

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN
PRAGUE

Faculty of Nuclear Sciences and Physical
Engineering

Department of Physics



Research thesis

**Measurements of light yield of ZnO
based scintillators**

Michal Kocan

Supervisor: RNDr. Petr Chaloupka, Ph.D.

Prague, 2016

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

Fakulta Jaderná a Fyzikálně Inženýrská

Katedra Fyziky



Výzkumný úkol

Měření světelné výtěžnosti scintilátorů
na bázi ZnO

Michal Kocan

Vedoucí práce: RNDr. Petr Chaloupka, Ph.D.

Praha, 2016

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svůj výzkumný úkol vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, software, atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 23.6.2016

.....
Michal Kocan

Title:

Measurements of light yeild of ZnO based scintillators

Author: Michal Kocan

Specialization: Experimental nuclear physics

Sort of project: Research thesis

Supervisor: RNDr. Petr Chaloupka, Ph.D.

Abstract: This thesis deals with principles of producing light and its characteristics in scintillators based on the type of the scintillator. In next part are describe detectors which are using in detection of the scintillator's light. And also is describe electronics for processing the signal from detector. In next section is comparison and description of methods which are using in light yield measurements. At the end is present my own work.

Key words: scintillator, photon, detectors of ionizing radiation, methods of measuring

Název práce:

Měření světelné výtěžnosti scintilátorů na bázi ZnO

Autor: Michal Kocan

Zaměření: Experimentální jaderná a částicová fyzika

Typ práce: Výzkumný úkol

Vedoucí práce: RNDr. Petr Chaloupka, Ph.D.

Abstrakt: Tato práce se zabývá principy tvoření světla a jeho vlastností v závislosti na typu scintilátoru. Dále jsou popsány detektory, které se používají k detekci tohoto světla a vyčítací elektronika. V práci jsou dále vysvětleny různé metody a proces používané při měření světelné výtěžnosti scintilátorů. Na závěr je ukázána vlastní práce při přípravě na měření světelné výtěžnosti scintilátorů.

Klíčová slova: scintilátor, foton, detektory ionizujícího záření, metody měření

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat RNDr. Petru Chaloupkovi, Ph.D. za vedení mého výzkumného úkolu.

Obsah

1	Scintilátory	12
1.1	Anorganické scintilátory	12
1.1.1	Produkce světla v anorganických scintilátorech . . .	13
1.2	Organické scintilátory	15
1.2.1	Produkce světla v organických scintilátorech	15
2	Detektory fotonů a jejich vyčítání	17
2.1	Detektory	18
2.1.1	Fotonásobič	18
2.1.2	Fotodioda	19
2.1.3	Křemíkový fotonásobič	21
2.2	Vyčítací elektronika	22
3	Metody měření světelné výtěžnosti scintilátorů	25
3.1	Měření fotonásobičem	25
3.2	Měření (lavinovou-)fotodiodou	30
3.3	Měření křemíkovými fotonásobičem	31
3.4	Naše měření	32
4	Závěr	36

Seznam obrázků

1.1	Závislost světelného výtěžku (vlevo) a rozpadového času (vpravo) v závislosti na teplotě pro čistý krystal CsI. [1]	14
1.2	Vytváření scintilace v anorganických scintilátorech. [2]	14
1.3	Vytváření scintilace v organických scintilátorech. [2]	16
2.1	Stavba a princip detekce fotonásobiče. [1]	18
2.2	Různé tvary dynod používané ve fotonásobičích. [1]	19
2.3	Závislost kvantové efektivity fotonásobiče na vlnové délce fotonů. Při použití křemenného skla, křivka označena písmenem Q, je možné měřit i krátké vlnové délky. [3]	20
2.4	Lavinová fotodioda. [4]	21
2.5	Vlevo je fotka křemíkového detektoru. Vpravo je znázorněn obvod křemíkového detektoru. [4]	22
2.6	Zjednodušené schéma nábojově citlivého předzesilovače. [5]	23
2.7	CR derivace. [6]	24
2.8	RC integrace [6]	24
2.9	CR-RC tvarování signálu. [6]	24
3.1	Spektrum dvou scintilátorů pro použití porovnávací metody. [7]	27
3.2	Single-electron spektrum změřené fotonásobičem fitované exponenciálou a dvěma Gaussovými funkcemi. Křivka 1 odpovídá námi hledané odezvě jednoho elektronu. Exponenciála odpovídá pozadí a křivka 3 je odezva dvou elektronů. [8]	28
3.3	(a) Absorbovaný (1), odražený (2) a prošlý (3) foton na fotokatodě. (b) Přímo detekovaný (1), zpět odražený (2) a uvězněný (3) foton. (c) Vícenásobné odražení uvnitř krycího skla nebo fotokatody. [9]	29

3.4	Ukázka možnosti reflektoru pro (a) lavinové fotodiody, (b) fotodiody a (c) fotonásobiče. [8]	31
3.5	Naměřené spektrum jednotlivých fotonů a spektrum Cesia křemíkovým fotonásobičem. [10]	32
3.6	Diagram základní sady C12332-01 pro měření se silikonovými fotonásobiči od firmy Hamamatsu. [11]	33
3.7	Signál z silikonového fotonásobiče pozorovaný osciloskopem.	34
3.8	Námi sestavená měřicí aparatura se silikonovým fotonásobičem. Horní strana teflonového krytu se scintilátorem je při měření překryta teflonovou páskou.	35

Kapitola 1

Scintilátory

Scintilátor je materiál, který při průchodu ionizujícího záření, produkuje světlo. Scintilátor je první pevný materiál, který byl použit jako detektor částic. Použit byl roku 1910 Ruthfordem jako detektor alfa částic. [12] Detekce scintilačního světla byla zpočátku prováděna pouze lidským okem, a proto se jednalo o velmi nepřesnou metodu. Změna nastala vynalezením fotonásobiče, který umožňuje mnohonásobné zesílení signálu. Scintilátory obecně dělíme na organické a anorganické. Jednotlivé typy se liší tvorbou scintilačního světla, a proto se liší v hlavních charakteristikách scintilátorů. Mezi ně patří: scintilační efektivita, světelný výtěžek, emisní spektrum a rozpadový čas vyzařovaného světla. [1] Scintilační efektivita je definována jako celková energie vyzařených fotonů ku deponované energii ve scintilátoru. Světelný výtěžek je udáván počtem vytvořených fotonů scintilátorem na 1 MeV deponované energie. Vyzařování scintilačního světla má rychlý náběh, který je následován exponenciálním útlumem po dobu rozpadového času. K popsání exponenciálního útlumu je často potřeba použít více rozpadových časů. Tyto charakteristiky závisí nejen na zvoleném scintilátoru, ale také na teplotě nebo množství uložené energie. I když scintilátory v porovnání s polovodičovými detektory mají horší energetické rozlišení, jejich výhodou je možnost sestavit detektor o libovolném tvaru a velkých rozměrů za přijatelnou cenu.

