

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Online detekce ionizujícího záření na neutronovém zdroji NG - 2

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá výběrem a realizací vhodného detekčního řetězce určeného k detekci neutronového pole. Teoretická část je zaměřena na základní druhy detektorů ionizujícího záření a jejich vlastnosti. Dále je práce zaměřena na definování požadavků na detekční řetězec v závislosti na podmínkách pracovního prostředí a na způsoby detekce neutronů. Poslední část je věnována vybranému detekčnímu řetězci, určení mezních hodnot jeho použití a zkušebnímu provozu s neutronovými zdroji provozovanými během experimentálních měření na cyklotronu U – 120M, ÚJF AV ČR, v.v.i.

Klíčová slova

Urychlovač částic, ionizující záření, detekce gama záření, detekce neutronů, scintilační detekční jednotka, neutronový zdroj, lithium, beryllium

Abstract

Presented Master's thesis concerns the choice and implementation of an appropriate detection chain, designated for detection of a neutron field. The theoretical part is focused on basic types of ion radiation detectors and their properties. Furthermore the thesis concentrates on defining the requirements on a detection chain, in dependence on work place conditions and means of neutron detection. The last part is devoted to the selected detection chain, determination of marginal values of its use and the testing operation of neutron sources used during experimental gauging on cyclotron U – 120M, Nuclear Physics Institute of the Czech Academy of Science, public research institution.

Key words

Particle accelerator, ionizing radiation, gama detection, neutron detection, scintillation detection unit, neutron source, Lithium, Beryllium

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne

Martin Rodák

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce Ing. Janě Jiříčkové, Ph.D., za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Dále bych rád poděkoval kolegům Ing. Janu Novákovi, Ph.D., Mgr. Mitijovi Majerlemu, Ph.D., a vedoucímu mého pracoviště Mgr. Jaromíru Mrázkovi, Ph.D. za významnou odbornou pomoc a rady při realizaci práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval Martinu Havelkovi za jeho věcné připomínky.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 DETEKTORY, JEJICH ROZDĚLENÍ A POUŽITÍ V PRAXI.....	11
1.1 ROZDĚLENÍ DETEKTORŮ IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ.....	11
1.1.1 Podle komplexnosti měřené informace	11
1.1.2 Časový průběh detekce.....	14
1.1.3 Princip detekce.....	15
1.2 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI JEDNOTLIVÝCH DRUHŮ DETEKTORŮ	16
1.2.1 Ionizační detektory s plynou náplní	17
1.2.2 Polovodičové detektory.....	20
1.2.3 Scintilační detekční jednotka	21
2 CHARAKTERISTIKA PRACOVNÍHO PROSTŘEDÍ URYCHLOVAČE ČÁSTICE U-120M A	
POPIS NEUTRONOVÝCH GENERÁTORŮ NG	25
2.1 LITHIOVÁ TERČOVÁ STANICE.....	27
2.2 BERYLIOVÁ TERČOVÁ STANICE	29
3 POŽADAVKY NA DETEKČNÍ ŘETĚZEC, DETEKCE NEUTRONŮ, VHODNÉ VARIANTY	
DETEKČNÍCH ŘETĚZCŮ A REALIZACE	30
3.1 POŽADAVKY NA DETEKČNÍ ŘETĚZEC A DETEKCE NEUTRONŮ.....	31
3.1.1 Metoda odražených jader.....	31
3.1.2 Aktivační metoda.....	32
3.1.3 Metoda doby průletu - TOF	34
3.2 VHODNÉ ŘETĚZCE.....	35
3.2.1 Ionizační komora	35
3.2.2 Polovodičový detektor.....	36
3.3 REALIZACE VYBRANÉHO ŘEŠENÍ.....	38
3.3.1 Vysokonapěťový zdroj	39
3.3.2 Digitizér	40
3.3.3 Použitá scintilační detekční jednotka.....	41
4 ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ CHARAKTERISTIKY DETEKČNÍHO ŘETĚZCE A LIMITY	
POUŽITELNOSTI	42
4.1 ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ CHARAKTERISTIKY DETEKČNÍHO ŘETĚZCE	42
4.2 MEZNÍ LIMITY DETEKČNÍHO ŘETĚZCE.....	43
5 STRUČNÁ DOKUMENTACE OVLÁDÁNÍ A INSTALACE	45
5.1 INSTALACE DETEKČNÍHO ŘETĚZCE A PROPOJENÍ S MĚŘICÍ MÍSTNOSTÍ	45
5.2 OVLÁDÁNÍ VYSOKONAPĚŤOVÉHO ZDROJE A SPUŠTĚNÍ ZÁZNAMU DAT	46
6 POUŽITÍ DETEKČNÍHO ŘETĚZCE BĚHEM EXPERIMENTU NA IZOCHRONNÍM	
CYKLOTRONU U-120M	48
6.1 EXPERIMENT S LITHIOVOU TERČOVOU STANICÍ	49
6.2 EXPERIMENT S BERYLIOVOU TERČOVOU STANICÍ.....	50
ZÁVĚR	53
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	54

Seznam symbolů a zkratk

Bq.....	becquerel, jednotka intenzity záření zdroje radioaktivního záření
G-M detektor.....	Geiger-Mullerův detektor
Gray	jednotka absorbované dávky záření
Sievert	jednotka ekvivalentní dávky ionizujícího záření
MeV	mega elektronvolt
PSD	pulzní tvarová diskriminace
Sonda	scintilační detekční jednotka
USB.....	univerzální sériová sběrnice
TOF	metoda doby průletu (time of flight)

Úvod

Předkládaná kvalifikační práce má za cíl vybrat podle daných požadavků vhodný detekční řetězec pro detekci neutronového pole během experimentu s neutronovými zdroji v Ústavu jaderné fyziky AV ČR, v.v.i. Druhým úkolem je nastínit čtenáři problematiku detekce ionizujícího záření různými typy detektorů a postup při výběru vhodného řešení, důvodů pro ně, jeho realizace a v neposlední řadě i použití zvoleného řešení a jeho omezení.

Práce je rozdělena do šesti kapitol. První kapitola je věnována teoretickému popisu obecné detekce ionizujícího záření, principy detektorů a jejich charakteristické vlastnosti.

Druhá kapitola se zaměřuje na definování pracovního prostředí, ve kterém bude detekční řetězec provozován, popis dvou používaných zdrojů neutronů a experimentální haly. Čtenář získá představu o prostředí jak z popisu, tak z přiložených fotografií, které slouží pro názorné ucelení sdělených informací.

Kapitola třetí pojednává o konkrétních požadavcích na detekční řetězec, o používaných způsobech detekce neutronů, o dalších možných variantách a o popisu vybraného řešení. Pro ilustraci byly pořízeny fotografie jednotlivých částí detekčního řetězce.

Čtvrtá kapitola má za cíl změřit a ověřit základní charakteristiky detekčního řetězce. V tomto případě se jedná o ověření dobře čitelné odezvy scintilační detekční jednotky a porovnání s odezvou definovanou výrobcem. U odezvy musí být patrné rozdělení mezi registraci gama záření a neutrony. Druhá část kapitoly je věnována omezení a použití realizovaného řešení.

V páté kapitole je popsán postup při instalaci scintilační detekční jednotky, jejího zapojení a uvedení celého detekčního řetězce do provozu. Jsou zde zmíněny nezbytné podmínky, které musí být dodrženy a dále jsou vybrány ukázky ovládacího prostředí programu pro záznam dat a ovládání vysokonapěťového zdroje.

V poslední kapitole se ověřuje správná funkčnost detekčního řetězce při použití u dvou neutronových zdrojů využívaných při experimentech.

1 Detektory, jejich rozdělení a použití v praxi

Detekce ionizujícího záření se provádí specializovanými detektory, jelikož je prostým okem neviditelné. Provádí se různými fyzikálními metodami a vhodnými přístrojovými technikami. Detekcí ionizujícího záření jsme schopni rozpoznat různé vlastnosti záření jako energii, intenzitu, prostorovou distribuci a další. Jako souhrnné označení těchto detektorů bývá používán termín radiometry.

Jako speciální typ detektorů jsou někdy označovány dozimetry. Dozimetr je detektor cejchovaný na jednotky radiační dávky, kterými jsou Gray nebo Sievert. Tyto detektory se používají na analyzování účinků ionizujícího záření na živou tkáň.

1.1 Rozdělení detektorů ionizujícího záření

Jednotlivé detektory lze rozdělit podle tří kritérií: komplexnost měřené radiační informace, časový průběh měření a technicko-fyzikální princip detekce. Rozdělení se pro jednotlivé detektory prolínají.

1.1.1 Podle komplexnosti měřené informace

Ionizující záření se skládá z kvant a částic různých energií, které mohou být vyzařovány různými zdroji v různých směrech. Měřicí přístroje rozdělujeme podle komplexnosti měřené informace do čtyř skupin: detektory záření, spektrometry ionizujícího záření, zobrazovací detektory a dráhové detektory.

1.1.1.1 Detektory záření

Tyto detektory provádějí prostou detekci interakcí nabitých částic s detektorem, a nezaznamenávají informace o energii, druhu záření apod. Jsou to nespektrometrické detektory

používané pouze k detekci nabitých částic, případně fotonů. Radíme sem termoluminiscenční dozimetry, ionizační komory, filmové dozimetry (obrázek 1.) a G-M detektory.



Obr. 1: Filmový dozimetr s pouzdrém

1.1.1.2 Spektrometry ionizujícího záření

Spektrometry ionizujícího záření dokáží měřit jak počet kvant, tak také jejich energii. Tento druh záření je nazýván jadernou spektrometrií. Výsledkem tohoto měření je zpravidla energetické spektrum, kde je vyznačena závislost četnosti kvant na jejich energii. Energie detekovaných kvant se získává například vyhodnocením amplitudy nebo plochy elektrického pulzu vystupujícího z detektoru. Jako další způsob měření energie může být použito získávání informací o energii z pohybu nabitých částic v magnetickém poli, případně z doletu částic v látce [1], [4].

Částicový kalorimetr (zástupce spektrometru) je detekční systém, který pohlcuje veškerou energii částice a výstupní impulz je úměrný dané energii. Využívají se zejména pro

měření vysokoenergetického záření, které může vznikat urychlováním částic, případně z kosmického záření. Vysokoenergetické částice nepředávají v látce svou energii při jedné nebo více interakcí v malém objemovém elementu, ale tvoří kaskády sekundárních částic. Materiál kalorimetru má velkou hustotu a v něm způsobují vysokoenergetické částice sekundární záření, které je dále detekováno detektory, například scintilačními [1].

Jako spektrometry mohou pracovat hlavně polovodičové detektory, magnetické spektrometry a scintilační detektory.

1.1.1.3 Zobrazovací detektory

Jsou zpravidla kamery, které zobrazují elektronicky nebo vizuálně prostorové rozložení intenzity záření. Fotografický film je zástupcem nejjednoduššího zobrazovacího detektoru. Dále se v minulosti v RTG diagnostice používala luminiscenční stínítka, která mohla být vylepšována zesilovačem obrazu, případně modernějším elektronickým zpracováním. V současnosti se používají multidetektorové systémy vhodně rozmístěné v prostoru, které nás informují, z jakých směrů záření dopadá a o místech dopadu záření. Mezi zástupce zobrazovacích detektorů patří polovodičové zobrazovací panely, scintilační kamery a nejdokonalejší pixelové detektory [1] [2] [5].

1.1.1.4 Dráhové detektory

Jak už samotný název napovídá, tyto detektory zaznamenávají dráhy nabitých částic v prostoru. Dráhy nabitých částic mohou být zakřiveny například magnetickým polem. Detekce je realizována rozmístěním detektorů v prostoru, nejčastěji jsou rozmístěny polovodičové detektory nebo ionizační komory (trackery). Analýzy těchto drah nám mohou mnohé napovědět o vlastnostech elementárních částic, částicových a jaderných interakcích [1].

1.1.2 Časový průběh detekce

Dle časového průběhu detekce můžeme uvažovat tyto druhy detektorů: kumulativní, kontinuální, online a off-line. Rozdělení na kumulativní a kontinuální pravděpodobně v budoucnu ztratí význam, jelikož detektory budou elektronické a budou umožňovat oba režimy detekce. Dělení online a off-line je dáno způsobem vyhodnocování. Okamžité vyhodnocování a zobrazování aktuální situace je nazýváno online. U off-line metody dochází k vyhodnocení až následně po ukončení expozice.

1.1.2.1 Kumulativní

Kumulativní nebo také integrální detektory postupně shromažďují signály během expozice a tyto data zůstávají po celou dobu měření a i po jeho skončení v detektoru. Data mohou být vyhodnocována až dodatečně a získáme informace o celkové hodnotě ozáření. Na toto měření se specializují hlavně detektory používané v radiační dozimetrii. Mohou to být materiálové nebo fotografické detektory, případně i elektronické detektory. Jako elektronické detektory jsou myšleny například elektronické dozimetry, které mohou být ve dvou režimech. Okamžitá hodnota, nebo nakumulovaná dávka od zapnutí přístroje [1] [2].

U elektronických dozimetrů lze tyto dva režimy provozovat i současně. Pak může docházet k odečítání aktuálních hodnot i během kumulativního měření. Z podstaty věci souběh režimů není možný u materiálových a fotografických detektorů. Naopak pouze pro kumulativní detekci bez aktuálního stavu prostředí používáme ionizační komory, či filmové dozimetry [1].

