jenž se nejčastěji používá k pokrývání těles vrstvou kovu. My samozřejmě dodatky pro toto plátování kovem odmontujeme., aby ionizátor sloužil svému účelu. Je zde využito menšího magnetronu (často používaného v mikrovlnných troubách), ten ionizuje částice.

Čtyřpólový magnet

Hned za zdrojem bude umístěn velký čtyřpólový elektromagnet (Q-Magnet), který alfa částici magneticky navede do menší dírky propojující

zdroj s urychlovací částí. U moderních urychlovačů představují tento magnet samotné celé DT, což konstantně zmenšuje paprsek, avšak pro naše účely bude tento jeden stačit. Q-Magnety jsou vytvořeny z opakujících se severních a jižních pólů, které jsou dohromady čtyři. Odtud vychází název quadrupole magnet. Magnet bude tvořen čtyřmi cívkami měděného drátu s odpovídajícím napětím.



V naší konstrukci bude použit pro usměrnění prvotního oblaku alfa častic. Částice následně poletí do první DT za Q-Magnetem. Díky Q-Magnetu budeme schopni vytvořit koncentrovaný paprsek urychlených alfa častic, čímž docílíme větší přesnosti.

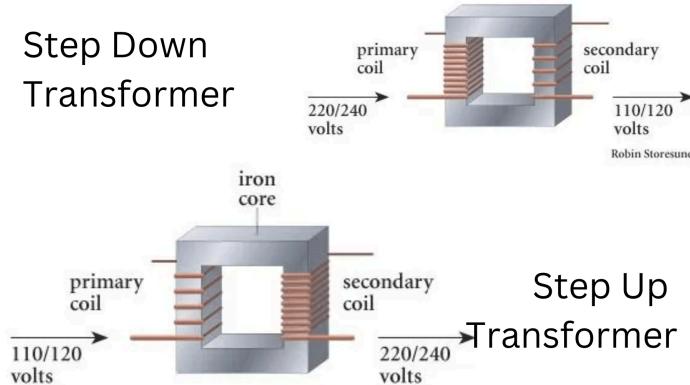
Hlavní urychlovací část

Primární urychlovací část systému bude tvořit deset měděných trubek o průměru přibližně 2 cm. Délky těchto trubek se budou průběžně zvětšovat na základě podrobných výpočtů uvedených níže. K jejich zajištění použijeme akrylové disky. Tento materiál používáme zejména proto, že vydrží náhlé změny tlaku (ty se v našem přístroji budou dít při vypouštění plynu) a není vodivý, díky čemuž bude přístroj bezpečný a nezemřeme při prvním dotyku komory.

Vzdálenost mezi DT není rovnoměrná, nýbrž co nejpřesněji vypočítána tak, aby vyrovávala urychlení častic. Mezery mezi DT slouží jako kritické oblasti, kde jsou částice účinně urychlovány. Toto uspořádání využívá neustálé změny polarity trubek, což je koncept, který byl již dříve vysvětlen v teoretické části naší práce.

K usnadnění elektrických podmínek nezbytných pro urychlování častic používáme sofistikované zařízení pro úpravu RF signálu od společnosti **Rohde & Schwarz**. Tato technologie v kombinaci s třífázovým step up transformátorem a baterií nám umožňuje dosahovat napětí až 25 kV a zároveň provozních frekvencí dosahujících 20 MHz. Transformátor bude napájen ze standardní evropské zásuvky, která bude primárnímu vinutí dodávat 230 V při 50 Hz a 15 A.

Jelikož se step up transformátory řídí zákony fyziky, není jen tak vytvořeno napětí. Výsledek vychází v VA (voltampéry), což vzniká součinem napětí a proudu. Pokud bychom chtěli dosáhnout 25 kV, tak se proud zmenší na nějakých 138 mA, takže před průchodem přes transformátor musíme zvýšit proud baterií.



Pro jednodušší aplikaci délek a vzdáleností mezi trubkami jsme sestavili tabulku se vším zmíněným i mnohým navíc (*rychlosť a energie čästice*).