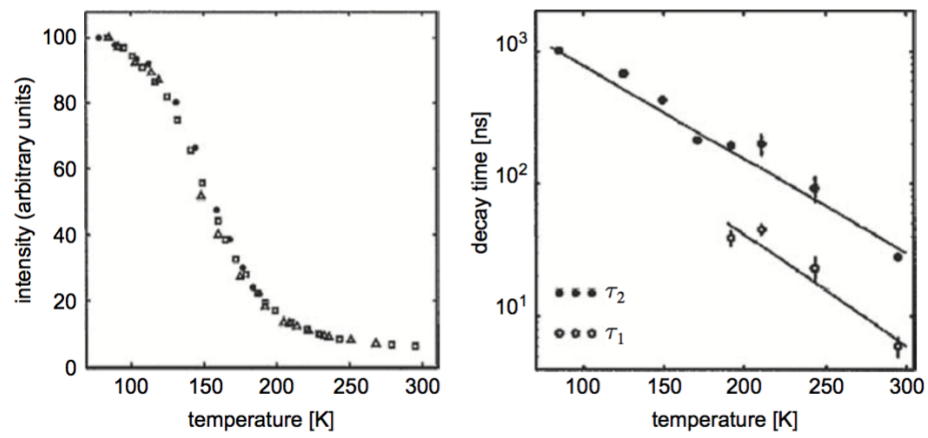
1.1 Anorganické scintilátory

Anorganické scintilátory v porovnání s organickými produkují silný světelný výtěžek s lineárnější odezvou na množství uložené energie. Nevýhodou

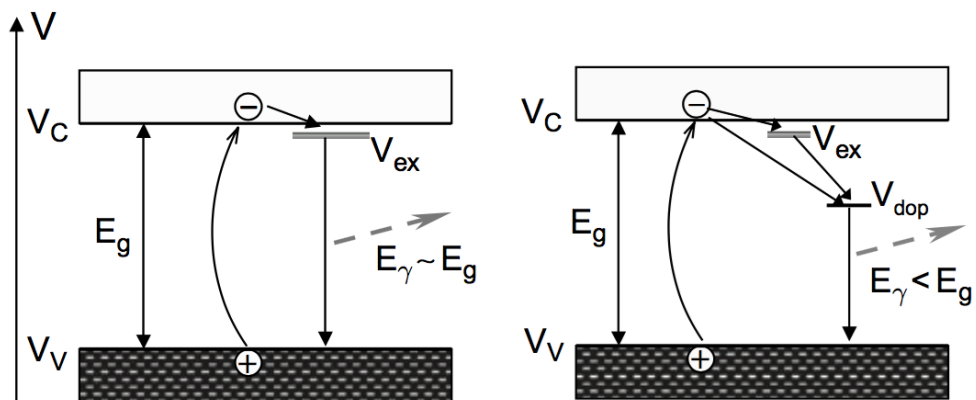
je delší rozpadový čas, než-li u organických scintilátorů. Anorganické scintilátory mají relativně vysokou hustotu a velké atomové číslo. To z nich dělá vhodné detektory gama záření. [1] Nejpoužívanějšími anorganickými scintilátory jsou NaI(Tl), CsI(Na) nebo CsI(Tl). Zajímavými anorganickými scintilátory pro použití ve vysokoenergetické fyzice mohou být scintilátory z nanočástic ZnO, které produkují světlo o vlnové délce okolo 390 nm a rozpadový čas se pohybuje v řádu nanosekund.

1.1.1 Produkce světla v anorganických scintilátorech

Produkce světla anorganických scintilátorů je závislá na krystalické struktuře materiálu. Při průchodu ionizujícího záření dochází k excitaci valenčních elektronů scintilátoru do vodivostního pásu. Vodivostní a valenční pás je oddělen zakázaným pásem, kde se nemůže elektron vyskytovat. Šířka pásu se pohybuje v rozmezí 3 až 10 eV. Excitovaný elektron může zrekombinovat s dírou ve valenčním páse nebo vytvořit vázaný stav s dírou zvaný exciton. Excitonová hladina je lehce pod spodní hladinou valenčního pásu. Excitony mohou krystalem cestovat a následně deexcitují srážkou s fononem nebo dojde k rekombinaci s dírou za vyzáření fotonu. [1] Pravděpodobnost vyzáření fotonů s vzrůstající teplotou klesá. Tato závislost pro čistý krystal CsI je ukázána na obrázku 1.1. Na obrázku je také zobrazena závislost rozpadového času na teplotě. Ten s klesající teplotou roste. [1] K vylepšení světelného výtěžku při pokojových teplotách se přidává do krystalové mřížky anorganického scintilátoru příměs. Energetické hladiny příměsi jsou mezi valenčním a vodivostním pásem scintilátoru. Nyní excitony, ale také elektrony ve vodivostním páse mohou přejít na energetickou hladinu příměsi, ze které při deexcitaci elektronu může být vyzářen foton. [1] Na obrázku 1.2 je znázorněna produkce fotonů jak pro čisté krystaly, tak i s příměsí.



Obrázek 1.1: Závislost světelného výtěžku (vlevo) a rozpadového času (vpravo) v závislosti na teplotě pro čistý krystal CsI. [1]



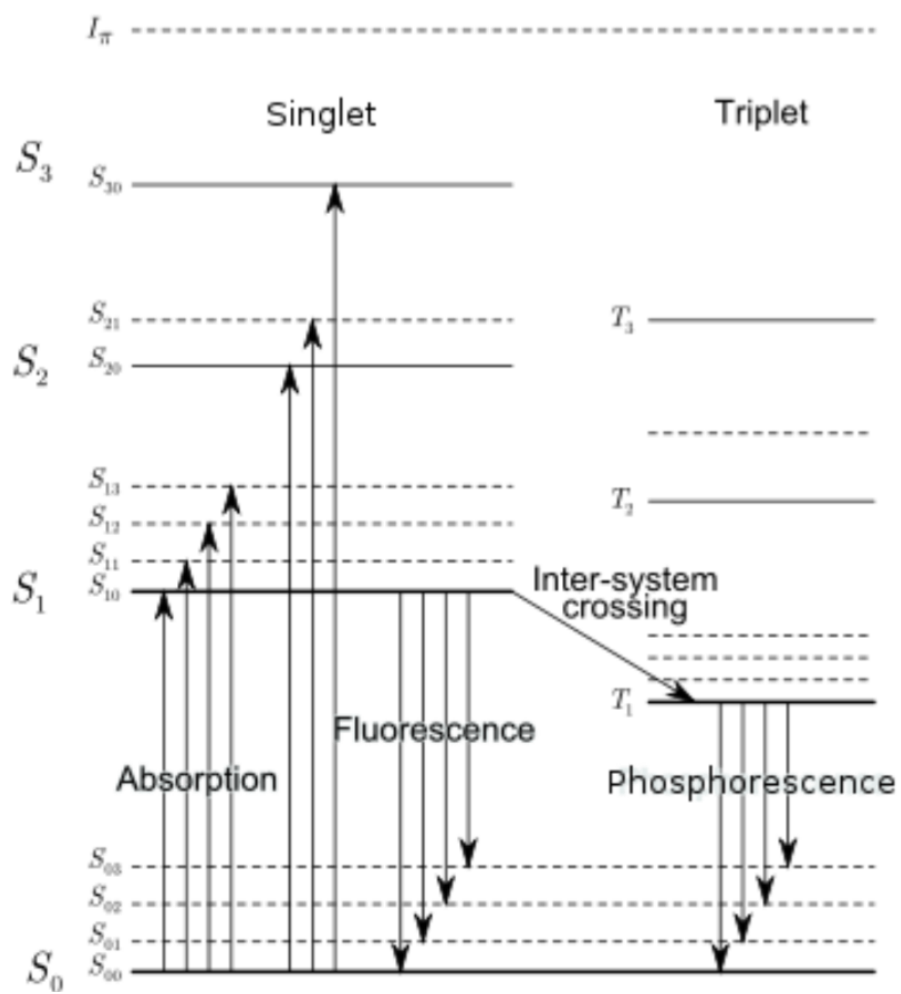
Obrázek 1.2: Vytváření scintilace v anorganických scintilátorech. [2]