1.1.2.2 Kontinuální

Tyto detektory ukazují informaci o okamžitém stavu během expozice, jako je počet kvant nebo intenzita. Pokud na detektor přestane působit ionizujícího záření, výstupní signál bude klesat až na nulovou hodnotu, případně na hodnotu pozadí. Kromě luminiscenčních stínítek (která se v současné praxi vyskytují jen zřídka), jsou tyto detektory zpravidla

elektronické. Jelikož většina moderních elektronických detektorů disponuje i kumulativním režimem, stává se skupina méně podstatnou [4].

1.1.3 Princip detekce

Princip detekce, respektive typ odezvy detektoru může být závislý na jeho konstrukci, nebo na různých mechanizmech reakce v závislosti na interakci způsobené ionizující částicí. Toto rozdělení se soustředí na rozlišení dle principu detekce, kde rozeznáváme tři druhy detektorů: elektronické, materiálové a fotografické.

1.1.3.1 Elektronická

Absorbovaná dávka, respektive interakce způsobené ionizujícím zářením se konvertují na elektrický signál, který může mít formu impulsu nebo elektrického proudu. Signál je dále vyhodnocován v elektronických aparaturách. První část detekčního řetězce je samotný detektor, který převádí interakce (předanou energii), na elektrickou odezvu. Ta postupuje dále, je zaznamenávána, zesilována, a dále se zobrazuje v koncovém zařízení, které je pozorované obsluhou detektoru [1].

Elektronický detektor umí vyhodnocovat dva typy signálů. Prvním je impuls. Detektor pracující s impulzní odezvou poskytuje výsledný počet impulzů, závislých na počtu dopadajících kvant. Počet zaznamenaných impulzů detektorem se nazývá četnost impulzů [5].

Druhým typem signálu je proud. Detektor v proudovém režimu poskytuje v čase spojitý proud, jehož velikost závisí na intenzitě detekovaného záření.

Jako elektronické detektory označujeme G-M detektory, ionizační komory, polovodičové detektory, scintilační detektory a magnetické spektrometry.

1.1.3.2 Materiálová

V těchto detektorech dochází k měření absorbované dávky pomocí změn daného materiálu. V důsledku změn se může měnit barva, složení, objem anebo mohou být zanechávány stopy v materiálu. Stopy se dají detekovat nebo i zviditelnit.

Nevýhodou materiálových detektorů je nízká citlivost a proto se používají pro vysoké intenzity, nebo pro dlouhodobý horizont expozice. U většiny materiálových detektorů se setkáme se slábnutím signálu, respektive se slábnutím odezvy detektoru.

Materiálové (i fotografické) detektory pracují vždy jako kumulativní detektory.

1.1.3.3 Fotografická

Fotografický způsob detekce je principiálně postaven na fotochemických účincích záření, nebo na fotografickém zobrazení stopy částic v určité látce.

Dle principu se dají fotografické detektory považovat za materiálové, avšak díky jejich široké použitelnosti a jejich bezespornému významu, se zařazují do samostatné kategorie, ovšem nesplňují zadané podmínky a proto nejsou dále předmětem zájmu.

1.2 Základní vlastnosti jednotlivých druhů detektorů

U všech detektorů je třeba přihlídnout k negativnímu jevu, který se nazývá mrtvá doba. Rozdělujeme mrtvou dobu na kumulativní a nekumulativní. Nekumulativní mrtvá doba má definovanou dobu, která má konstantní dobu trvání. Během mrtvé doby kumulativní dochází k jejímu prodlužování dalšími událostmi během mrtvé doby. Kumulativní mrtvá doba sebou přináší mnohem větší obtíže, než nekumulativní mrtvá doba.

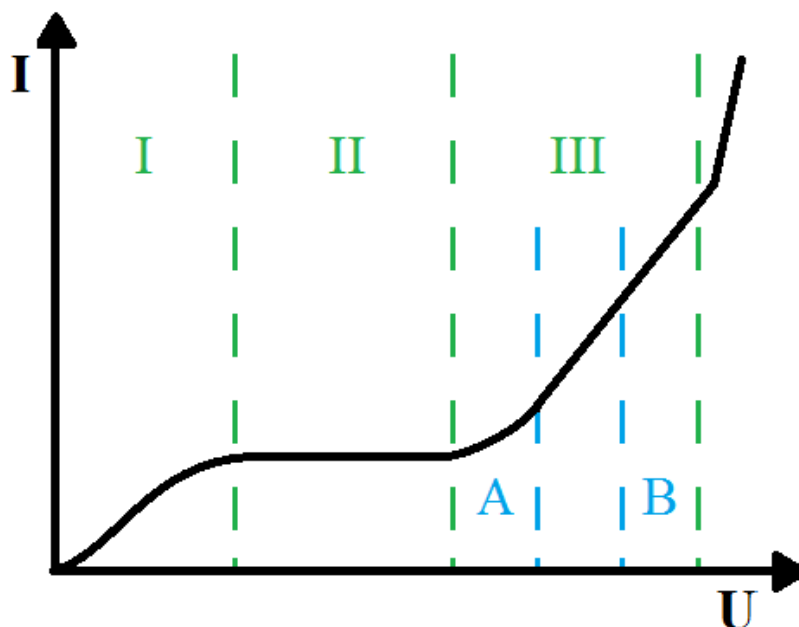
Mrtvá doba může být zapříčiněna samotným detektorem nebo i jiným článkem detekčního řetězce. Je to časový úsek, po který je zařízení zahlceno vstupními informacemi a

není schopné správně zaznamenávat veškeré probíhající události. U jednotlivých sond je mrtvá doba různá. U scintilačních detektorů může být například menší než $1 \mu\text{s}$, naopak nabývá řádově hodnot $100 \mu\text{s}$ u G-M detektorů. U spektrometrů a radiometrů se nezdívá doba uvádí v procentech za dobu expozice. Pokud jsou měřeny vysoké četnosti, při kterých se mrtvá doba významně projevuje je nezbytné při vyhodnocování dat provádět korekci, aby nedocházelo k větší či menší odchylce dat od reálného stavu [1] [2] [5].

Předmětem zájmu budou dále následující druhy detektorů: ionizační detektory, polovodičové detektory a scintilační detekční jednotky.

1.2.1 Ionizační detektory s plynnou náplní

Závislost proudu (I) na napětí elektrod ionizačních detektorů (U) je zobrazen na obrázku 2. Závislost je nazývána voltampérovou charakteristikou ionizační komory (za předpokladu konstantní intenzity záření). Dělíme ji do třech oblastí.



Obr. 2: Voltampérová charakteristika ionizační komory

První oblast (I.), průběh Ohmova zákona. Ionty vzniknuvší v důsledku ionizace spolu rekombinují, kde pravděpodobnost rekombinace klesá se zvyšující se rychlostí iontů na jejich

střední volné dráze, což je způsobeno rostoucím napětím na elektrodách. Proud závislý na ionizaci roste také v závislosti na napětí, podobně jako obecně dle Ohmova zákona. Pro detekci záření se oblast nevyužívá [1].

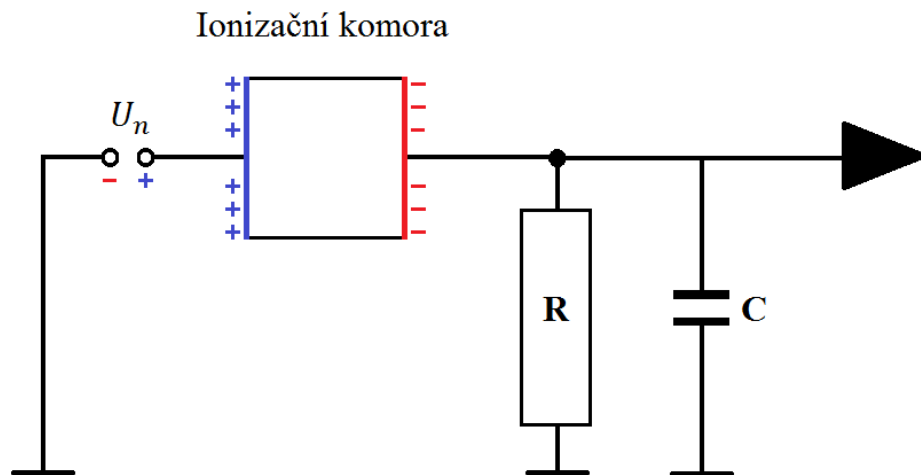
Druhá oblast (II.), průběh nasyceného proudu, kde se ionty v důsledku silnějšího elektrického pole pohybují velmi rychle, má za následek nemožnost rekombinace, a jsou všechny nosičem proudu. V tomto případě je proud nezávislý na napětí, závislost je pouze na intenzitě ionizujícího záření. V této oblasti pracuje například ionizační komora [1].

Třetí oblast (III.), nárazová ionizace. Silné elektrické pole urychluje ionty vyvolané zářením do takové míry, že po srážce s neutrálními atomy či molekulami vytváří sekundární ionty. V počáteční fázi této oblasti (A) jsou počty sekundárních a počty primárních iontů navzájem přímo úměrné a v této oblasti pracují proporcionální detektory. Pokud dojde ke zvýšení napětí, pozorujeme druhou část třetí oblasti (B), kde dochází k lavinovému zmnožení iontů a elektronů (dochází k výbojům) v důsledku velmi vysokého počtu vzniku sekundárních iontů. V této oblasti pracují G-M detektory [1].

1.2.1.1 Ionizační komory

Ionizační komory jsou principiálně nejjednodušší detektory ionizujícího záření. Využívají vlastnosti ionizace látky, respektive ideálně inertního plynu (např. xenon, argon, krypton atd.). V této komoře se nacházejí dvě elektrody – katoda a anoda. Na tyto elektrody je přiváděno vysoké napětí. Za běžných podmínek detektorem neprotéká žádný proud, jelikož je plynná náplň komory nevodivá. Pokud ale do vnitřního prostoru vnikne ionizujícího záření, začne obvodem protékat slabý proud z důvodu ionizace plynu (iontová vodivost) [1] [2] [5].

Proud je měřený mikro-ampérmetrem a je přímo úměrný intenzitě nabitých částic. Pokud je proud měřen po celou dobu expozice, jedná se o ionizační komory kontinuální. Druhou možností je detekce krátkým napět'ovým nebo proudovým impulzem a jedná se o proporcionální detektory [1].



Obr. 3: Schéma zapojení ionizační komory

Z důvodu malé velikosti protékajícího proudu obvodem (cca 10^{-16} až 10^{-9} A), má ionizační komora nízkou citlivost a není vhodné používat je k detekci slabého záření. Naopak výhodou je silná lineární závislost proudu i při vysokých intenzitách ionizujícího záření [1].

1.2.1.2 Studnové ionizační komory

Studnové ionizační komory se často používají k měření aktivity radioaktivních preparátů (můžeme se setkat s nesprávným názvem dávkové kalibrátory). Radioaktivní látka uchovávána v lahvičce nebo injekční stříkačce se umístí do otvoru studnové ionizační komory, která registruje ionizujícího záření v geometrii blízké 4π [1].

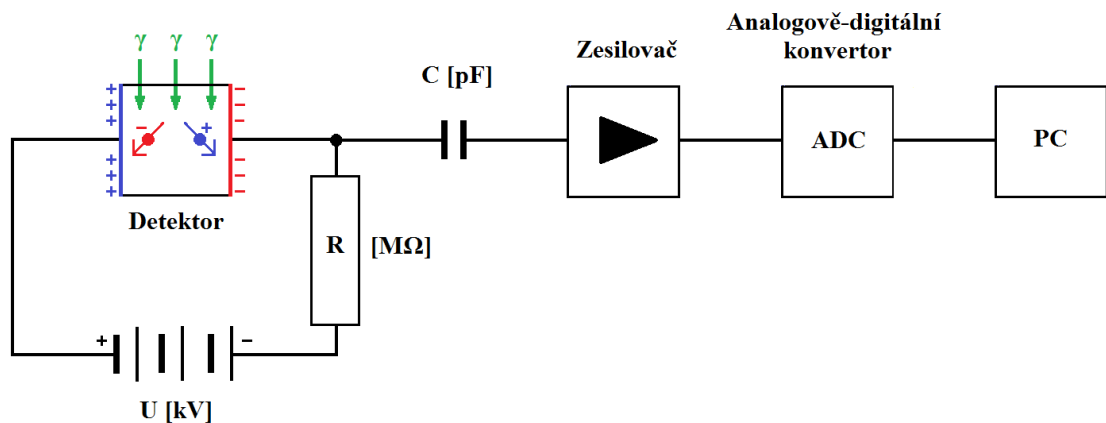
Výhodou těchto měřičů je opět velmi dobrá linearita až do vysokých aktivit (stovky TBq), ovšem při nízkých aktivitách se projevují chyby, které nejsou důsledkem nelinearity, ale jsou způsobeny statickými fluktuacemi v počtu elektronů a iontů. U běžných přístrojů se měření dá považovat za spolehlivé až cca od 100 kBq. Pokud by se těmito detektory měřily řádově kBq, musela by se prodloužit doba měření ze standardních 5 až 10 s na jednotky minut. V případě měření ještě menších aktivit je nutné použít studnové scintilační detektory [1] [2].