Atmosféra v komoře

Jak již bylo výše zmíněno, nejdříve vypumpujeme všechn vzduch z komory, následně napustíme trochu helia. Helium bude umístěno v bombě vedle komory a bude připojeno k přední části (ionizující) vysokovakuovým ventilem.

Na začátku použijeme vakuovou pumpu nejspíše značky *Testo*. Je to standardní pumpa, která neumí vytvořit úplně silné vakuum, postačí však na odsátí většiny plynů uvnitř komory.

Po ní nastoupí turbomolekulární pumpa sloužící k dosažení a udržení vysokého vakua. ta je připojena ke komoře větším otvorem (viz obrázek). Fuguje na principu částic nalétávajících do vrtulí rotoru a jejich následný posun níže a níže, protože vrtule se zároveň zmenšují a také jsou otočeny na jinou stranu (zamezení pohybu zpět do komory).



Asi po minutě pumpu vypneme a do komory vpustíme čisté helium (ionizátor bude stále ještě vypnutý). Vše zapneme znovu, abychom omezili znečištění. turbomolekulární pumpy nejsou tak rychlé, proto může evakuace komory trvat i 30 minut. Helium poté zase napustíme (s již zapnutým ionizátorem). Množství helia bude vcelku malé.

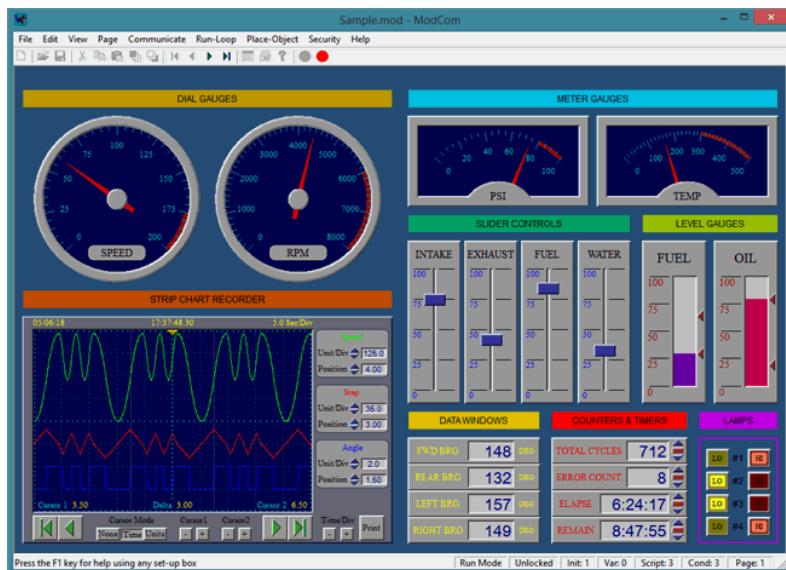
Nejpravděpodobněji využijeme vnější ohřev (na 60 °C), abychom zamezili vodnímu znečištění.

Počítac a výpočetní technologie

Jakožto zdroj výpočetních technologií budeme používat počítač schopen spustit program dále rozepsaný v podkapitole Software s nainstalovanou legální kopíí operačního systému Microsoft Windows XP, Microsoft Windows 10. nebo Raspbian - na Debianu založená distribuce LINUXu. Dále viz Software. Jako připojené zařízení pro měření horké katody atd. budeme používat přístroj dále popsaný v podkapitole Měřící technika. V případě použití OS Raspbian budeme používat počítač známý jako Raspberry Pi 4B se 4GB RAM a ARMovým procesorem s běžícím programem Wine pro zajištění možnosti spustit programy dostupné pro operační systém Microsoft Windows.