1.2 Organické scintilátory

Organické scintilátory mohou být ve formě polymerovaného plastu, kapaliny nebo krystalů. Organické scintilátory se obvykle skládají ze dvou nebo více složek. Mezi nejpoužívanější organické scintilátory patří Anthracene nebo 3HF. Organické scintilátory produkují menší světelný výtěžek, ale v mnohem kratším čase než anorganické. Nejlepší organický scintilátor Anthracene, vzhledem k efektivitě přeměny energie na světlo, dosahuje pouze třetinové efektivity anorganického NaI(Tl). [12] Světelný výtěžek organických scintilátorů je především pro velké deponované energie nelineární. Organické scintilátory jsou vhodné, díky obsahu vodíku, k detekci neutronů.

1.2.1 Produkce světla v organických scintilátorech

Při průchodu ionizující záření scintilátorem dochází k excitaci molekuly do vyšších energetických stavů. Jednotlivé hladiny jsou dále děleny na jednotlivé vibrační stavy. K excitaci do první hladiny je zapotřebí kolem 3 až 4 eV. [2] Je-li molekula excitovaná do vyššího stavu než-li je první excitovaný stav, přechází vnitřními procesy na první excitovanou hladinu. Z té pak dochází k deexcitaci za vyzáření fotonů. Deexcitace může probíhat do všech vibračních stavů základní hladiny. Z singletového excitovaného stavu může dojít k přechodu do tripletového stavu. Ten se vyznačuje delší dobou života a menší energií mezi základní a první excitovanou hladinou. Vyzářené světlo ze singletového stavu nazýváme fluorescencí a z tripletového, které je oproti fluorescenci zpožděné, fosforescencí. Fosforescence má oproti fluorescenci větší vlnovou délku. Produkce světla v organických scintilátorech je znázorněna na obrázku 1.3. Takto vzniklé světlo má ale moc krátkou vlnovou délku. Aby vlnová délka vyzařovaného světla byla blízko maximální sensitivity detektorů (400 nm), přidává se do původního materiálu fluorescenční činidlo. [1] To funguje jako posunovač vlnové délky. Excitace původní látky je pomocí nezářivého procesu převedena na činidlo, které pak vyzáří světlo o větší vlnové délce. Pokud i toto světlo stále nespĺňuje požadované vlastnosti, je možné do směsi přidat další látku, která absorbuje vyzářené světlo a následně vyzáří s novou vlnovou délkou.

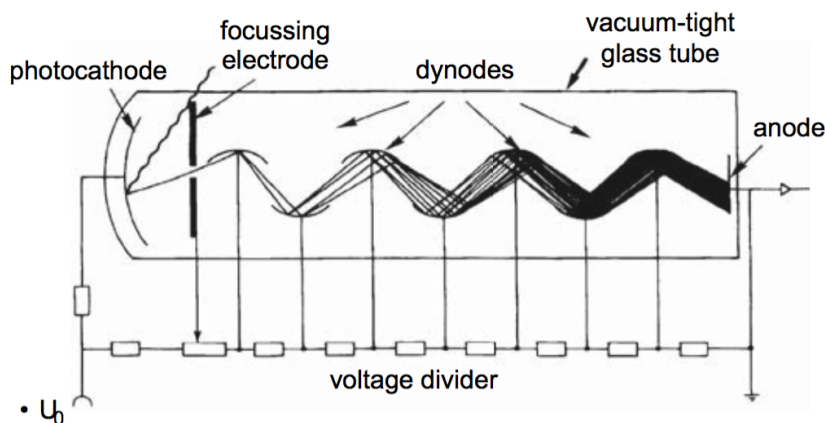


Obrázek 1.3: Vytváření scintilace v organických scintilátorech. [2]

Kapitola 2

Detektory fotonů a jejich vyčítání

K detekci fotonů se nejčastěji používají fotonásobiče, fotodiody nebo lavinové fotodiody. K detekci se ale také používají tzv. křemíkové fotonásobiče, které byly v poslední době vylepšeny, a tak jsou vhodné k přesným měřením počtu fotonů. Detekcí fotonů dochází ke generování elektrického signálu, který je zpracován předzesilovačem umístěným co nejbližší k detektoru. Signál z předzesilovače je veden do zesilovače, kde je signál tvarován a lineárně zesílen. Tento signál je pak veden do multikanálového analyzátoru, kde je zpracován a odeslán do počítači. V počítači pomocí softwaru dojde k vytvoření spektra, které je následně možné zpracovat. Do obvodu můžeme připojit i další zařízení jako je rychlý zesilovač a diskriminátor. Signál z předzesilovače je veden také do rychlého zesilovače, kde je signál velmi rychle zesílen a poslán do diskriminátoru, který vyšle signál do multikanálového analyzátoru, pokud signál z rychlého zesilovače je větší než je nastavená hladina na diskriminátoru. Multikanálový analyzátor tak bude zaznamenávat pouze signály, které nás zajímají a nebude tak zahlcen pozadím a slabými signály, které nepotřebujeme detekovat.