Detekční schopnosti studnové ionizační komory silně závisí na poloze vzorku ve studně, na stěnách nádoby, ve které je umístěn měřený preparát a vnitřní stěně detektoru. Vzhledem k těmto okolnostem je potřeba po měření provést korekci naměřených dat experimentálně stanoveným korekčním faktorem [1] [5].

1.2.2 Polovodičové detektory

Princip detekce u polovodičových sond je obdobný jako u ionizačních komor, avšak zde je místo plynu použit vhodný polovodičový materiál.

Fyzicky jde o obvod, ve kterém je zapojena dioda v závěrném směru a ohmický odpor. Na diodu je přiváděno napětí, které je v rozmezí cca desítek volt, až dvou kilovolt dle druhu diody. Obvodem protéká proud pouze při interakci ionizační energie s polovodičem. Interakce způsobuje v polovodiči přeskok elektronů do vodivostního pásu. Elektronky se začnou ihned pohybovat ke kladné elektrodě a obvodem proteče krátký proudový impulz, který na pracovním odporu R způsobí úbytek napětí. Přes kondenzátor C se pulz dále vede do zesilovače. Po zesílení je impulz veden do AD převodníku a dále do záznamového zařízení, kterým je v současnosti výhradně počítač [1] [2].



Obr. 4: Schéma zapojení polovodičového detektoru

Časový integrál impulzu je přímo úměrný celkové energii detekovaného záření. Amplitudovou analýzu provádíme spektrometrickou analýzou energie zaznamenaného záření, obdobně jako u scintilačních detektorů [1] [2].

Polovodičové detektory používané pro detekci gama záření mají nespornou výhodu ve velmi vysoké rozlišovací schopnosti energií, která je přibližně třicetkrát lepší než u detektoru scintilačního. Výhoda souvisí jednak s poměrně dokonalým sběrem náboje, který vytvořila ionizační energie v polovodiči a dále souvisí s malou šířkou zakázaného pásu. Výhodou malé šířky zakázaného pásu je nutnost pouze malé energie potřebné k přeskoku elektronů do vodivostního pásu. Detekce kvant dané energie je více patrná, jelikož počet nábojových párů je vysoký [1] [2].

Naopak nevýhodou těchto detektorů je delší mrtvá doba a nižší detekční účinnost pro záření gama. Mrtvá doba je závislá na kapacitě systému detektor, zesilovač a hodnotě pracovního odporu [1].

Ze zmíněných faktů je implikující, že tyto detektory používáme v oblastech, kde jsou kladeny vysoké nároky na rozlišovací schopnost energií. Ovšem detekční řetězec musí být správně přizpůsoben daným pracovním podmínkám, ve kterých bude používán, aby nedocházelo k jeho zahlcování [1].

1.2.3 Scintilační detekční jednotka

Podle příslušné normy se detekční řetězec složený ze scintilačního detektoru (scintilátoru) a z fotonásobiče nazývá scintilační detekční jednotka.

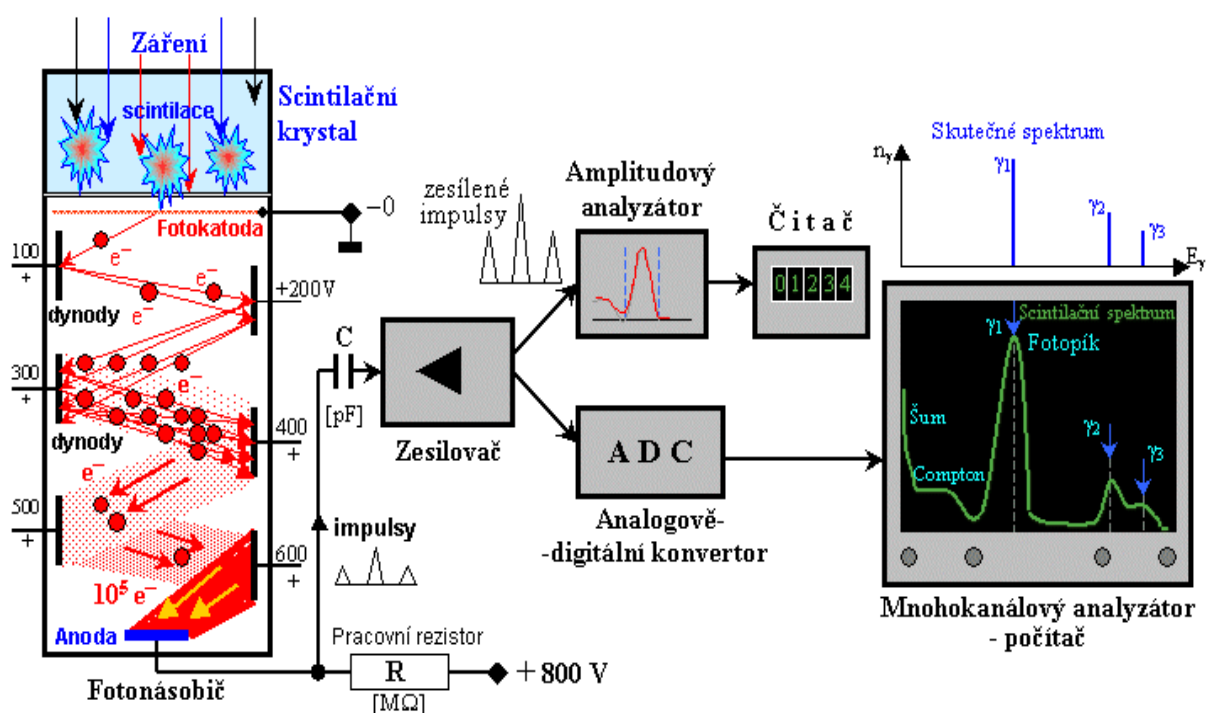
Detektory jsou založeny na principu emise fotonů v scintilátorech. Ve fotonásobiči následně dochází k uvolnění elektronů fotoefektem a k zesílení proudu elektronů na dynodách fotonásobiče. Detekční řetězec se skládá ze scintilátoru, fotonásobiče, zesilovače a případně z AD převodníku [1].

1.2.3.1 Scintilátory

Scintilátory jsou látky, které mají schopnost emitovat fotony při reakci s nabitými částicemi ionizujícího záření a s fotony gama. Mezi tyto látky řadíme anorganické krystaly,

kapalné roztoky organických látek, organické materiály, nebo i vzácné plyny. Pokud se zaměříme na anorganické krystaly, tak nejčastěji jsou používány krystaly jodidu sodného aktivovaného thaliem (NaI(Tl)) [1].

Scintilátory jsou umístěné v hliníkovém obalu, který zabraňuje vniknutí vnějších fotonů do scintilačního krystalu. Krystal je nutno chránit před vnějšími vlivy vzduchu jako je například vlhkost. Fotony jsou emitovány ve scintilátoru do všech směrů a proto musí být vnitřní strana hliníkového obalu tvořena reflexivním materiálem, který fotony co nejúčinněji odrazí na fotokatodu fotonásobiče [1].



Obr. 5: Zapojení scintilační detekční jednotky, převzato [1]

Krystaly jsou umístěny z pravidla v těsné blízkosti fotokatody fotonásobiče, a aby nedocházelo ke ztrátám fotonů, je prostor mezi krystalem a fotonásobičem vyplněn světlovodným materiálem se stejnými optickými vlastnostmi jako má sklo (například silikonová vazelína). Pokud je vzdálenost mezi těmito prvky větší, může být přechod řešen pomocí světlovodičů, případně optickými vlákny [1].

Vhodnost použití organického nebo anorganického scintilátoru vychází z jejich vlastností. V praxi se používají organické i anorganické scintilátory. Hlavním požadavkem je vhodnost krystalu pro detekci neutronů.

1.2.3.2 Anorganické scintilátory

Zástupcem anorganických scintilátorů, pracujících jako detektor neutronů, jsou skleněné scintilátory. V nich se jako aktivátoru nejčastěji využívá Ce, méně často pak Pb, Sm, Tl nebo Cu. Předností jsou nízké pořizovací náklady, chemická, tepelná a mechanická odolnost a možnost výroby velkých krystalů za poměrně nízké náklady. Mezi nevýhody patří dlouhá časová konstanta vysvícení, nízká účinnost a nízká vlnová délka maxima emise přibližně 390 nm, která je nevhodná pro běžné fotonásobiče se spektrální citlivostí. V praxi se využívají pro detekci pomalých neutronů. Obecně se anorganické scintilátory nejčastěji používají pro detekci gama a rentgenového záření [2] [4].

1.2.3.3 Organické scintilátory

Organické scintilátory jsou vhodnější pro detekci neutronů. Při průletu neutronu organickým scintilátorem dochází k interakci neutronu s jádru vodíku, které jsou ve velké míře přítomny ve scintilačním materiálu. Spojité spektrum energií protonů odpovídá mono-energetickým neutronů. Vícenásobné srážky komplikují protonové spektrum, a proto se musí volit rozměry scintilátoru tak, aby k vícenásobným srážkám docházelo s minimální pravděpodobností. Pokud jsou voleny velmi malé rozměry scintilátoru, dochází u vysokoenergetických neutronů ke ztrátě protonů, které nepředají celou svou energii scintilátoru (stěnový efekt) [3].

Dekonvoluce se nazývá převod protonového přístrojového spektra naměřeného detektorem na spektrum neutronů. Jelikož je převod poměrně složitý, používá se buď maticové, nebo derivační metody. Pro nedostatek vhodných mono-energetických neutronových zdrojů jsou prvky matice odezvy vypočítány z matematického modelu. Odezva scintilátoru není obecně lineární funkcí energie protonů. V praxi se používá rozdílný časový

průběh vysvícení scintilátoru pro rozlišení gama a neutronového záření ve smíšených polích. Nejčastějším příkladem může být jednosložkový krystalický scintilátor (trans-stilben), nebo dvousložkový kapalný scintilátor [2] [3].

1.2.3.4 Heterogenní detektor

Heterogenní detektor, patří mezi zvláštní scintilační detektory a je speciálně určen pro detekci neutronů, kde je potlačena odezva fotonů. Detektor je tvořen nescintilujícím průhledným materiálem s atomy bóru, lithia či vodíku. Dále jsou v prostředí rozptýleny malé kuličky ZnS(Ag), nebo jiný anorganický scintilátor. Kuličky mají předem definovaný průměr, závislý především na dosahu těžkých nabitých částic, nebo nabitých částic vznikajících interakcí neutronů v průhledném materiálu. Nabité částice proletí kuličkami, kde je jejich energie pohlcena a vyvolá silnou scintilaci. Pouze malou část energie při průchodu kuličkou ztratí elektron (důsledek fotonových interakcí), protože mají mnohem nižší brzdnou schopnost a odpovídající scintilační odezva je úměrně menší. Pokud jsou vhodně nastaveny diskriminační hladiny, dochází k registraci jen samotných neutronů. Faktem však zůstává, že odezvu heterogenního detektoru nelze použít pro spektrometrii [2] [3].

1.2.3.5 Fotonásobič

Vzniklé fotony registrují a dále zesilují na měřitelnou hodnotu fotonásobiče (obr. 6). Název fotonásobič může být mírně zavádějící, protože fotonásobič nenásobí fotony, ale elektrony vyražené fotony na základě fotoefektu. Počet vyražených elektronů závisí na počtu fotonů, který je úměrný energii nabitých částic [1].

Po vyražení jsou elektrony přitahovány k nejbližší dynodě, na které je přivedeno napětí. Po dopadu na dynodu jsou vyrazeny sekundární elektrony, jejichž počet odpovídá minimálně dvojnásobku prvotně dopadlých elektronů, které jsou dále přitahovány k následující dynodě (má vyšší napětí než předchozí), a proces se opakuje.

Dynod ve fotonásobiči je 8 až 12, takže finální počet elektronů, který se dostává k anodě (poslední dynodě) je až 10^8 z jednoho prvotního elektronu. Množství je již dostatečné k vyvolání dobře měřitelné odezvy a k jejímu dalšímu zesílení. Vnitřní prostor fotonásobiče musí být odčerpán na vysoké vakuuum, aby nedocházelo k interakcím elektronů s jinými částicemi [1] [4].