Software

Pro účely měření proměnných budeme používat Software ModCom 15.3 běžící na počítači s operačním systémem Microsoft Windows XP nebo Windows 10. Tento program je pro nekomerční účely zdarma použitelný. Program obsahuje GUI (grafické rozhraní), a jedná se o jednu z nejjednodušších cest pro komunikaci s přístrojem dále rozepsaným v podkapitole Měřící technika. Na obrázku můžete vidět uživatelské rozhraní programu i s uživatelsky-modifikovatelnými okny a nastavitelným ovládáním. Program budeme také používat pro detekci anomalií a poruch, abychom předešli veškerým potížím a katastrofálním scénářům. (viz kapitola Bezpečnost) Program je dostupný pro OS Microsoft Windows XP až Windows 12. (tentu operační systém ještě nebyl vydán pro veřejnost, ale na oficiální stránce je uveden jako programem podporován). Program vyniká několika zajímavými možnostmi a funkcemi, my jsme jej zvolili především proto, že pochází od stejného výrobce jako zařízení dále popsané v podkapitole Měřící technika.



Měřící technika

Vyhodnocení měření

Jak již bylo v předchozích podkapitolách zmíněno, budeme používat zařízení schopné měřit více pro nás použitelných fyzikálních veličin. Konkrétně WTX4 izolovaný stohovatelný DAQ (data acquisition, proces získávání a zobrazování dat jako například fyzikálních veličin a dalších měřitelných technických údajů) modul od firmy WeedTech. Celkově firma prodává 48 různých variant podle počtu a typu digitálních a analogových vstupů a výstupů.



Veškeré jednotky jsou od sebe elektricky izolovány, aby nedošlo k nesprávnému uzemnění nebo k narušení dat, což by mohlo vést k nepřesnému měření či dokonce k nehodě způsobené nesprávně nastavenému výkonu vstupních dat a elektrické energie. To by mohlo zapříčinit špatný výkon, přehřátí součástek nebo další potíže, kterých se chceme vyvarovat. Taktéž to chrání hostující

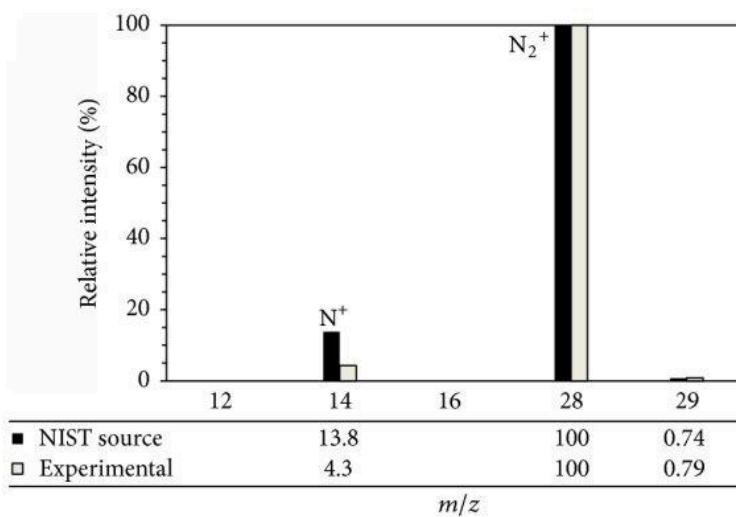
počítač nutný ke grafickému zobrazení veškerých údajů. Přístroje obsahují i vysokonapěťovou přechodovou ochranu.

WTX4 se dá připojit přes USB nebo RS-232 kabely. K přístroji bude připevněna horká katoda na měření výstupního napětí, vstupní napětí, a veškeré další potřebné faktory jako teplota, tlak, koncentrace kyslíku atd... Samotný modul obsahuje 4 samostatné jednotky, podle koupené varianty. My budeme používat 2 analogové vstupy a 2 digitální vstupy. Přesné informace a podrobnosti najeznete na webové stránce <https://weedtech.com/wtx4.html>.