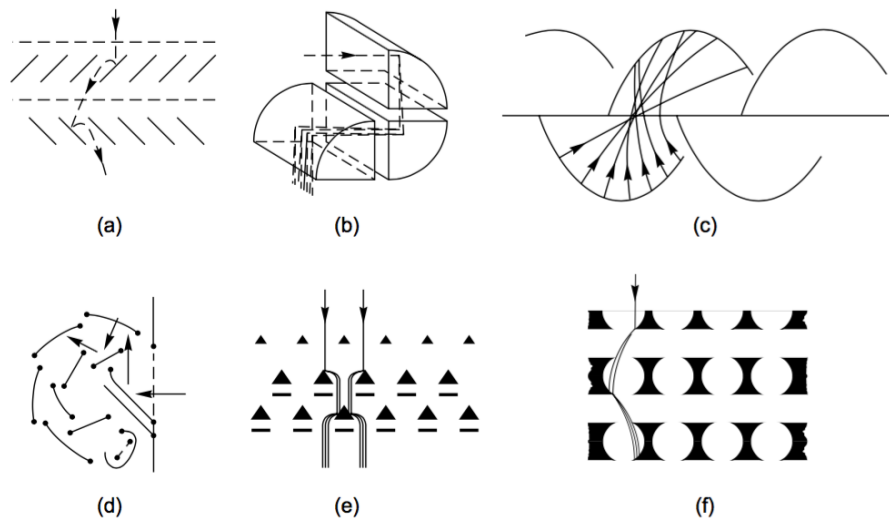
Obrázek 2.1: Stavba a princip detekce fotonásobiče. [1]

2.1 Detektory

2.1.1 Fotonásobič

Fotonásobič je nejčastějším zařízením k detekci fotonů. Fotonásobič je především tvořen fotokatodou, dynodami a anodou umístěnými v od-vzdušněné skleněné trubici. Na jednotlivé části je pak pomocí odporového děliče přivedeno napětí. Fotonásobič je často umísťován do kovového obalu, kvůli ochraně před magnetickým polem, protože fotonásobič je na něj citlivý. Stavba a princip detekce je znázorněn na obrázku 2.1. Při dopadu fotonu na fotokatodu fotonásobiče může dojít k fotoelektrickému jevu. Vyražený elektron, zvaný fotoelektron, je následně usměrněn na 1. dynodu. Zde dochází k emisi sekundárních elektronů. Ty jsou rozdílným napětím na 1. a 2. dynodě usměrněny na 2. dynodu. Zde opět dochází k emisi sekundárních elektronů. Tento proces se opakuje na dalších dynodách až jsou elektrony přivedeny na anodě odkud je signál veden ven z fotonásobiče. Dynody mohou být různého tvaru, jak je znázorněno na obrázku 2.2.

Mezi důležité parametry fotonásobiče patří kvantová efektivita, která je definována jako poměr dopadlých fotonů ku vytvořeným fotoelektronům. Kvantová efektivita je závislá na vlnové délce fotonů. U většiny fotonásobičů je největší kvantová účinnost pro fotony s vlnovou délkou okolo 400 nm. Na obrázku 2.3 je znázorněna kvantová efektivita v závislosti na vlnové

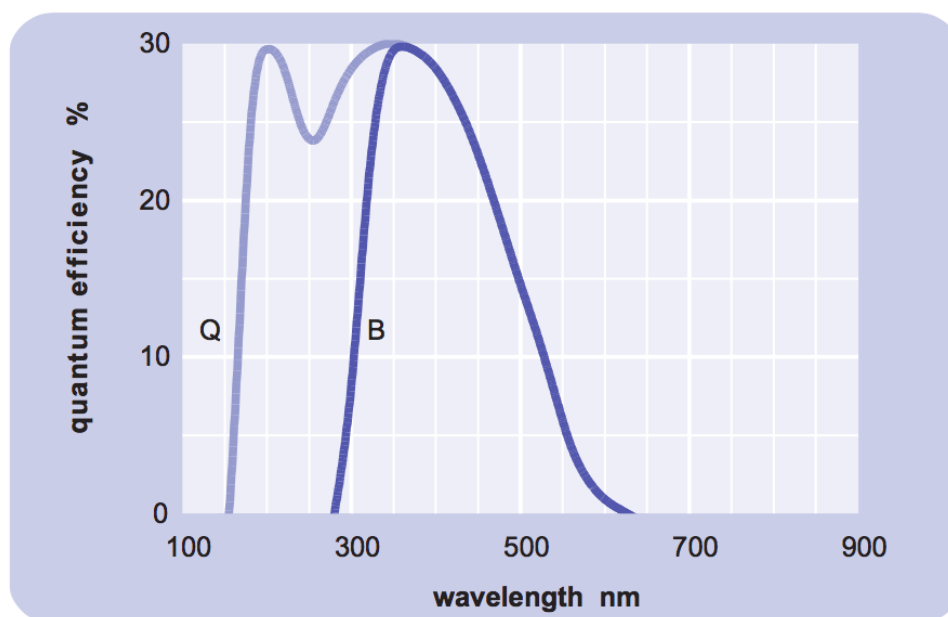


Obrázek 2.2: Různé tvary dynod používané ve fotonásobičích. [1]

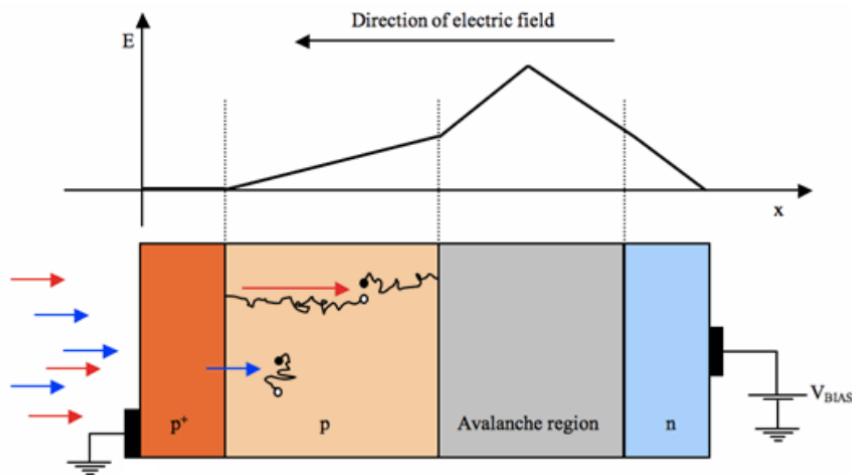
délce fotonásobiče (9266B - ET Enterprises), který budeme používat při našich měření. Při měření kratších vlnových délek je potřeba použít jako vstupní ochranné sklo křemenné, které je pro tyto fotony transparentní. Toto je také znázorněno na obrázku 2.3

2.1.2 Fotodioda

Fotodioda je polovodičová součástka využívající PN přechod. Přidáním příměsi do polovodiče můžeme zvýšit počet volných elektronů, označováno písmenem N, nebo zvýšit počet děr, označováno písmenem P. Fotodioda se skládá z tenké vysoce dopovaných vrstev P+ a N+. Mezi těmito vrstvami je 200-500 μm silná mírně dopovaná vrstva N zvaná I. Navrchu je dále vrstva SiO_2 . Tato dioda je tak označována jako PIN fotodioda. [1] Při detekci fotonu pronikne do I vrstvy, na které je přivedeno napětí a vytvoří pár elektron-díra. Kvantová efektivita fotodiod je v rozmezí 400 nm až 800 nm téměř konstantní a pohybuje se kolem 80 %. V případě lavinové fotodiody je mezi vysoce dopovanou vrstvou P+ a mírně dopovanou vrstvou N přidána vrstva P. Při průchodu fotonu je v P vrstvě vytvořen pár elektron-díra. Elektron je slabým polem usměrněn k PN přechodu, kde je velmi silné elektrické pole. Silné pole elektron urychlí natolik, že ionizací



Obrázek 2.3: Závislost kvantové efektivity fotonásobiče na vlnové délce fotonů. Při použití křemenného skla, křivka označena písmenem Q, je možné měřit i krátké vlnové délky. [3]