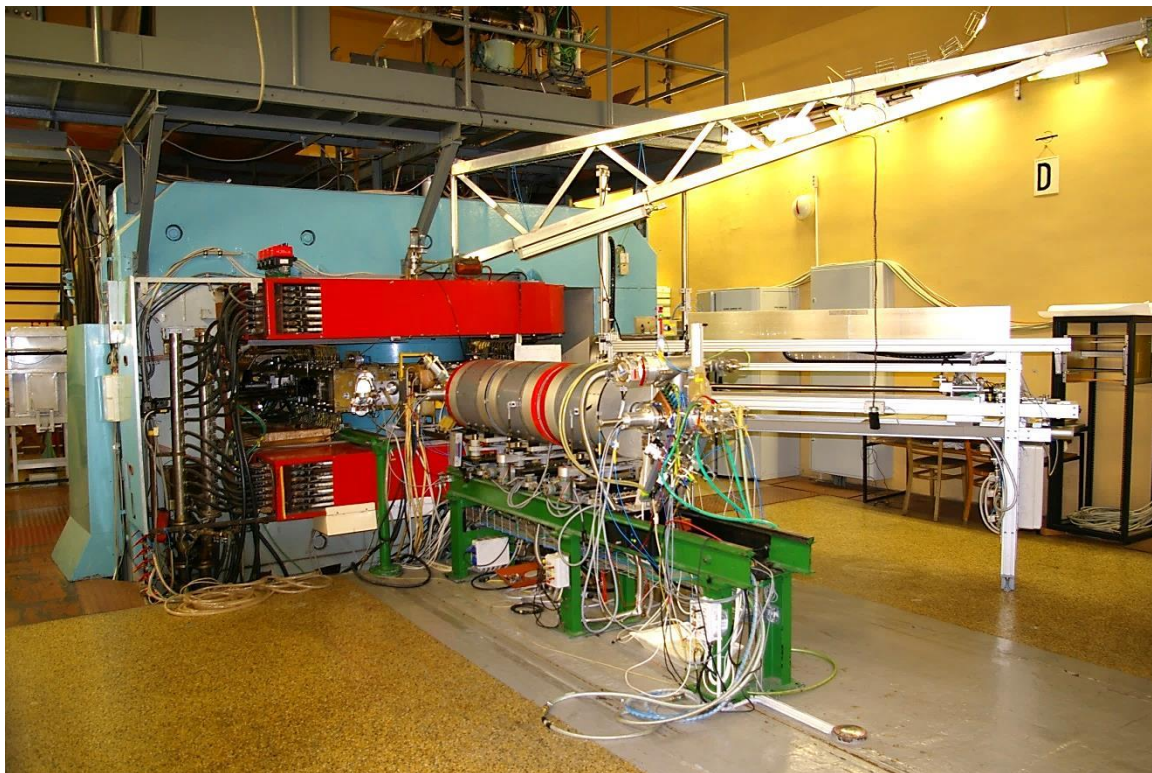


Obr. 6: Fotonásobič

2 Charakteristika pracovního prostředí urychlovače částice U-120M a popis neutronových generátorů NG

Zvolený detekční řetězec bude vykonávat pracovní činnost v neutronovém poli v ozařovací experimentální hale cyklotronu U-120M, ÚJF AV ČR, v.v.i. V měřicí hale se provádí experimenty se dvěma terčovými stanicemi. Terčovou stanicí využívající lithium jako konvertující materiál, nebo stanicí využívající jako zdroj neutronů beryllium. Stanice se

umísťují na do osy svazku urychlených protonů (zřídka deuteronů), které jsou vyváděny z cyklotronu HM trasou.



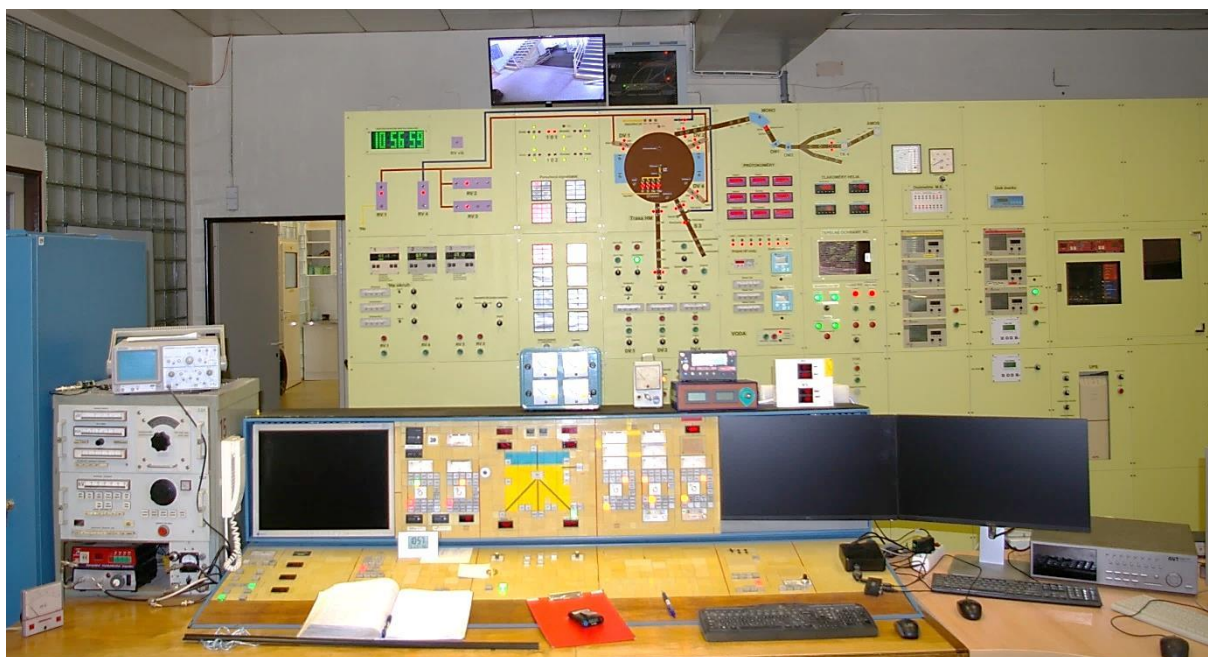
Obr. 7: Cyklotron U-120M s trasou HM, převzato z [11]

Umísťování terčových stanic se provádí před každým experimentem a to ze dvou důvodů. Prvním důvodem je rozdílná poloha svazku urychlených částic při každém provozu cyklotronu. Druhým důvodem je frekvence měření, spojená s dalšími experimenty cyklotronu. Experimentální hala musí být mezi jednotlivými experimenty uvolněna pro další plánové provozy cyklotronu a pro odstávky.

V experimentální hale je umístěno co nejméně elektronických zařízení, jelikož dochází k jejich degradaci vlivem ionizujícího záření, a to je spojeno s vysokými náklady. Data z měření jsou odesílána do měřicí místnosti, kde jsou zaznamenávána a zobrazována. Provoz cyklotronu je řízen z řídicí místnosti (velínu), odkud provádějí operátoři cyklotronu nastavování a ladění svazku částic.

Vždy je prováděno více dílčích experimentů, aby se co nejvíce využil provoz cyklotronu a také nainstalování neutronového generátoru. Jde o krátkodobé ozařovací cykly

trvajících řádově minuty až po dlouhé provozování trvajících desítky hodin. Operátoři se řídí harmonogramem daného experimentu, případně pokyny vedoucího experimentu.



Obr. 8: Velín cyklotronu U-120M, převzato z [11]

2.1 Lithiová terčová stanice

První ze dvou experimentálních stanic využívá ke konverzi protonů (deuteronů) na neutrony lithium. Ve stanici jsou dvě clony, které slouží pro kontrolu usazení stanice do osy svazu. Clonami prochází svazek nabitých částic do terče stanice, kde je umístěno lithium, které je chlazeno proudícím lihem, aby nedošlo během provozu k jeho roztavení. Clony jsou také chlazeny, avšak chlazení clon je realizováno chladicí vodou.

Manipulace s lithiem se provádí v argonové atmosféře, aby se zamezilo reakci lithia se vzduchem. Po umístění lithia do terčové stanice se aparatura odčerpá na vysoké vakuu. Celá aparatura včetně HM trasy cyklotronu musí být během provozu rovněž odčerpána na vysoké vakuu, aby se umožnil co nejlepší průchod nabitých částic aparaturou a docházelo k požadované konverzi nabitých částic na neutrony.

Jednotlivé části aparatury jsou od sebe odizolovány teflonovými kroužky. Na clony a terč je připojeno měření proudu. Proud je vytvářen průchodem svazku nabitých částic kolimátory a terčem. Měřený proud na clonách ověřuje správné nastavení stanice do osy

svazku (jsou požadovány co nejmenší hodnoty). Měřený proud se zaznamenává a dosahuje maximálně jednotky, spíše však desetiny μA .



Obr. 9: Lithiová terčová stanice, převzato z [11]

Spojení lithiové terčové stanice s měřicí místností je realizováno skrze velké množství kabelů, po kterých se přenáší informace o měřených datech, jakou jsou například teploty a tlaky v jednotlivých částech stanice. Jednou z nejpodstatnějších měřených hodnot je průtok chladícího lihu. Porucha chlazení lithia by měla za následek nárůst teploty lithia a jeho roztavení. Z tohoto důvodu je na průtok lihu navázána havarijní signalizace, která se uvede do provozu při nízkém průtoku chladícího lihu a dává pokyn operátorovi k okamžitému odstavení svazku urychlených částic a k neodkladnému informování obsluhy neutronového generátoru.

Při provozu lithiové experimentální stanice jsou prováděny nejkratší provozní cykly, kde se vzory ozařují řadově minuty a ihned po odstavení svazku neutronů, jsou dopravovány potrubní poštou do měřicí místnosti, kde jsou podrobeny měření na spektrometrech.

V případě použití lithiové experimentální stanice se používá kruhový lithiový terč s šířkou 2 mm. Při těchto experimentech se energie urychlených protonů pohybuje od 20 do 35 MeV, s krokem 2,5 MeV.

2.2 Beryliová terčová stanice

Druhým používaným neutronovým zdrojem je stanice obsahující tlusté lithium (zkoumají se i možnosti využití tenkého beryllia). Provedení je obdobné jako u stanice lithiové. Na stanici jsou rovněž přítomné dvě kontrolní clony a terč stanice, ve kterém je umístěno beryllium chlazené lihem. Každá terčová stanice má vlastní chladicí stanici, protože liš používáný k chlazení beryllia je tímto prvkem kontaminován.



Obr. 10: Beryliová terčová stanice

Stanice je také odčerpána na vysoké vakuum, je propojena shodně s měřicí místností. Jediný údaj, který není monitorován a zaznamenáván oproti stanici lithiové, je teplota konvertujícího materiálu, protože beryllium má teplotu tání několikanásobně vyšší než je teplota tání lithia. Jednotlivé části jsou od sebe rovněž odděleny nevodivým materiálem a na clonách a terči je měřen vznikající proud.

Použití detekčního řetězce je u beryliové terčové stanice žádoucí, protože zde zastává sekundární kontrolu náboje během celého experimentu. Beryllium je možno použít opakovaně a je používáno jedno konkrétní na více experimentů. Ovšem u lithiové stanice musí být lithium vyměněno za nové před každým provozem stanice.

Beryliová terčová stanice se používá na dlouhodobější expozice a při provozu se nevyužívá potrubní pošta. Tlusté beryllium má šířku 8 mm a provoz se provádí při energii 35 MeV. Energie je zpravidla vyšší nebo alespoň stejná jako při experimentech s lithiovou terčovou stanicí.

3 Požadavky na detekční řetězec, detekce neutronů, vhodné varianty detekčních řetězců a realizace

Pro detekci neutronů jsou vhodné různé varianty detekčních řetězců. Avšak při vybírání konkrétního detekčního řetězce je nutno brát na zřetel charakteristické podmínky provozu, v němž bude detektor provozován. Také způsob registrace dat musí být dle daných požadavků.

V zadaném případě je nutné, aby se registrace prováděla automaticky během experimentů a bylo možné vyhodnocovat zaznamenaná data po experimentu, jelikož měření neutronové situace není primární náplní experimentálních měření, a proto nemůže mít speciální požadavky na obsluhu. Dále by bylo ideální využití stávajícího stavu přenosu dat s minimálními úpravami a celkově s co nejmenšími nároky. Vhodná je například práce detektoru za laboratorních teplot (není nutné chlazení detektoru).

3.1 Požadavky na detekční řetězec a detekce neutronů

Detekční řetězec bude monitorovat neutronové toky během experimentů na izochronním urychlovači částic U-120M Ústavu jaderné fyziky AV ČR, v.v.i. Během experimentálního měření se využívají dva neutronové zdroje a to lithiová experimentální terčová stanice s tenkým lithiem a beryliová terčová stanice s tlustým beryliem. Energie nabývá hodnot 20 až 35 MeV. Stanice se provozují při vysokých energiích a hlavně u beryliové stanice jsou neutronové toky vysoké. Studují se i možnosti využití zdroje s tenkým beryliem.

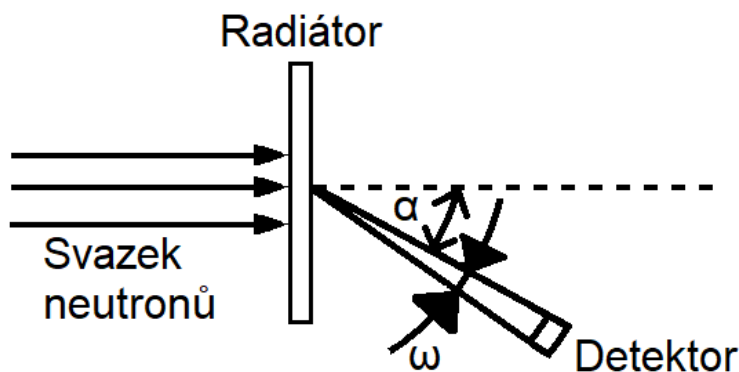
Manipulace s detekčním řetězcem by neměla způsobovat větší obtíže z důvodu prostorových a provozních omezení v experimentální hale. Jistou předností by mohla být snadná instalace a následná demontáž po experimentu. Při opětovné instalaci musí být dbáno na vždy stejné umístění detektoru, aby výsledky měření byly relevantní.