Hmotnostní spektrometrie

Hmotnostní spektrometrie je metoda, pomocí níž můžeme zjistit, jestli nejsou uvnitř našeho urychlovače nežádoucí látky. Při měření MS (*mass*

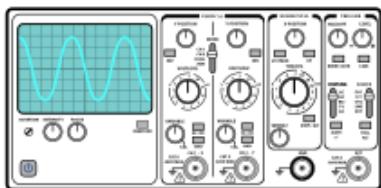
(*spectrometry*) jsou molekuly vzorku nejprve odpařeny, poté jsou ionizovány a hmotnostním spektrometrem odděleny podle poměru jejich hmotnosti a náboje (m/z). Tyto údaje o iontech se změří, uloží a zapíšou na graf závislosti m/z na intenzitě iontů (intenzita iontů je výkon jejich elektromagnetické radiace na určité ploše). Na tomto grafu tedy bude znát, když budou ve vzorku rozdílné ionty. Toho využijeme tak, že k začátku stavění téměř vypustíme komoru a začneme zvenku ke všem závitům napouštět dusík. Pokud v určitém místě uvidíme na grafu skok u 28 g/mol , znamená to, že jsme narazili na průnik a potřebujeme tedy komoru lépe utěsnit. V komoře samozřejmě dusík nezůstane, budeme ho napouštět jen na začátku pro toto měření.



Osciloskop

Osciloskopy jsou komplikované přístroje měřící frekvenci, vlnovou délku a tvar vln. Tyto výsledky jsou následně zobrazeny na obrazovce, kterou každý osciloskop má. Uvidíme i zkreslení, které je velmi potřebné pro přesné výpočty ohledně urychlovací části. V naší konstrukci bude osciloskop připojen na DT, abychom věděli přibližné hodnoty v DT, měli menší zkreslení a věděli ztráty.

Jelikož Osciloskop má svůj vlastní displej, nebude s největší pravděpodobností připojen do počítače.

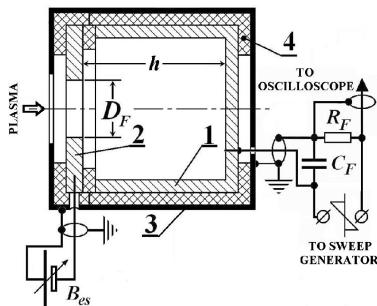


Faradayův pohárek

Faradayův pohárek bude na konci přístroje a budeme pomocí něj měřit množství částic, které se dostaly až na konec. Je to ocelový váleček, do kterého bude narážet paprsek našich částic z urychlovače. Tímto se nám bude zobrazovat velmi malý proud (odevzdaný částicemi), který bude měřen a vzhledem k tomu, že náboj jedné alfa částice známe, můžeme vypočítat počet částic, které dorazily až k pohárku (viz výpočty). S tímto údajem lze zjistit účinnost urychlovače. Ze začátku ale bude potřeba pohárek vykalibrovat se zdrojem částic, aby jsme odlišili odevzdaný proud urychlenými částicemi, proto ho umístíme do komory dříve než DT.

Konkrétně budeme používat model 931-S7-09-00006-A-01 od firmy D.I.S. Tento model obsahuje integrované pasivní chlazení při výkonu až do 3W a dá se připevnit pomocí základové části CF63. Obsahuje konektor BNC (Bayonet Neill-Concelman) přes který bude pomocí redukce připojen k počítači.

Faradayův pohárek bude propojen s počítačem na kterém budou zobrazeny všechny potřebné informace v grafech. (viz Software)



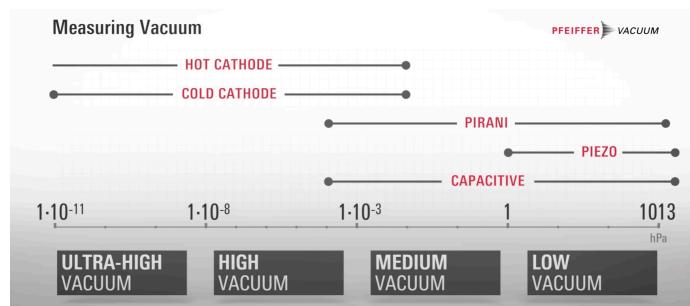
Horká katoda

Horká katoda funguje na principu katody, anody a sběrače. Katoda se zahřeje, aby měla energii na emitaci elektronů. Ty cestují směrem k blízké anodě a dostávají se do kontaktu s atomy z vnitřní komory, neboť je prostor s