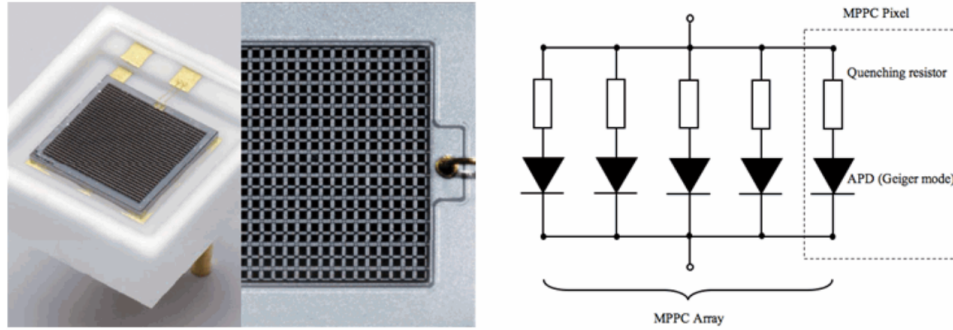


Obrázek 2.4: Lavinová fotodioda. [4]

vytvoří nový pár elektron-díra a tak dále. Lavinová dioda může dosahovat až tisícového zesílení. Kvantová účinnost lavinových fotodiód je podobná jako u klasických fotodiód. Lavinová fotodioda je znázorněna na obrázku 2.4.

2.1.3 Křemíkový fotonásobič

Křemíkové fotonásobiče jsou díky vylepšení v posledních letech zajímavou volbou pro přesnou detekci fotonů. Mezi hlavní výhody oproti ostatním detektorům je nízké pracovní napětí, odolnost proti magnetickému poli, malé rozměry a možnost vytvořit libovolný tvar detektoru. Křemíkový fotonásobič se skládá z velkého množství lavinových fotodiód, které jsou v Geigerově režimu a hasících odporů. Jedna lavinová dioda a rezistor tvoří pixel. Při Geigerově režimu je napětí na fotodiodě lehce nad průrazným napětím. To umožňuje detekci jediného fotonu. Při Geigerově režimu dochází k velkému zesílení, 10^5 až 10^6 v závislosti na přepětí. [4] Nevýhodou tohoto režimu je, že není možné určit počet absorbovaných fotonů v jednom pixelu, protože signál z je stejný pro jeden nebo více fotonů. Schéma zapojení křemíkového detektoru je znázorněna na obrázku 2.5. Podobně jako u ostatních detektorů definujeme pro silikonové fotonásobiče efektivitu detekce fotonu PDE . Pro tuto efektivitu platí vztah (2.1), kde QE



Obrázek 2.5: Vlevo je fotka křemíkového detektoru. Vpravo je znázorněn obvod křemíkového detektoru. [4]

je kvantová efektivita, GF je výplňový nebo geometrický faktor a P je pravděpodobnost toho, že dopadlý foton vytvoří lavinu. [10]

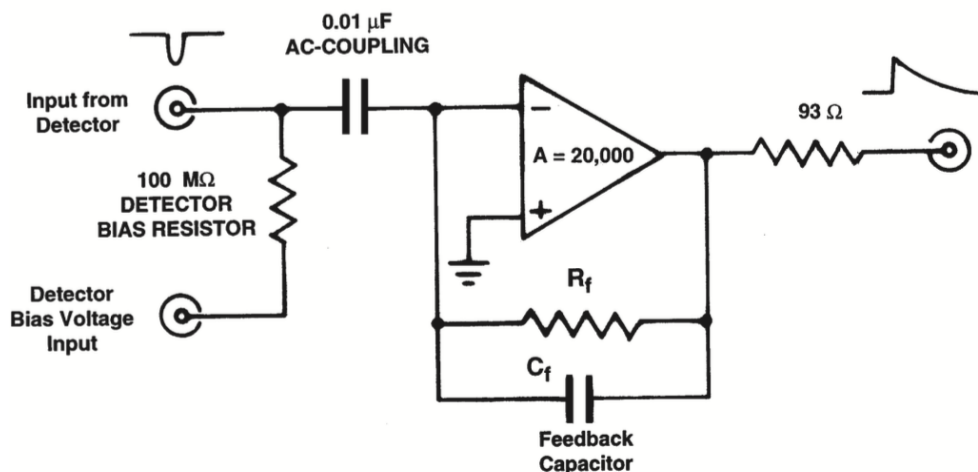
$$PDE = QE \cdot GF \cdot P \quad (2.1)$$

Mezi nežádoucí jevy u silikonových fotonásobičů patří přeslechy (crosstalk), následné pulzy (afterpulsing) a počet temných pulzů (dark count). Přeslech je zapálení vedlejší pixelu, na který foton nedopadl. Následné pulzy vznikají je vytvoření sekundární laviny při obnovování pixelu a temné pulzy jsou vyvolány termálními fluktuacemi. Tyto jevy jsou závislé jak na teplotě, tak na přepětí. [4]

2.2 Vyčítací elektronika

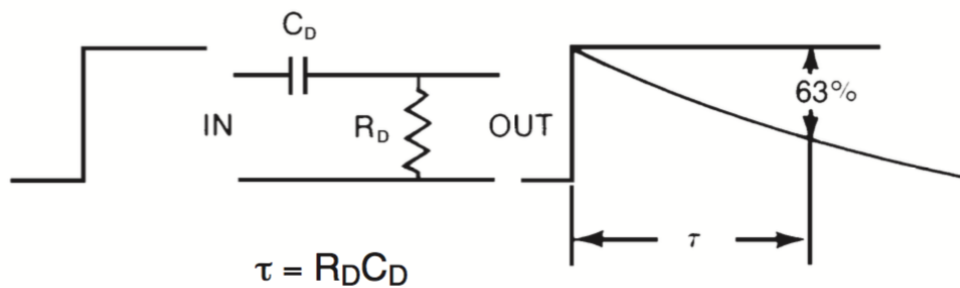
Hlavní funkcí předzesilovače je získání signálu z detektoru bez zhoršení signálu. Z tohoto důvodu je vhodné předzesilovač umístit co nejbližší k detektoru. Při měřeních se nejčastěji používají 3 základní typy předzesilovačů, proudově, napěťově a nábojově citlivý. Ve spektroskopii se nejčastěji používá nábojově citlivý. Velikost napěťového signálu V a rozpadový čas signálu τ jsou určeny vztahy 2.6, kde Q je náboj generovaný detektorem, C je kapacita kondenzátoru a R odpor rezistoru použitých v předzesilovači. [5] Schéma nábojově citlivého předzesilovače je zobrazeno na obrázku 2.6.