Od online detektoru je požadována registrace neutronů. Pro detekci neutronů je třeba registrovat sekundární nabitě částice nebo radionuklidy vznikající interakcí neutronů, protože neutrony nemají elektrický náboj, nemohou přímo ionizovat. Avšak detekce se může provádět běžnými detektory ionizujícího záření, které jsou opatřeny konvertujícím materiálem, který pohltí neutrony a vyvolává sekundární záření, které je dále detekováno (například u G-M trubice je na anodu nanosená tenká vrstva kadmia). Je však třeba brát v úvahu, že konvertující materiál interakcemi s neutrony degraduje. Dále jsou popsány možné metody registrace neutronů [2] [3].

3.1.1 Metoda odražených jader

Registrace neutronů pomocí metody měření odražených jader je založena na detekci odraženého jádra při pružném rozptylu neutronu, jelikož odražené jádro představuje přímo ionizující částici. Energie odraženého jádra však musí být dostatečně velká, aby dokázala uvolnit měřitelné množství nabitých částic podél své dráhy. Jelikož je zde požadavek na velikost energie, lze tuto metodu použít pouze pro registraci rychlých neutronů. Detekční vlastnosti registrujícího zařízení jsou dále závislé na pravděpodobnosti interakce, respektive na hustotě a účinném průřezu terčových jader [3] [4].

V reálném provozu se provádí registrace jen některých odražených jader, a proto je nutné znát úhlové, ale i energetické rozdělení odražených jader. Metodu lze dále rozdělit do dvou skupin a to integrální a diferenciální metody. Integrální metody se aplikuje v případech, kdy není znám směr pohybu neutronů [3] [5].



Obr. 11: Prostorové provedení metody odražených jader

Oproti tomu diferenciální metody je použitelná pouze za předpokladu známého směru toku neutronů, proto jsou vhodnější pro užití v daném případě. Podstatnou nevýhodou diferenciální metody je nízká detekční účinnost daná např. potřebou použití tenkého terčíku. Problém s použitím tenkého terčíku se dá kompenzovat použitím druhého detektoru umístěného mimo svazek, který bude registrovat rozptýlené neutrony. Kompenzace nízké detekční účinnosti je však pouze částečná [3].

3.1.2 Aktivační metoda

Další možnou metodou detekce neutronů je aktivační metoda. Podstatou metody jsou reakce neutronů s jádry materiálu detektoru. Vyhodnocují se zde radionuklidy vzniklé jadernými reakcemi. Při ozařování běžných materiálů neutrony dochází k velmi rozmanitým reakcím. Není vyloučen vznik několika radionuklidů při bombardování jediného druhu terčového jádra. Proto je potřeba aby se jako aktivační detektory využívaly čisté prvky, u kterých výrazně převládá jedna reakce neutronů mající za následek vznik konkrétního radionuklidu [3].

Dále by mělo být množství vzniklého radionuklidu snadno měřitelné a účinný průřez reakce co největší. Prahové reakce (n, α) nebo (n, p) se používají pro detekci rychlých neutronů a u dalších možných reakcí není ještě dostatečně znám průběh závislosti účinného průřezu na energii.



Obr. 12: Ukázka aktivačních fólií

Z důvodu nutnosti změření radionuklidu po ozáření musí být dostatečně dlouhý poločas přeměny radionuklidu. Nicméně s rostoucím poločasem přeměny narůstá počet radioaktivních jader nutných k docílení dané aktivity. Z toho plyne nižší citlivost detektoru při stejném účinném průřezu aktivačních reakcí a při rostoucím poločasu přeměny. Je třeba volit materiály s kompromisní hodnotou poločasu přeměny, jelikož krátká doba poločasu přeměny je výhodná z důvodu možnosti opakovaného použití detektoru bez nutnosti korekce a zohlednění zbytkové radioaktivity z přechozího měření. Detektor musí být tvořen co nejčistším materiálem, aby se vyloučily možné reakce s těmito nečistotami. Nečistoty způsobující nežádoucí reakce mohou být přítomny nejen v materiálu detektoru, ale i na jeho povrchu před jeho použitím [3] [5].

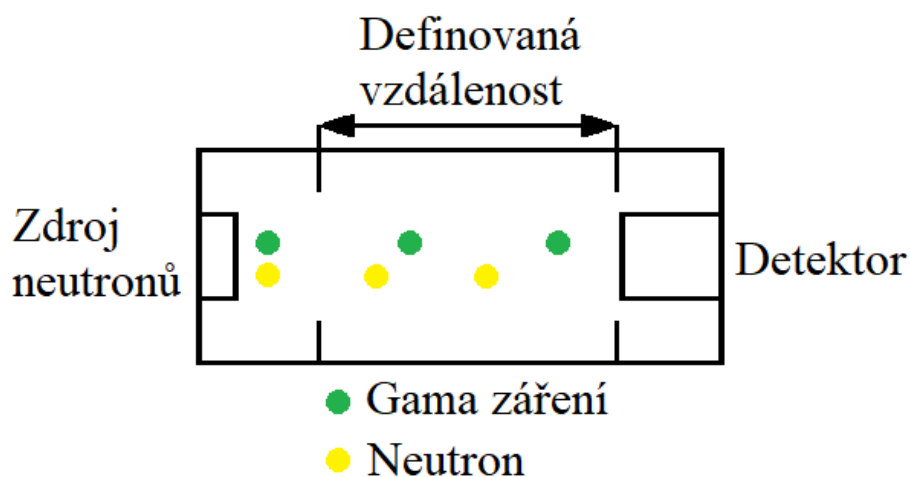
V praxi se používají aktivační detektory ve formě drátků, nebo například fólií. Uspořádání je uzpůsobeno budoucímu použití detektoru. Příkladem v havarijní dozimetrii

může být soubor obsahující indiovou fólii, která se vyhodnocuje ihned po případné havárii. Pro použití uvnitř reaktoru se naopak hodí použít aktivačních detektorů ve formě drátků [3].

3.1.3 Metoda doby průletu - TOF

Energie částice (neutronu) lze určit z rychlosti, kterou se pohybuje. Respektive se energie určí změřením času přeletu na definované vzdálenosti. Metoda je z principu náročnější na prostor a lze takto měřit za přijatelných nároků spíše pomalejší částice [3].

Pro co nejvyšší přesnost je nutné stanovit čas průletu definovanou dráhou co nejpřesněji. Určení počátečního času (vstup částice do definované vzdálenosti) se určuje obtížněji, než určení koncového času průletu definovanou oblastí, který je znám z odezvy detektoru. Obecně lze využít jedné ze tří metod. Princip první možnosti je, že neutronový zdroj generuje krátké pulzy neutronů. Frekvence pulzního zdroje neutronů musí být stanovena tak, aby i nejpomalejší neutrony stihly překonat definovanou vzdálenost, než tutéž vzdálenost překonají nejrychlejší neutrony z dalšího pulzu. Pokud by docházelo k současné detekci částic z několika různých pulzů v jeden okamžik, mohlo by to zapříčinit desinterpretaci měřených dat [3] [5].



Obr. 13: Schéma měření doby průletu (TOF)

Druhou možností registrace vstupního času do definovaného úseku je detekce doprovodné nabitě částice vzniklé při emisi neutronů. Doprovodná částice se detekuje na začátku měřeného úseku detektorem. Třetí možnost je obdobná. Vstupní čas je zjišťován

vodíkovým detektorem na začátku úseku. Vodíkový detektor registruje odražený proton důsledkem průletu neutronu detektorem. Obě metody mají společnou nevýhodu. Četnosti měřených neutronů musí být velmi malé, aby nedocházelo k předbíhání neutronů a jejich registrace probíhala chronologicky [3].

Moderní přístroje jsou schopny metodou průletu registrovat i rychlé neutrony o energii řádově MeV. Protože nadefinovanou vzdálenost nelze prodlužovat, tak jak by bylo pro měření rychlých neutronů vhodné, musí se neutronový tok rozdělovat na velmi krátké pulzy. Například cyklotron s frekvencí napětí na duantech cca 15 MHz, je schopen generovat pulzy o délce 3 ns a pauze mezi pulzy okolo 75 ns [3] [4].

3.2 Vhodné řetězce

Při výběru vhodného detekčního řetězce musí být zohledněno mnoho požadavků. Výběr musí být prováděn na základě prostředí, ve kterém se bude detekce provádět (v tomto případě jde o experimentální halu urychlovače částic U – 120M), fyzikálních vlastnostech samotného detektoru, požadavků na měřená data a v neposlední řadě musí být zohledněno i hledisko finanční.

3.2.1 Ionizační komora

Ionizační komory mají proti jiným detektorům schopnost provozu i za vysokých provozních teplot, jsou využívány například při měření aktivní zóny reaktorů. Další výhodou je jejich dynamický rozsah mnoha řádů [2].

Vyhodnocování dat z ionizační komory může být prováděno dvěma způsoby. V metrologii běžnější způsob vyhodnocování je integrální. Měření proud odpovídá velikosti náboje vytvořeného ionizací za jednotku času. Vyhodnocování se provádí v analogovém režimu. Druhý způsob zaznamenávání je vyhodnocování jednotlivých pulzů. Každý pulz představuje jednu událost (interakci) a je úměrný velikosti vzniklého náboje, potažmo energii

náboje. Pulzní vyhodnocování je výhodné, jelikož lze výstupní signál zpracovávat pulzní technikou a umožňuje spektrometrické zpracování [2].

Oba druhy zpracování mají však i svá negativa. U integrálního způsobu zaznamenávání dat je to nutnost měření poměrně malých proudů (10^{-12} až 10^{-15} A), což je nejen technicky náročné, ale i nákladné. Pulzní zpracování má rovněž své limity. Zejména se nehodí pro registraci velkého množství událostí, jelikož jsou zaznamenávány jednotlivé pulzy, pokud je četnost vysoká a pulzy by se v daný okamžik překrývaly, dojde ke zkreslení v důsledku zaznamenání pouze jednoho pulzu [2] [5].

Využití ionizační komory pro měření částic a jejich energie na urychlovači částic U120M je možné. Vhodnější způsob vyhodnocování dat je integrální, jelikož u impulzní metody by u beryliové terčové stanici docházelo ke zkreslení dat v důsledku vysokých neutronových toků. Avšak ani integrální metoda není ideální. Požadované měření malých proudů je spojeno jak s vysokými finančními náklady, tak s nutností velmi kvalitního technického provedení které by v daném případě mohlo být náročnější a výhody by mohly být převáženy nevýhodami. Kvůli nízkému lineárnímu součiniteli zeslabení nabitých částic a obecně malé brzdě schopnosti plynů mají ionizační komory malou detekční účinnost, nebo musí být velmi rozměrné. Zvláštní důraz je kladen na kvalitní odstínění, protože v okolí elektromagnetu cyklotronu je silné elektromagnetické pole [2] [4].

3.2.2 Polovodičový detektor

Pevné látky mají asi tisíckrát vyšší hustotu a mají i mnohem lepší brzdě a interakční parametry než plyny používané u ionizačních komor a lze je použít i pro detekci neutronů [2].

Historicky začal velmi nákladný výzkum věnovaný monokrystalickým materiálům (Ge a Si), na počátku padesátých let. Výzkum byl zaměřen hlavně na vývoj elektroniky, avšak získané poznatky se mohly uplatnit i pro vývoj polovodičových detektorů. Samostatný velmi nákladný vývoj zaměřený pouze na detektory by nebyl možný z důvodu malé sériové výroby detektorů. Další vývoj se však ubíral jiným směrem a to ke křemíku, který je pro elektroniku

výhodnější díky jeho kysličníku SiO_2 , pro velmi dobré izolační vlastnosti umožňující hromadnou výrobu i velmi složitých obvodů (mikroprocesory) [2].

Pro výrobu detektorů fotonového záření je však vhodnější použít germanium, protože má větší protonové číslo. Výzkum ohledně polovodičových detektorů se ubíral již samostatným směrem na rozdíl od výzkumu použití polovodičů v elektronice. Výzkum byl z počátku zaměřen na tažení monokrystalů Ge s velkým průměrem. Výsledkem rafinace bylo dosaženo vysoké čistoty Ge (na více než 10^{12} atomů Ge připadá pouze jeden atom nečistot). Jedná se o jeden z nejčistších materiálů, které dokáže člověk vyrobit. Výhodou takto čistého materiálu je výroba detektorů, které není třeba mimo jejich provoz chladit [2].



Obr. 14: Polovodičový detektor HPGe

Pokud má vlastní polovodič nenulovou teplotu, jeho elektrony absorbují část tepelné energie. Při dosažení dostatečné energie překoná valenční elektron zakázaný pás a dostává se do prázdného vodivostního pásu. V místě chybějícího elektronu zůstane kladná díra. Takže na základě tepelné energie vzniká pár elektron díra. Z principu je jasné, že se v daný okamžik krystal jeví jako celek elektricky neutrální. Po přiložení elektrického napětí na krystal, začnou driftovat tyto vytvořené páry a krystalem začne protékat proud. Měrný odpor krystalu je nepřímo úměrný ztracené kinetické energii nabitě částice. Při laboratorním měření plyne

z této závislosti nezbytnost chlazení germaniových detektorů (např. tekutým dusíkem), aby docházelo ke snížení proudu detektorem v důsledku zvýšení odporu krystalu. V případě výpadku chlazení dojde k nárůstu proudu detektorem a tím i zvýšení šumu, který by byl dominantní vzhledem k měřeným datům. Křemíkové detektory není nutné během provozu chladit, a proto se používají v případě detektorů jednoduché struktury n – p a p – n [2].