horkou katodou ze strany připojen ke komoře. Z těchto atomů je vyražen elektron, tím pádem se z něj stane kation, který putuje ke katodě, ale na cestě je zachycen sběračem a odevzdaný proud z něj je zaznamenán. Tento proud nám počítač převeze na tlak, který se nám poté zobrazí. Převod funguje na bázi toho, že tlak v komoře je přímo úměrný odevzdanému proudu.



Horké katody jsou využívány pro měření tlaku v komorách s vysokým vakuem. Na rozdíl od studených katod, také vyrobených pro vysoké vakuum, zde není u komory připevněn magnet, ten by totiž mohl měnit dráhu častic. Když nyní budeme znát tlak, budeme moci určit i střední vzdálenost (viz níže), což nám pomůže v rozpoznávání případného znečištění.



Budeme používat horkou katodu BA600 Mini IG s možností měření od 11^{-9} do 5^{-2} Torrů, což bude stačit našim potřebám (3^{-7} Torr). Neobsahuje žádnou interní ovládací desku, a vše budeme ovládat pomocí počítače přes analogové připojení do WTX4.

Bezpečnost

Radiace

První a možná nejdůležitější část bezpečnosti je měření radiace okolo komory. K tomuto budeme využívat Geiger-Müllerův počítac. Jak jsem již na začátku teorie psal, LINAC je převážně používán při šetření rakoviny. Nám se podobný efekt (tvoření rentgenového záření) může nechtěně dít, proto budeme snímat radiaci (v jednotkách $\mu\text{Sv}/\text{h}$), abychom se ujistili, že je pracoviště bezpečné a že sami rakovinu nedostaneme. U přibližně 2000 $m\text{Sv}$ je velká šance na vyvinutí rakoviny (dlouhé ozařování) a 4-10 Sv je smrtelných. Při chvilce ozařování o hodnotě 3000 $m\text{Sv}$ vám bude špatně a nejspíše budete zvracet. Jelikož je rentgenové záření ionizující, musíme ještě přidat celkem dost olova a nebo zkusit komoru zakrýt jako celek. Nemusíme kupovat žádný drahý schopný zachytit alfa částice, ty se stejně přes zdi komory nedostanou.

Faradayova klec

Faradayova klec je jednoduchá konstrukce blokující elektromagnetické záření. Funguje na principu toho, že když elektromagnetické pole narazí na vodič, jeho náboj má tendenci zůstat na povrchu tohoto vodiče. Když je tedy postavena kovová klec, jakékoli záření, ať už víří dovnitř klece či ven, je touto klecí vyrušeno. Tato konstrukce se používá zejména na zajištění bezpečnosti při práci s elektřinou (proto ji ostatně použijeme my), nebo se také umisťuje kolem přístrojů, u nichž je nežádoucí, aby k nim proniklo elektromagnetické záření.

Tloušťka skla

Tloušťka skla, přes které uvidíme do komory, musí být přesně vypočtena a aplikována (viz výpočty). Kdybychom se správných údajů nedrželi, mohlo by dojít k implozi (rozdíl tlaku asi 100 000 Pa). Pokud by k implozi došlo, byla by nejen komora, ale také její součástky zcela zničeny. Nejspíše však budeme používat plexisklo. Ve výpočtech je zmíněno sklo, ale to bylo jen na ukázkou, že není takový problém zamezit implozi. Reálná pevnost plexiskla je asi padesátkrát vyšší než u skla.