$$V = \frac{Q}{C} \quad \tau = RC \quad (2.2)$$

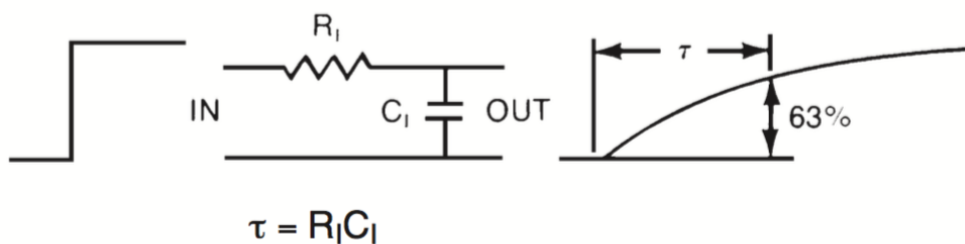


Obrázek 2.6: Zjednodušené schéma nábojově citlivého předzesilovače. [5]

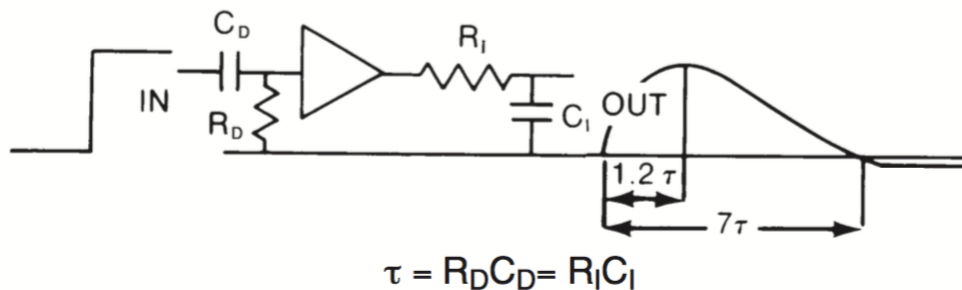
Signál z předzesilovače je veden do zesilovače, který již může být umístěn dále od detektoru. Ve spektroskopii se používají lineární zesilovače. Tyto zesilovače zesilují signál z pár milivoltů do rozmezí 0,1 - 10 V. [6] Zesilovače jsou vybaveny tak, aby výsledné spektrum mělo co nejlepší energetické rozlišení. Nejjednodušší tvarování signálu je tzv. CR-RC. Signál z předzesilovače je přiveden na CR filtr, který zeslabí nízké frekvence, které obsahují šum. Tomuto procesu se říká CR derivace, i když s matematickou derivací nemá nic společného. Princip CR filtru je zobrazen na obrázku 2.7. Z CR filtru je signál veden na RC filtr, který zeslabí vysoké frekvence, které obsahují hodně šumu. Tomuto procesu se říká RC integrace, i když stejně jako předchozí RC derivace nemá nic společného s matematickou integrací. Princip RC filtru je zobrazen na obrázku 2.8. Výsledný efekt po tvarování CR-RC zesilovačem je zobrazeno na obrázku 2.9. Derivační a integrační čas $\tau = RC$ se nejčastěji volí stejný. Výsledný signál pak dosahuje maxima v čase $1,2\tau$ a celková délka pulzu je 7τ . [6]



Obrázek 2.7: CR derivace. [6]



Obrázek 2.8: RC integrace [6]



Obrázek 2.9: CR-RC tvarování signálu. [6]

Nahrazením jednoduchého RC integrátoru důmyslným aktivním integrátorem je možné získat semi-Gaussovský tvar, který dosahuje lepšího potlačení šumu. Zesilovače jsou také vybaveny systémy, které zajišťují, aby na konci signálu nedocházelo k podkmitu případně k nadkmitu.

Kapitola 3

Metody měření světelné výtěžnosti scintilátorů

Světelná výtěžnost patří mezi jednu z nejdůležitějších vlastností scintilátorů. Při známé světelné výtěžnosti na jednotku energie jsme pak při měření schopni určit množství deponované energie v aktivní vrstvě našeho detektoru. První práce se objevily v 80. letech 20. století, *Sakai (1987)* [13] a *Holl a spol (1988)* [14]. Další významnou prací pak byla práce *Moszyński a spol* [15] z roku 1997. Světelná výtěžnost je určena pomocí kvantové efektivity detektoru. Tato měření byla prováděna fotonásobiči a fotodiodami. Při určování světelné výtěžnosti se musely brát v potaz i další okolnosti, které budou popsány v této kapitole. K měření se nyní používají i křemíkové fotonásobiče.

3.1 Měření fotonásobičem

K změření světelné výtěžnosti fotonásobičem lze použít několik metod, ovšem k normálnímu měření se dnes používá metoda zvaná *Single-electron*, případně *porovnávací*. Možné metody jsou pak *pulzní*, anebo *metoda založená na měření vlastního rozlišení*. Tyto metody kromě porovnávací řadíme mezi přímé metody. V případě pulzní metody je měřena amplituda signálu na výstupu fotonásobiče. Světelná výtěžnost (T) v závislosti na amplitudě signálu (V) je vyjádřena vztahem (3.1). [16]

$$T = \frac{V \cdot \epsilon \cdot C}{S \cdot K \cdot E \cdot e} \quad (3.1)$$

Další potřebné parametry jsou výstupní kapacity fotonásobiče C , efektivní citlivost anody S , amplifikační faktor fotonásobiče K , energie gama záření E , náboj elektronu e a energie dopadajících fotonů ϵ . Chyba měření je pak určena chybami V, C, S a K . Chyba při měření světelné výtěžnosti touto metodou není větší než 6,5%. [16] Při metodě založené na vnitřním rozlišení je měřen počet fotoelektronů na první dynodě fotonásobiče. Pro počet fotoelektronů (N_{pe}), počet vytvořených elektronů fotokatodou z absorbovaných fotonů, pro daný scintilátor na 1 MeV gama záření platí vztah (3.2), kde R_p je vnitřní rozlišení fotonásobiče a E je energie gama záření. [16]

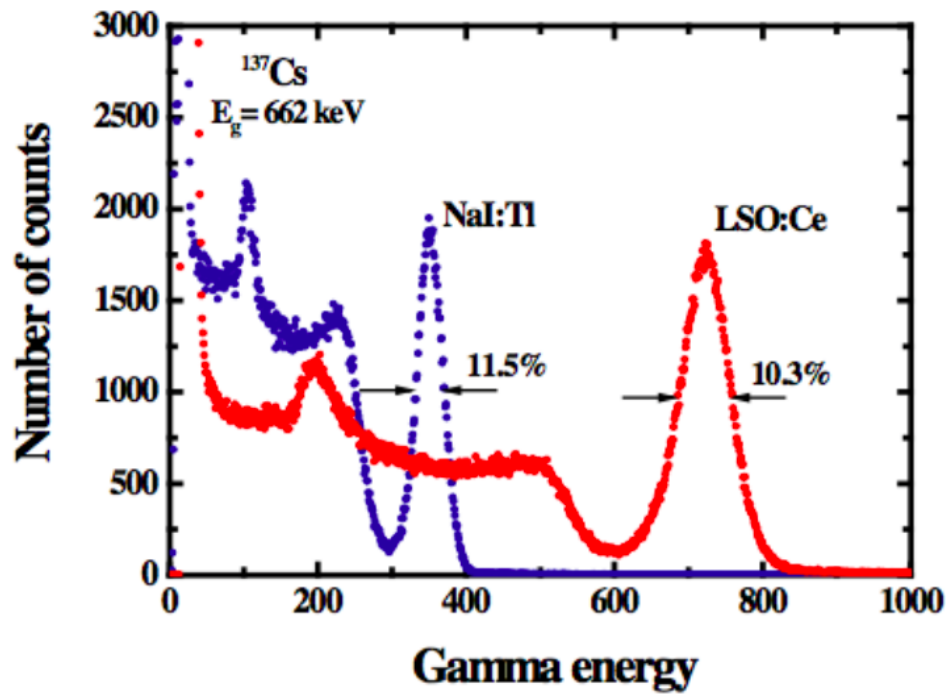
$$N_{pe} = \frac{5,544}{R_p^2 \cdot E} \quad (3.2)$$