Využití vlastností p-n přechodu je doposud jedinou známou možností omezení tepelně stimulovaného proudu. Přechod musí být vytvořen bez porušení krystalické mřížky monokrystalu, protože kdyby byl realizován stykem dvou (i velmi kvalitně opracovaných) krystalů opačných vodivostí, došlo by k porušení krystalové mřížky a i termodynamické rovnováhy [2].

Chování p-n přechodu je shodné jako u diody. Dochází k polarizaci po přiložení napětí v propustném, respektive závěrném směru. Připojení v propustném směru není vhodné pro použití v detektoru, jelikož přechodem protéká stálý proud. Pokud je přechod zapojen v závěrném směru, je situace odlišná. Majoritní nosiče nemohou migrovat, protože elektrické pole má opačný směr působení, proud neprochází. Vznikne ochuzená oblast (bez volných nosičů náboje) která je vhodná pro detekci. Záření zapříčiní vznik elektronů a děr, které dále migrují a vytvářejí proudový signál, který je dále zpracováván [2].

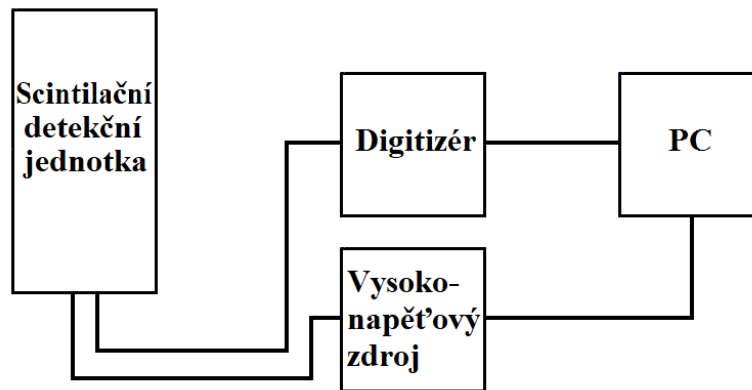
Maximální velikost přikládaného napětí je omezena průrazným napětím. Průrazné napětí je do jisté míry individuální a je například velmi ovlivněno nehomogenitami v mřížce a výskytem poruch. Provozní napětí je výrazně nižší než maximální napětí. Výrobce zpravidla stanovuje maximální napětí a při používání nesmí být nikdy překročeno. Cena polovodičového detektoru roste velmi rychle s provozním napětím. Standardní napětí se pohybuje od 100 V a překračuje až kV [2].

3.3 Realizace vybraného řešení

Online detekce neutronů v zadaném prostředí je realizována scintilační detekční jednotkou. Zvolený scintilační materiál je anorganický vzhledem k jeho vhodným vlastnostem a přiměřeným pořizovacím nákladům. Scintilační jednotka a další nezbytné části detekčního

řetězce nejsou rozměrově nikterak náročné je zachována vysoká mobilita a variabilita celého řetězce.

Při použití vybraného řetězce je v neutronovém poli umístěna pouze samotná scintilační detekční jednotka a ostatní části jsou umístěny mimo experimentální halu. Při pořizování dílčích prvků detekčního řetězce byl kladen důraz na spolehlivost, cenu a byly zohledněny zkušenosti z již proběhlých experimentů.



Obr. 15: Schéma zapojení detekčního řetězce

3.3.1 Vysokonapěťový zdroj

Během provozu je třeba na scintilační detekční jednotku přivádět záporné vysoké napětí. Jako zdroj je použit USB vysokonapěťový zdroj [6]. Maximální výstupní napětí je -3kV při proudu 500 uA. Provozní napětí nepřesáhne -600 V. Zdroj je napájen přes USB port, přes který probíhá i ovládání.



Obr. 16: USB Vysokonapěťový zdroj DT5471N [6]

Napětí je na sondu přiváděno koaxiálním kabelem zakončeným vysokonapěťovým Lemo konektorem [7]. Zesílení signálu je silně závislé na napětí přiváděném na sondu, proto musí být zdroj napětí velmi stabilní (největší možná odchylka se pohybuje okolo 1V).

3.3.2 Digitizér

Výstupní signál ze scintilační detekční jednotky je vzorkován konvertorem podle zadaných prahových hodnot. Digitizér odesílá tři informace do měřicího počítače. Zaznamenává se vypočítaná plocha vzniklého pulzu, PSD a časová značka.

$$PSD = \frac{Q_{Long\ Gate} - Q_{Short\ Gate}}{Q_{Long\ Gate}}$$

Pro monitorování neutronové situace je použit individuální stolní digitizér [9], který je dokáže zaznamenávat data až ze čtyř sond zároveň, je 10 bitový se vzorkovací frekvencí 1 GS/s. Vzhledem k současnému využívání pouze jednoho kanálu by se digitizér mohl využívat i na další sondy, avšak v tom případě by bylo nutné jej propojit s počítačem přes optické rozhraní, aby nedocházelo k zahlcení přenosu dat. Při současném použití jedné scintilační detekční jednotky je přenos realizován přes sběrnici USB a rychlost přenosu je za dále zmíněných podmínek vyhovující.



Obr. 17: Stolní digitizér DT5751 [9]

3.3.3 Použitá scintilační detekční jednotka

Scintilační detekční jednotka [10], je navržena na míru pro specifické podmínky, ve kterých bude provozována. Scintilační materiál je organický a jsou voleny optimální rozměry při zachování požadované detekční a zejména rozlišovací schopnosti. Scintilační materiál tvoří vodíkové polymerní matrice strukturované v řadě soustředných válců z čírého plastu, které usnadňují sběr světla. Scintilační vlastnosti krystalu jsou vylepšeny anorganickou příměsí.

Jmenovité napětí detekční jednotky se pohybuje kolem -600 V. Při detekování intenzivního neutronového pole lze jmenovité napětí snížit. Důsledkem nižšího napětí je nižší zesílení a dochází k menšímu počtu registrací odezvy, jelikož má pulz méně často dostatečné parametry pro překonání prahových hodnot.

Sonda detekuje kromě neutronů také gama částice. Jsou zaznamenávány odezvy jak na neutrony, tak na gama záření. Při zpracování odezvy je rozlišení dat snadné a to z důvodu rozdílného PSD u odezvy na neutrony a u odezvy na gama záření.



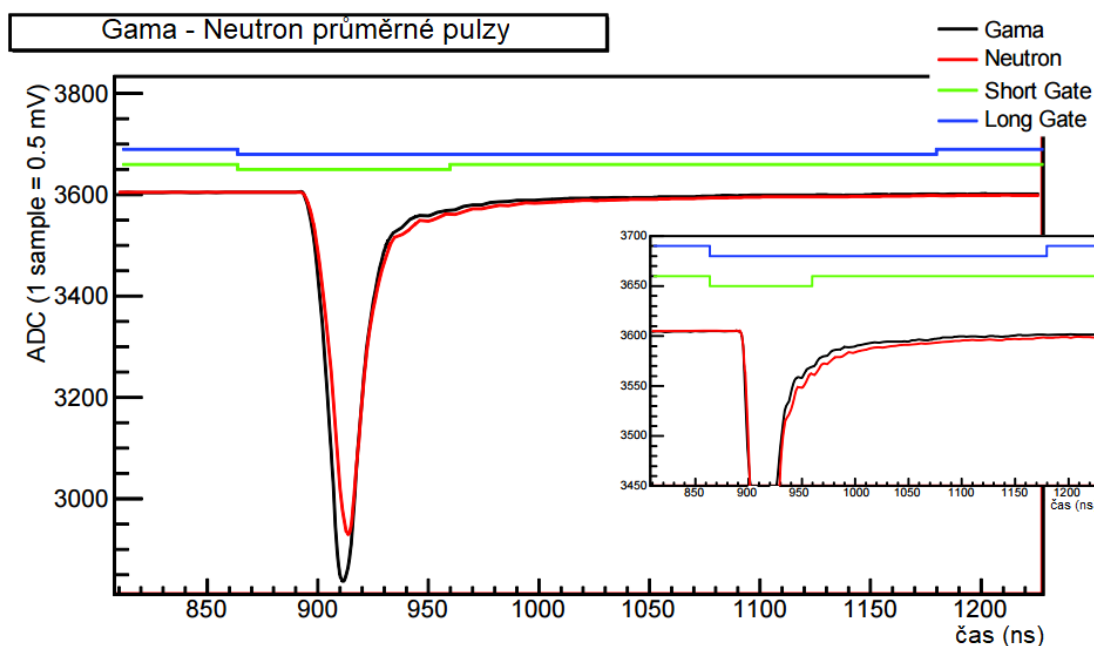
Obr. 18: Scintilační detekční jednotka [10]

4 Základní fyzikální charakteristiky detekčního řetězce a limity použitelnosti

Podle požadavků na detekční řetězec jsou patrné nároky na schopnost měření v neutronovém poli různých intenzit. Proto musí být stanoveny limity pro spolehlivé použití detekčního řetězce, které budou vycházet ze základních fyzikálních omezení realizovaného řešení.

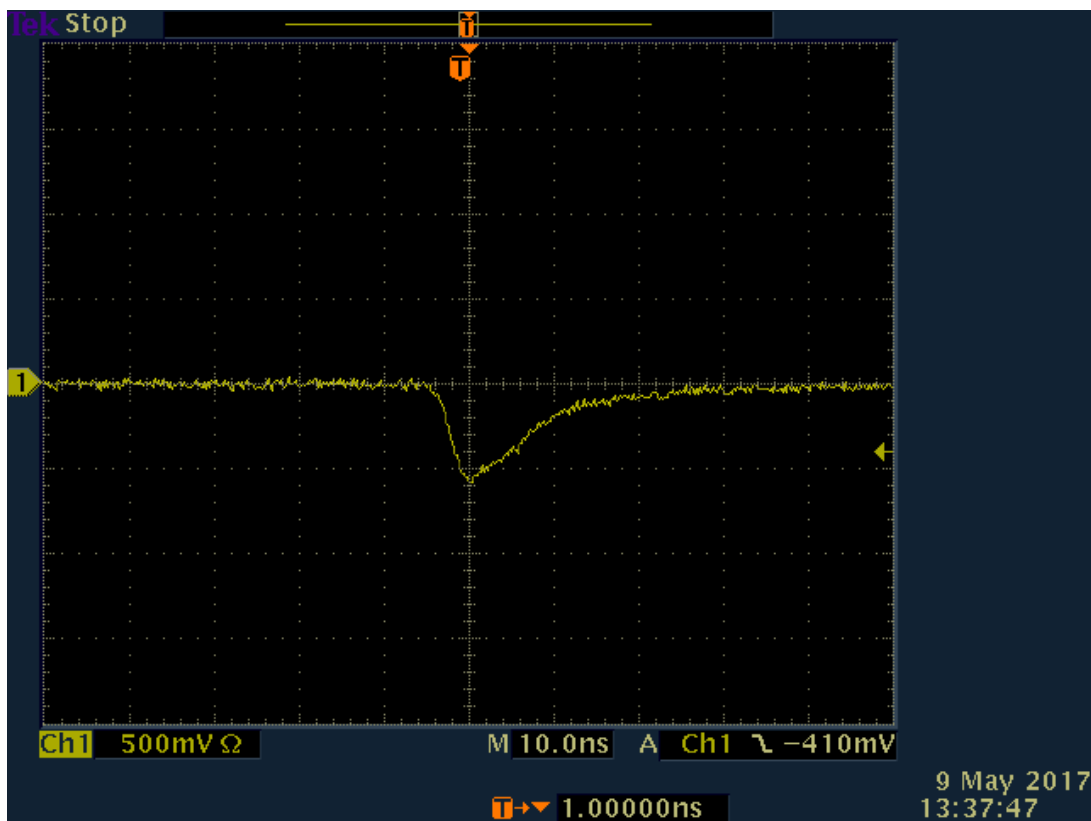
4.1 Základní fyzikální charakteristiky detekčního řetězce

Použitá scintilační detekční jednotka registruje nejen odezvu na základě detekce neutronů, ale i na základě gama záření. Odezva sondy je ve formě pulzu, který má své charakteristiky. Lze od sebe rozlišit pulz vzniklý v důsledku gama záření od pulzu vzniklého registrací neutronů. Proudové pulzy mají rozdílný tvar pulzu a celkové PSD mají rozdílné, jak je patrné na obrázku 19. Rozlišení je více názorné na zobrazovaném grafu během zaznamenávání dat (obrázek 26.), kde je na vodorovné ose vyneseno PSD a na svislé ose plocha pulzu.



Obr. 19: Rozdíl mezi odezvou na gama záření a neutrony, převzato z [8]

Následující základní parametry pulzu byly určeny na základě testovacího provozu detekčního řetězce, kde byl jako zdroj neutronů použit neutronový zdroj PuBe. Pro zobrazení průběhu byl použit osciloskop Tektronix TDS 3034C.