Hašení

K hašení teoreticky vzniknutelného požáru při běhu urychlovače částic bude vždy k dispozici sněhový hasící přístroj neboli zařízení využívající nejčastěji oxid uhličitý k eliminaci ohně. Jedná se o jediný volně použitelný hasící přístroj k hašení zařízení pod elektrickým proudem u kterého jinak vzniká riziko zkratu. Dalším použitelným typem hasicího přístroje by byl tzv. halonový hasící přístroj, který je ale zakázán EU, aby se zamezilo vypouštění halogenových uhlovodíků do atmosféry, a může být používán pouze se speciálním povolením a při pouze velmi naléhavých případech. Tímto se pro nás stává nepoužitelným.

Sněhový hasící přístroj lze dále použít na hašení plynů, kapalin, kovů, pevných látek a laboratorního náčiní, což může být v našem případě velmi užitečné. Naopak by neměl být používán k hašení tuhých hořlavin typu dřeva, textilií a uhlí na velkých prostranstvích s velkou výměnou vzduchu. Vůbec nesmí být použit k hašení lehkých alkalických kovů a materiálů s nebezpečím výbuchu.

Na hašení v případě nepřítomnosti operátorů budou využity tzv. hasící bomby. Zařízení k hašení pomocí výbuchu prášku.

Výpočty

Nejdříve si spočítáme rychlosť urychlované částice v momentu, kdy opustí úplně první trubku.

$$v_1 = \sqrt{U_D^2 + \frac{2q \cdot U_D}{m}}$$

Tento výpočet znamená napětí DT umocněné na druhou, ke kterému přičteme součin dvojnásobku náboje alfa částice vydelený hmotností alfa částice (skládající se z hmotnosti dvou protonů). To vše nakonec odmocníme.

$$L = \frac{v}{2} \cdot \frac{1}{f}$$

Zde vidíme výpočet délky první DT. Potřebujeme zde výše spočítanou rychlosť částice po opuštění první trubky a také frekvenci našeho RF zdroje (1/f).

$$L_x = \sqrt{\left(U_D^2 + \frac{2q_\alpha U_D}{m_\alpha}\right) \cdot (x-1) \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{f}}$$

Dosadíme v a přidáme $(x-1)$, reprezentující právě neustálé zrychlování částice, kde x znamená pořadové číslo trubky. Pro délku první trubky použijeme vzorec bez tohoto přídavku, s ním by tady konkrétně byl celý vzorec vynulován, což je logicky špatně. Proto platí, že:

$$x \neq 1 \quad x \in \mathbb{N}$$

$$d = \frac{v}{2f}$$

Tady máme výpočet potřebné vzdálenosti mezi trubkami, který nesmíme zaměňovat s výpočtem výše, kde počítáme pro změnu délku trubek.

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \cdot 6,241 \cdot 10^{18}$$

Toto je výpočet pro kinetickou energii v jednotce eV. $6,241 * 10^{18}$ je počet elektrovoltů v jednom Joulu. Nebudeme počítat podle pravidel relativistické fyziky, ta nás výrazně neovlivňuje, jelikož se nedostaneme tak blízko rychlosti světla.

$$\mathbf{F}_L = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

Následně zde máme výpočet Lorentzovy síly. Lorentzova síla působí na částici, která je v pohybu v elektromagnetickém poli. V tomto výpočtu znamená \mathbf{F}_L velikost této síly, q náboj částice, \mathbf{v} její rychlosť, \mathbf{E} a \mathbf{B} intenzity elektrického a magnetického pole. Tento výpočet nám pomáhá zjistit, jak se bude částice pohybující se v elektromagnetickém poli chovat.

$$\frac{n}{t} = \frac{I}{q}$$

Pomocí tohoto vztahu si můžeme vypočítat počet částic, které se dostanou až k Faradayovu pohárku a narazí do něj. I je proud naměřený na pohárku, n je počet částic narážejících do snímače, q je elementární náboj a t znamená čas.