Při porovnávací metodě je změřeno spektrum gama zářiče scintilátorem o známém počtu fotonů na jednotku energie. Při stejném nastavení je pak změřen scintilátor, u kterého chceme určit počet fotonů na jednotku energie. Názorné spektrum je zobrazeno na obrázku 3.1. Z následné pozice fotopíku vůči fotopíku známého scintilátoru určíme koeficient, kterým vynásobíme známý počet fotonů, a tak dostaneme počet fotonů na jednotku energie pro nový scintilátor. Tato metoda je výhodná mají-li scintilátory stejné vyzařované spektrum fotonů. Při rozdílném spektru musí být započítána rozdílná kvantová efektivita fotonásobiče pro různé vlnové délky. [16]

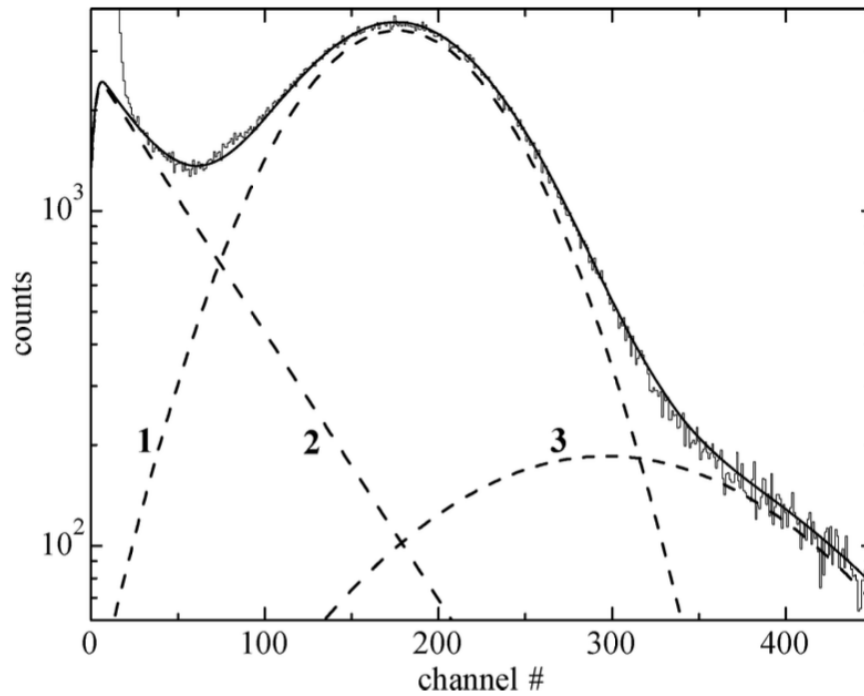
Při použití Single-electron metody je změřeno spektrum fotonásobiče v temné komoře. Toto spektrum je zobrazeno na obrázku 3.2.

Odpovídající kanál se určuje jako střední hodnota rozdělení odezvě jednoho elektronu. [8,16] Dříve se však používalo hodnota ve které rozdělení nabývalo maxima. [9,13,14] Při měření provedeného v *Advances in Yield Calibration of Scintillators* [8] by při použití původní metody došlo k podhodnocení množství fotonů o 13 %. Zároveň při použití střední hodnoty je určený počet fotonů v dobré shodě s počtem fotonů změřeného s diodami.

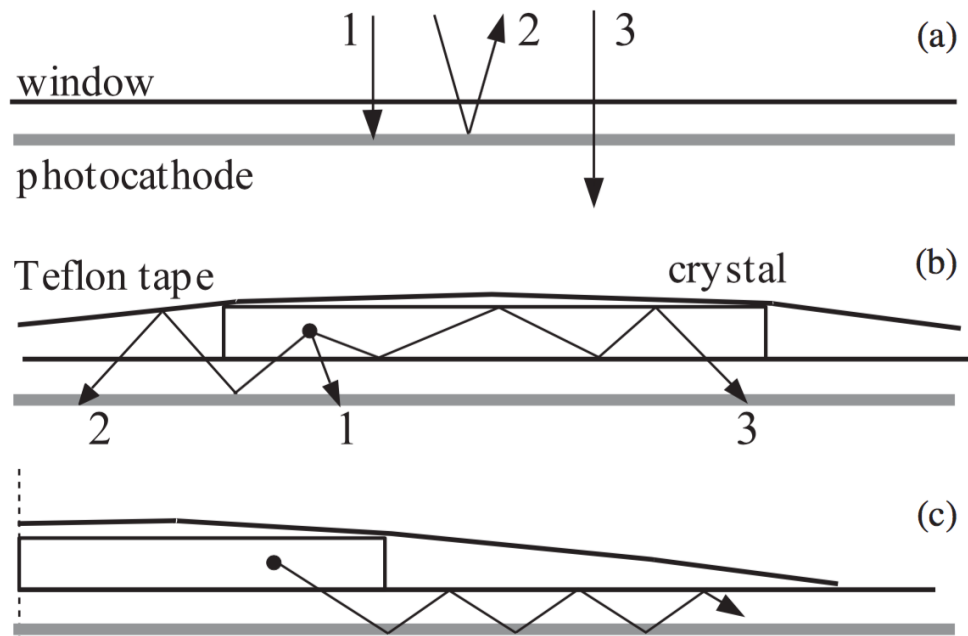
Při dopadu fotonu na fotokatodu fotonásobiče mohou nastat 3 možnosti, které jsou znázorněny na obrázku 3.3-(a). Při dopadu fotonu na fotokatodu může být absorbován, odražen nebo může projít bez detekce. Projde-li foton skrz fotokatodu nemůže být již znova detekován. To ale neplatí pro foton, který byl odražen. Umístíme-li na scintilátor a vstupní okno fotonásobiče reflektor, má tento foton znova možnost dopadnout na fotokatodu a být detekován. Tato situace je znázorněna na obrázku 3.3-



Obrázek 3.1: Spektrum dvou scintilátorů pro použití porovnávací metody.
[7]



Obrázek 3.2: Single-electron spektrum změřené fotonásobičem fitované exponenciálou a dvěma Gaussovými funkcemi. Křivka 1 odpovídá námi hledané odezvě jednoho elektronu. Exponenciála odpovídá pozadí a křivka 3 je odezva dvou elektronů. [8]