Obr. 20: Ukázka odezvy scintilační detekční jednotky

Obrázek 20. vyobrazuje reálnou odezvu scintilační detekční jednotky na ionizující záření. Dle nastavených rozsahů se hloubka pulzu pohybuje kolem 500 mV, long gate přibližně 43 ns a short gate 26 ns. Zesílení je silně závislé na napětí přiváděném na scintilační detekční jednotku.

4.2 Mezní limity detekčního řetězce

Za daných podmínek je jediný omezující prvek u vybraného detekčního řetězce přenosová rychlost mezi digitizérem a počítačem na který se zaznamenávají data. Propojení je realizováno přes USB. Výrobce uvádí maximální přenosovou rychlost dat 30 MB/s. Rychlost v určitých případech nemusí být dostačující, hlavně při expozici s beryliovou terčovou sanicí

při vyšších energiích a proudu na terči, proto je nutné snížit přiváděné napětí na sondu. Je třeba zdůraznit, že i v případě zatížení přenosu se jedná o mrtvou dobu detekčního řetězce.

Na základě signalizace zatížení USB přenosu digitizérem bylo experimentálně určeno optimální napětí pro náročnější prostředí konkrétního experimentu, při zachování potřebné kvality zaznamenaných dat. Korekcí naměřených dat je možné minimalizovat vliv sporadického výskytu mrtvé doby. Testování proběhlo s beryliovou terčovou stanicí jako zdrojem neutronů, při proudu měřeného na terči $5 \mu A$. V tabulce 1. Jsou uvedeny hodnoty přiváděného napětí na scintilační detekční jednotku a počet (n) detekování zatížení přenosu za 1 s.

<i>napětí [V]</i>	<i>Počet zatížení [n/s]</i>
<i>600</i>	∞
<i>550</i>	<i>1</i>
<i>530</i>	2×10^{-1}
<i>525</i>	11×10^{-2}
<i>523</i>	58×10^{-3}
<i>520</i>	<i>0</i>

Tab. 1: Závislost napětí na počtu zahlcení za 1 s

Použití jmenovitého napětí (- 600 V) scintilační detekční jednotky není možné z důvodu permanentního zatížení USB přenosu. Při provozech za těchto podmínek musí být sníženo napětí na 523 V, kde je interval mezi hlášením mrtvé doby 17 s.

5 Stručná dokumentace ovládání a instalace

Vybraný detekční řetězec nemůže být instalován trvale v experimentální měřicí hale, protože není možné blokovat prostor během dalších provozů cyklotronu. Je nutné provádět jeho instalaci před každým experimentem. Umístění scintilační detekční jednotky v prostoru před neutronovým zdrojem je také rozdílné během jednotlivých expozic. Důvodem jsou odlišné pozice ozařovaných vzorků případně dalších detekčních systémů a ozařovaných materiálů.

Jednotlivé nutné kroky k uvedení provozu detekčního řetězce jsou: umístit scintilační detekční jednotku na určenou pozici v měřicí hale dle aktuálních podmínek, propojení scintilační detekční jednotky s digitizérem a vysokonapěťovým zdrojem, respektive s měřicím počítačem, přivedení vysokého napětí na scintilační detekční jednotku a spuštění záznamu dat.

5.1 Instalace detekčního řetězce a propojení s měřicí místností

Scintilační detekční jednotka se umísťuje do svazku neutronů ve vzdálenosti přibližně pěti metrů od neutronového zdroje. Pokud není umístění přímo do osy svazku neutronů možné z důvodu velkého množství dalších přístrojů, umísťuje se co nejbližší ose svazku neutronů.

Propojení scintilační detekční jednotky s měřicí místností je realizováno svazkem koaxiálních kabelů, které mají 100% stínění a impedanci 75 ohm. V současné době se zvažují možné výhody použití koaxiálních kabelů s impedancí 50 ohm. Sonda je připojena koaxiálním kabelem, po kterém jsou přenášena data. Druhý koaxiální kabel přivádí na sondu vysoké napětí. Vzhledem k přiváděnému vysokému napětí je nutné dbát na opatrnost a

provádět manipulaci se scintilační detekční jednotkou pouze v případě, pokud na ní není přiváděno napětí.

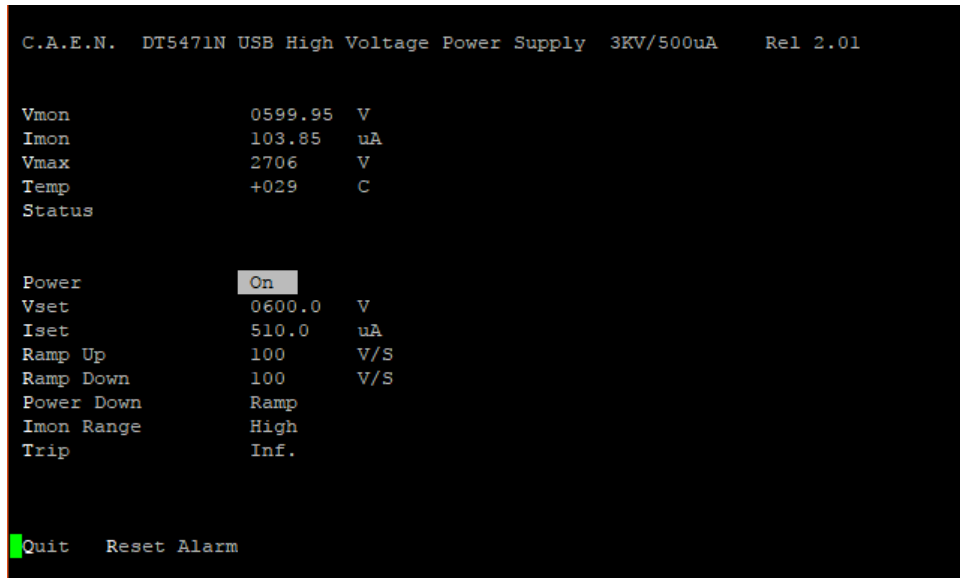


Obr. 21: Scintilační detekční jednotka umístěna ve stojanu

Dostatečná délka propojovacích kabelů spolu s výškově nastavitelným stojanem pro sondu zajišťuje požadovanou mobilitu při umístění sondy na předem definované místo.

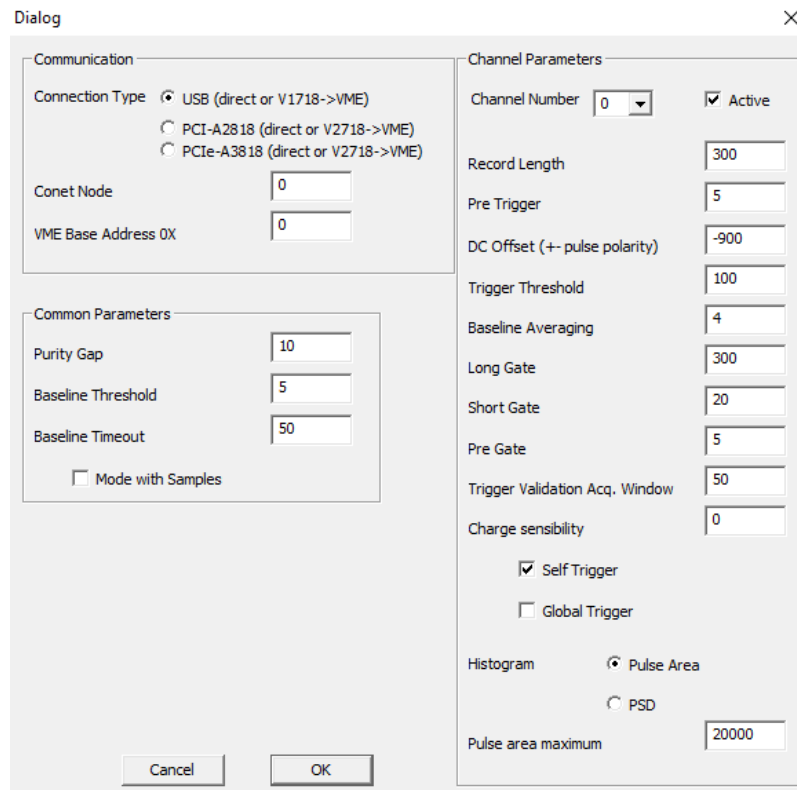
5.2 Ovládání vysokonapěťového zdroje a spuštění záznamu dat

Po propojení scintilační detekční jednotky s vysokonapěťovým zdrojem je nezbytné přivést na sondu pracovní napětí. Pracovní napětí je voleno vzhledem k danému provozu a plánovaným charakteristikám daného experimentu. Jmenovité napětí je - 600 V.



Obr. 22: Ovládání vysokonapětového zdroje [6]

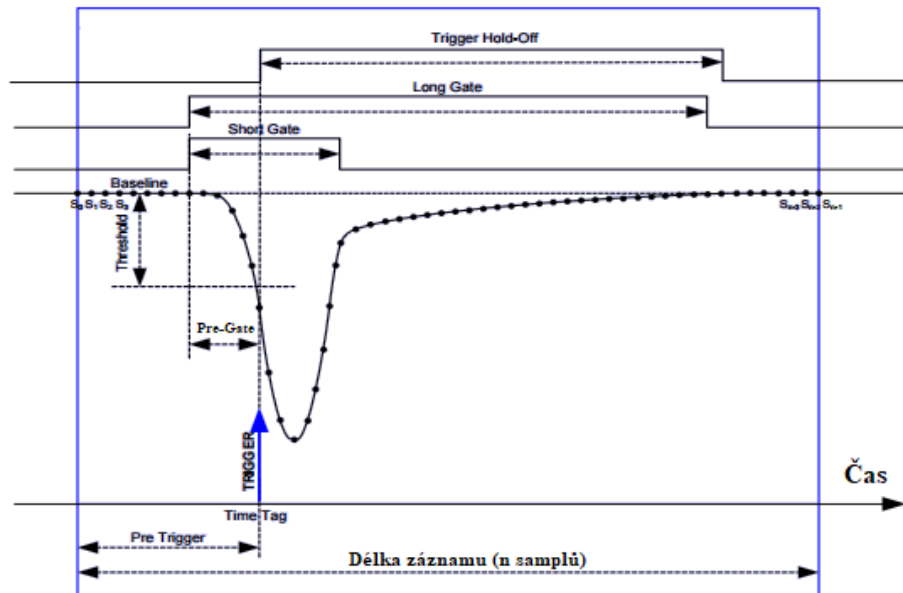
Pokud je plánována expozice s beryliovou terčovou stanicí volí se nižší pracovní napětí na sondě, než v případě lithiové stanice, jelikož zesílení je silně závislé na napětí. Velikost pracovního napětí se určila během experimentu za daných podmínek, kdy bylo zesílení dostatečně velké, avšak výskyt mrtvé doby detekčního řetězce byl v toleranci korekce dat.



Obr. 23: Nastavení prahových hodnot programu

V programu, který zapisuje výstupní data z digitizéru, je možné nastavit jednotlivé hladiny, od kterých se bude zaznamenávat pulz vzniklý na základě události. Optimální nastavení těchto hodnot vzniklo v průběhu testování detekčního řetězce během zkušebního provozu. Jednotlivé termíny definující konkrétní hladiny jsou patrné z obrázku 24.

Zaznamenávání dat z detekčního řetězce musí být spuštěno ihned po instalaci terčové stanice před testovacím provozem cyklotronu, a je vypnuto až po skončení celého experimentu, aby bylo možné z naměřených dat určit celkový náboj. Data jsou zapisována do textového souboru a kromě nich je také zaznamenáno nastavení prahových hodnot programu pro pozdější možnou kontrolu.



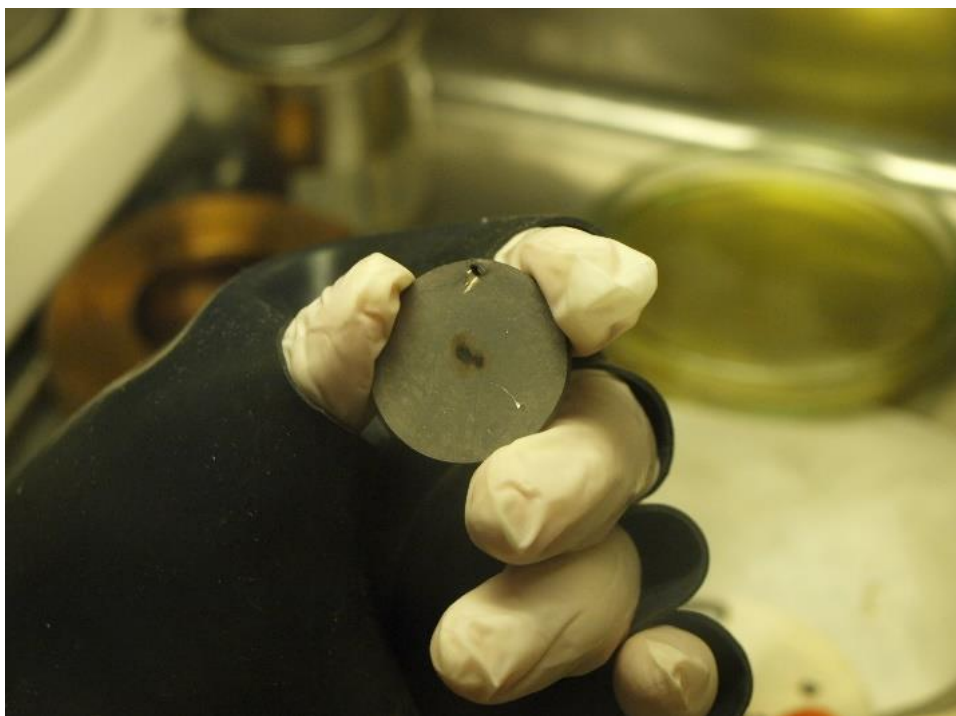
Obr. 24: Definování prahových hodnot, převzato z [8]

6 Použití detekčního řetězce během experimentu na izochronním cyklotronu U-120M

Detekční řetězec bude používán k monitorování neutronového toku při experimentech u dvou terčových stanic. U první terčové stanice je jako zdroj neutronů použito tenké lithium, které je zpravidla ozařováno svazkem protonů. U druhé experimentální aparatury se jako zdroj neutronů používá tlusté beryllium, které je rovněž častěji ozařováno protony.