$$n = \frac{I}{q \cdot t}$$

$$t = \frac{p_r \cdot r}{s}$$

Pomocí vzorce výše zjistíme minimální bezpečnou tloušťku skla. p je rozdíl tlaků uvnitř a vně komory (v Pa), r je poloměr skla (v metrech) a s je pevnost skla (u toho, které použijeme, konkrétně 3,5 MPa). Takže pokud by byl rozdíl tlaků 101 700 Pa, poloměr skla 0,08 m, s pevností těch 3,5 MPa nám vyjdou zhruba 2 mm, v tomto případě bychom použili zhruba centimetrové sklo, což přináší záruku bezpečnosti.

$$\lambda = \frac{k_B \cdot T}{\sqrt{2\pi} \cdot d^2 \cdot p}$$

Takto se vypočítá střední vzdálenost (její značkou je lambda). V čitateli máme Boltzmannovu konstantu a teplotu v Kelvinech. Ve jmenovateli je průměr částice na druhou a také tlak v komoře.

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S}$$

Zde je (vlevo) napětí, v čitateli u primární a ve jmenovateli u sekundárního vinutí. To stejné, ale jen jiná jednotka je vpravo. Tam se počítá s počtem navinutí.

Shrnutí

Tento dokument je teoretickou předlohou a přípravou Projektu Velox. Autory tohoto projektu jsou Hynek Uvíra, Richard Komínek, Ondřej Martinák a David Zapletal a jeho výstupem bude v ideálním případě funkční lineární urychlovač částic urychlující kationy helia zvané alfa částice. Existuje mnoho typů urychlovačů, konkrétně tento byl vybrán kvůli vhodnému poměru jednoduchosti stavby a výše urychlení částic.

Urychlovač se bude skládat z ionizačního zdroje na počátku, dále ze čtyřpolového usměrňujícího magnetu, hlavní urychlovací komory s vysokým vakuem uvnitř chráněné vnější vrstvou trubek a RF zdroje určujícího frekvenci střídání náboje trubek ve vnitřní komoře.

Urychlení zde probíhá na principu tvorby alfa částic v ionizátoru, ty jsou usměrněny magnetem do hlavní urychlovací části a zde urychleny oscilujícími elektromagnetickými poli na velmi vysoké energie.

Pro zajištění výstupů projektu bude přístroj obsahovat také mnoho měřících zařízení, například horkou katodu (pro tlak v komoře), faradayův pohárek (pro počet částic, které se dostanou na konec urychlovače) nebo hmotnostní spektrometr (pro zjištění přítomnosti případných nežádoucích látek v komoře).

Dostatečný prostor bude věnován i zajištění dostatečné bezpečnosti na pracovišti, neboť bez žádných ochranných prvků může být přístroj až

smrtelně nebezpečný. Proto zde budeme mít třeba Faradayovu klec kolem urychlovače či hasící přístroje a hasící bomby v místnosti. Dalším nebezpečím je radiace, budeme ji pro jistotu měřit Geiger-Müllerovým počítáčem.

Jak již bylo výše zmíněno, hlavním cílem tohoto projektu je postavit funkční urychlovač částic, pozorovat děje probíhající v něm a posléze sesbírat a vyhodnotit některá důležitá data těchto jevů (viz měřící technika). Posléze bude urychlovač nejspíše věnován nějaké vysoké škole či univerzitě k dalšímu výzkumu.

Zdroje

Zdroje informací

WEEDER TECHNOLOGIES. *WTX4 Isolated Stackable DAQ Module*. Online. WEEDER TECHNOLOGIES. Isolated Stackable DAQ Modules with Free Software. Dostupné z: <https://weedtech.com/wtx4.html>. [cit. 2024-11-29].

TEST INFRASTRUCTURE AND ACCELERATOR RESEARCH AREA (TIARA). *Types of accelerators*. Online. TEST INFRASTRUCTURE AND ACCELERATOR RESEARCH AREA (TIARA). Accelerators for society. Dostupné z:

<http://www.accelerators-for-society.org/about-accelerators/index.php?id=21>. [cit. 2024-11-29].