6.1 Experiment s lithiovou terčovou stanicí

Scintilační detekční jednotka je umístěna v ose svazku neutronů, avšak přímo za terčovou stanicí mohou být umístěny další vzorky určené k expozici. Konkrétně u lithiové aparatury jde například o vzorky určené ke krátkodobému ozáření, které jsou přepravované do měřicí místnosti potrubní poštou.

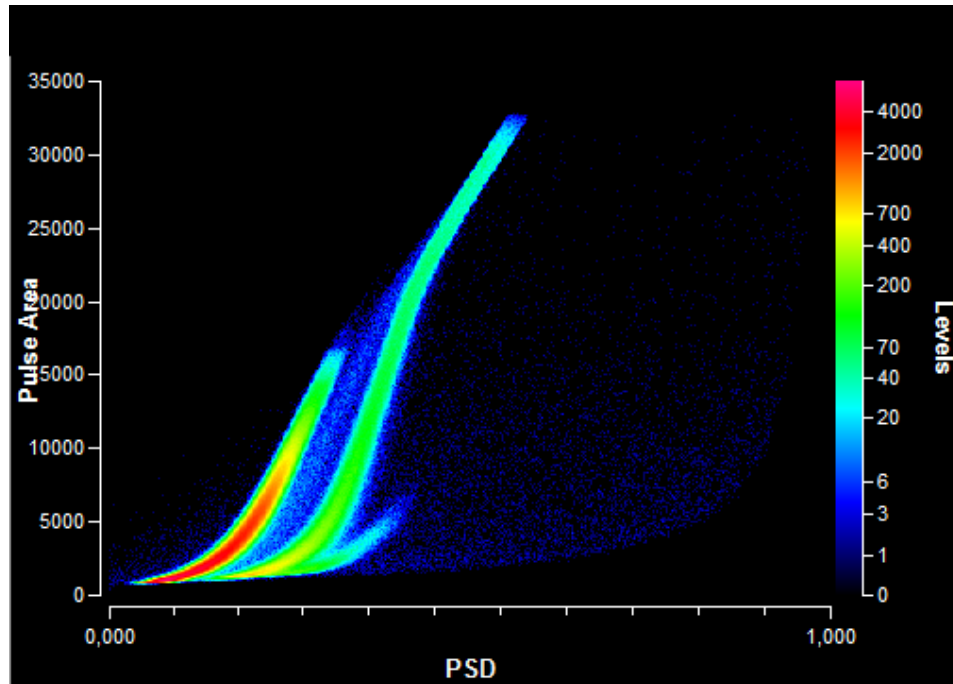


Obr. 25: Lithiový terč po expozici

Experiment je rozdělen do několika jednotlivých expozic. V běžném provozu se bude měřit situace během celého experimentu, aby byl znám výsledný celkový náboj. Avšak při prvním uvedení detekčního řetězce do provozu je nutné otestovat jeho funkčnost a jednotlivé expozice se využily k ověření správné funkčnosti a limitům detekce.

Sonda byla umístěna v ose svazku stojanem ve výšce 1,192 m a ve vzdálenosti 1,514 m od terče. Intenzita neutronového pole se vzdáleností od zdroje neutronů klesá druhou mocninou, při použití lithiového zdroje se stanice provozuje za výrazně menších proudů na terči, respektive celková intenzita neutronového toku je nižší než u beryliové stanice. Proto může být sonda umístěna blíže terči, než v případě použití beryliové terčové stanice. Proud měřený na terči byl 100 nA.

Na obrázku číslo 26., je graf z testovacího provozu. Sonda je schopna detekovat jak gama záření, tak neutrony. Odezvu na gama záření a odezvu na neutrony je možné rozlišit podle rozdílného PSD. Na výsledném grafu lze toto rozlišení sledovat podle rozdílné hodnoty na vodorovné ose, kde je vyobrazeno PSD. Události vyobrazené jako lokus s nižší hodnotou PSD jsou připisovány gama záření. V pořadí druhý lokus s rostoucí velikostí PSD je způsoben odezvou na neutrony.



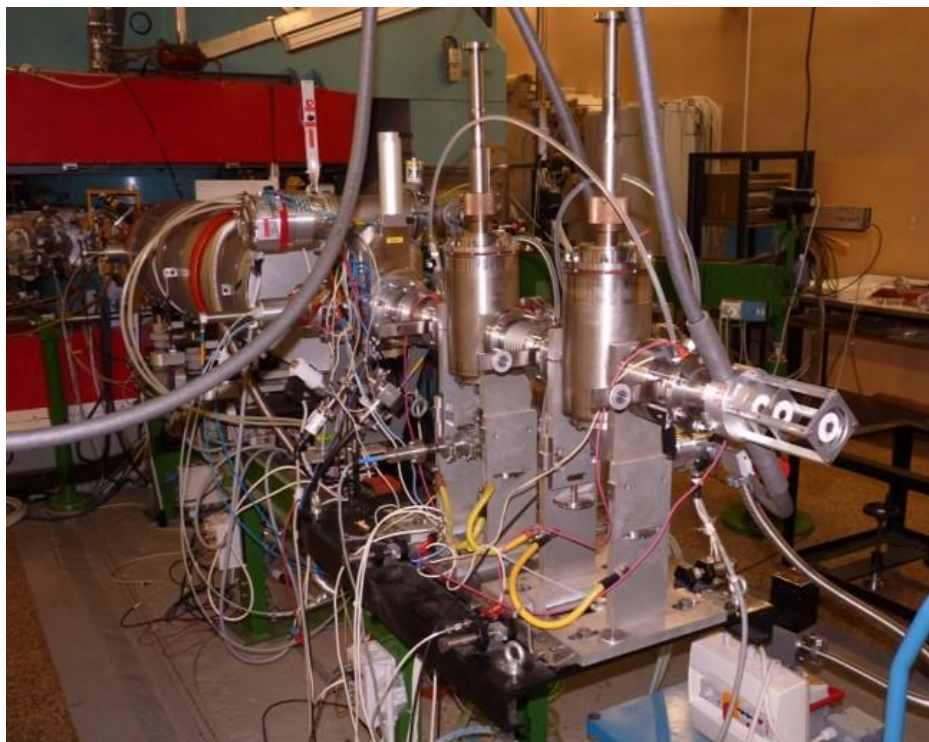
Obr. 26. Testovací provoz s lithiovou stanicí [12]

Během experimentů s tenkým lithiem se detekční řetězec používá jako terciální kontrola náboje během experimentu. Sekundární kontrolu zde zastává měření lithia po expozici. Data jsou po experimentu vyhodnocena a vzájemně porovnána.

6.2 Experiment s beryliovou terčovou stanicí

Největší přínos má detekční řetězec při použití během experimentů s beryliovou terčovou stanicí, kde slouží ke kontrole náboje. Jelikož stanice využívá jako konvertující materiál tlusté beryllium a vzhledem k vysokému bodu tání beryllia, se stanice standardně provozuje s vyšší energií svazku urychlených částic a vyšší hodnotou proudu na terči.

S vyšší hodnotou proudu na terči je spojena nutnost snížit přiváděné napětí na sondu, aby nedocházelo k výskytu chyb v záznamu. Předmětem testování byl i provoz scintilační detekční jednotky se jmenovitým napětím zakryté stínícím materiálem zpomalující rychlé neutrony. Toto stínění nevykazovalo požadovaný efekt, a proto byla tato varianta zavrhnuta. Jako další byla možnost významně změnit postavení detekční sondy v prostoru před cyklotronem. Ovšem ani v tomto případě nebyl výsledný efekt dostačující.



Obr. 27: Beryliová terčová stanice instalovaná na HM trase

Předmětem dalšího testování bylo nastavení prahových hodnot programu, kde by se zvýšil detekční rozsah sondy, avšak i významné upravení prahových hodnot přineslo pouze minimální požadovanou změnu při zachování jmenovitého napětí. Důsledkem těchto testů je nutnost snížení napětí přiváděného na sondu a tím zvýšení detekčního rozsahu.

Sondu je nutné umístit ve větší vzdálenosti od neutronového zdroje, než v případě provozu s lithiovou terčovou stanicí. V některých případech se umísťuje i mimo osu svazku. Při vysokém proudu na terči byla sonda umístěna ve vzdálenosti 4,563 m od neutronového zdroje, 1,283 m od osy svazku neutronů a ve výšce 1,172 m. Po vyhodnocení zaznamenaných dat, bylo vybrané místo shledáno jako optimální.

Propojení je realizováno jako v případě experimentu s lithiovou stanicí. Sonda se umísťuje na nejvhodnější místo dané charakteristikou plánovaného experimentu. Musí být však kladen důraz na správné umístění scintilační detekční jednotky, protože krystal má definován směr průletu neutronů pro jejich detekci.

Závěr

Cílem práce bylo vybrání a uvedení do provozu vhodného detekčního řetězce, včetně testovacího provozu během expozice dle zadaných požadavků a podmínek plynoucích ze specifického provozního prostředí.

První kapitola splňuje první bod zadání. Je zde uveden teoretický rozbor zaměřený na detektory ionizujícího záření a jejich základní vlastnosti. Jsou zde popsány obecné typy detektorů pro detekci gama záření, avšak dále je pozornost směřována k detekci neutronů, respektive k možnostem detekce neutronů vzhledem k daným podmínkám.

Druhý bod zadání je splněn ve třetí kapitole, kde jsou uvedeny vhodné varianty detekčních řetězců pro monitorování neutronového pole. Dle požadavků pracovního prostředí a s ohledem na ekonomické hledisko byl vybrán nevhodnější detekční řetězec a provedena jeho realizace.

Základní fyzikální charakteristiky, popis odezvy s názornou ukázkou na registrovanou událost a určení limitujících aspektů použití detekčního řetězce jsou popsány ve čtvrté kapitole.

V poslední kapitole je obsažen čtvrtý bod zadání, ve které je popsáno použití vybraného řešení během experimentu s lithiovou terčovou stanicí kde slouží detekční řetězec jako terciální kontrola neutronového pole, a použití při expozici s beryliovou stanicí, kde detekční řetězec zastává funkci sekundární kontroly.

Detekční řetězec se během testovacího provozu osvědčil, a bylo shledáno, že splňuje dané potřeby. Bude nadále používán při experimentech s neutronovými zdroji a data budou přínosem. Naměřená data se stávají ještě důležitějšími, pokud by se během těchto provozů vyskytly neočekávané problémy a data by mohla přispět k vysvětlení neočekávaných událostí.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Detekce a spektrometrie ionizujícího záření. *Astro Nukl Fyzika* [online]. Ostrava: AstroNuklFyzika, 2017 [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm>
- [2] GERNDT, Josef a Petr PRŮŠA. *Detektory ionizujícího záření. 2., přeprac. vyd.* V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04710-1.
- [3] MUSÍLEK, Ladislav. *Dozimetrie neutronů*. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-010-1750-8.
- [4] MUSÍLEK, Ladislav. *Dozimetrie ionizujícího záření: (integrující metody)*. Praha: České vysoké učení technické, 1992.
- [5] ŠEDA, Josef. *Dozimetrie ionizujícího záření: vysokoškolská učebnice*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1983.
- [6] *USB HV Power Supply DT5471N* [online]. Italy: CAEN S.p.A., 2015 [cit. 2017-04-19 04 19]. Dostupné z: <http://www.caen.it/csite/CaenProd.jsp?parent=57&idmod=910>
- [7] *LEMO FFA.0S.250.CLAC44* [online]. Ostrava: TME Czech Republic, 2016 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/details/ffa.0s.250.clac44/konektory-lemo/lemo/>
- [8] *UM2580 - DPP-PSD User Manual* [online]. Italy: CAEN S.p.A., 2016 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://www.caen.it/jsp/Template2/LibrarySearchResults.jsp?browse=n&keywords=UM2580>
- [9] *DT5751* [online]. Italy: CAEN S.p.A, 2015 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://www.caen.it/csite/CaenProd.jsp?parent=14&idmod=632#>
- [10] *EJ-410* [online]. Holland: Scionix Holland, 2017 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://scionix.nl/neutron-detectors/>
- [11] RODÁK, Martin. *Zapojení a řízení neutronového zdroje NG*. Plzeň, 2015. Bakalářská práce. FEL ZČU. Vedoucí práce Ing. Petr Preuss, CSc.
- [12] *Mitov Software* [online]. USA: Mitov Software, 1996 [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: <http://www.mitov.com/products/plotlab#overview>