FOR THE LOVE OF PHYSICS. *Van de Graaff | Tandem & Pelletron Particle Accelerators (Principle, Construction, Working)*. Online. GOOGLE LLC. Youtube. 2019. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=Q9bjrQfS6E&t=482s>. [cit. 2024-11-29].

BYJU'S. *Cyclotron*. Online. BYJU'S. BYJU'S. Dostupné z:

<https://byjus.com/physics/cyclotron>. [cit. 2024-11-30].

Mean free path. (2023, September 21). In *Wikipedia*.

https://en.wikipedia.org/wiki/Mean_free_path

CRADDOCK, M. K. *Eighty Years of Cyclotrons*. Online. 2011.

Linear particle accelerator. (2024, November 22). In *Wikipedia*.

https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_particle_accelerator

Neptunium. (2023, November 23). *DIY Particle accelerator (part 1)*. YouTube.

https://www.youtube.com/watch?v=yYSEC2mvFnE&ab_channel=Neptunium

Wikimedia Foundation. (2024, June 9). Faraday cage. Wikipedia.

https://en.wikipedia.org/wiki/Faraday_cage

HINTERBERGER, F. *Electrostatic accelerators*. University of Bonn.

CONDÉ NAST PUBLICATIONS, INC. *The Physics of Faraday Cages*. Online. CONDÉ NAST PUBLICATIONS, INC. WIRED. Dostupné z: <https://www.wired.com/story/the-physics-of-faraday-cages/>. [cit. 2024-12-04].

ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA, INC. *Synchrotron*. Online. ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA, INC. Britannica. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/synchrotron>. [cit. 2024-12-08].

CERN. *The Large Hadron Collider*. Online. CERN. CERN (accelerating science). Dostupné z: <https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>. [cit. 2024-12-10].

TESTBOOK EDU SOLUTIONS PVT. LTD. *Synchrotron: Learn its Working Principle, Advantages, & Applications*. Online. TESTBOOK EDU SOLUTIONS PVT. LTD. Testbook. 2014, 14. 6. 2023. Dostupné z: <https://testbook.com/physics/synchrotron>. [cit. 2024-12-11].

Zdroje obrázků

Cockcroft-Walton accelerator. Online. In: SCIENCE PHOTO LIBRARY. Science Photo Library. Dostupné z:

<https://www.sciencephoto.com/media/321/view/cockcroft-walton-accelerator>. [cit. 2024-12-02].

Van De Graaff Accelerators. Online. In: ONCOLOGY MEDICAL PHYSICS. Oncology Medical Physics. Dostupné z:

<https://oncologymedicalphysics.com/van-de-graaff-accelerators/>. [cit. 2024-12-02].

1.7 MV Tandem Pelletron accelerator, model 5SDH (NEC, USA). Online. In: BAR-ILAN UNIVERSITY. Bar-Ilan University. Dostupné z:

<https://cris.biu.ac.il/en/equipments/17-mv-tandem-pelletron-accelerator-model-5sdh-nec-usa>. [cit. 2024-12-02].

M.S. Livingston and Ernest Lawrence beside the 27-inch cyclotron, built in 1934 Donald Cooksey. Online. In: AMERICAN PHYSICAL SOCIETY. American Physical Society. Dostupné z: <https://www.aps.org/apsnews/2003/06/lawrence-first-cyclotron>. [cit. 2024-12-02].

Map of the Large Hadron Collider and its experiments. Online. In: CURB MAGAZINE. Curb. 2008. Dostupné z:

https://curbarchive.journalism.wisc.edu/2008/multimedia/andrews_lhc_mm/index.html. [cit. 2024-12-11].

V případě, že bychom dostali vývěvu od společnosti Edwards Vacuum, tak stačí využít jedné díry z kříže, ale v případě koupi vlastních vývěv (rotační a turbomolekulární) budou logicky využity dvě. Ze předu bude výhled dovnitř (pro pozdější sledování paprsku) a nahoře bude na adaptéru s velikostí DN40CF umístěn Piraniho vakuometr...