Obrázek 3.3: (a) Absorbovaný (1), odražený (2) a prošlý (3) foton na fotokatodě. (b) Přímo detekovaný (1), zpět odražený (2) a uvězněný (3) foton. (c) Vícenásobné odražení uvnitř krycího skla nebo fotokatody. [9]

(b). Nejčastěji jako reflektor se používá bílá teflonová páska, která při 1 mm tloušťce má koeficient odrazivosti 0,98. [8] Aby nedocházelo k uvěznění fotonů ve scintilátoru používá se optická pasta, která má podobný index lomu jako scintilátor a krycí sklo. Podobný index lomu způsobí, že ze scintilátoru se fotony dostanou téměř pod jakýmkoli úhlem. To způsobí, že fotony tak dopadají pod různými úhly na fotokatodu. Kvůli neznámé závislosti kvantové efektivity na úhlu dopadu fotonu, jelikož udávaná kvantová efektivita je měřená pro fotony dopadající kolmo na fotokatodu, je pro měření světelné výtěžnosti scintilátorů lepší nepoužít optickou pastu. [8]

Jelikož použití reflektoru dá fotonu více možností být absorbová fotokatodou dochází ke změně kvantové efektivity podle vztahu (3.3). [8]

$$QE_e = \frac{QE_{PMT}}{1 - R_s T_s(x) R_{PMT}} \quad (3.3)$$

Efektivní kvantová efektivita QE_e je tak určena z kvantové efektivity udávané výrobcem QE_{PMT} , reflektivitou scintilátoru R_s , efektivní transmisí scintilátoru $T_s(x)$ v závislosti na uražené vzdálenosti x a odrazivosti fotonásobiče R_{PMT} . Použitím dobrého reflektoru a malého vzorku scintilátoru, tak aby uražená vzdálenost ve scintilátoru x byla co nejmenší, můžeme předpokládat, že platí $R_s T_s(x) \approx 1$. [8] Reflektivitu fotonásobiče je možné změřit pomocí spektrofotometru a může dosahovat až 35 %. [8]

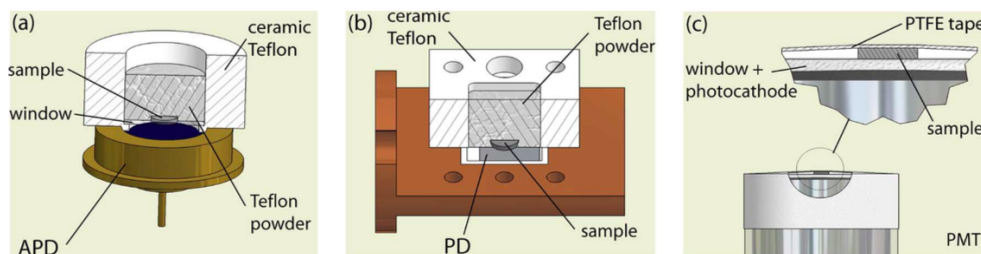
Ze změřeného počtu fotoelektronů Y_{phe} určíme absolutní světelný výtěžek Y_{ph} podle vztahu (3.4). [8]

$$Y_{ph} = \frac{Y_{phe}}{R_s^* T_s^*(x^*) QE_e} \quad (3.4)$$

Parametry R_s^* a $T_s^*(x^*)$ jsou podobné jako již definované R_s a $T_s(x)$, ale tyto parametry odpovídají reflektivitě scintilátoru a samoabsorbci než je foton poprvé odražen od fotokatody. [8]

3.2 Měření (lavinovou-)fotodiodou

Při měření pomocí fotodiod se stejně jako u měření fotonásobičem používá reflektor kolem scintilátoru a fotodiody. Kvůli malým rozměrům však není vhodné použití teflonové pásky jako u fotonásobiče. Různé možnosti jsou zobrazeny na obrázku 3.4. Zde je jako reflektor použit teflonový prášek, který je obklopen pouzdrem z optického teflonu.



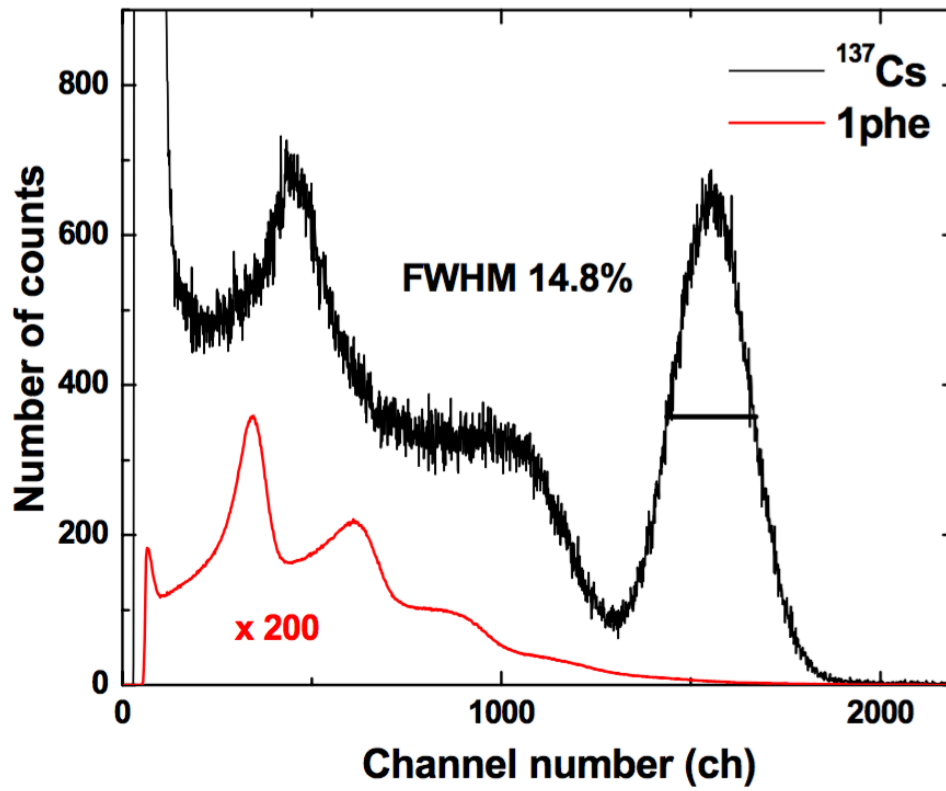
Obrázek 3.4: Ukázka možnosti reflektoru pro (a) lavinové fotodiody, (b) fotodiody a (c) fotonásobiče. [8]

Rozdíl je také v možnostech dopadajícího fotonu. Jelikož foton s vlnovou délkou menší než 800 nm nemůže projít fotodiadou, dochází tak buď k absorpci nebo odrazu. Proto kvantová efektivita fotodiody při použití reflektoru je 100 %. [9] Z tohoto důvodu je pak možné použití i optické pasty, takže by nemělo docházet k uvěznění fotonu ve scintilátoru. K určení množství fotonů se porovnává číslo kanálu píku plného pohlcení s číslem kanálu přímo detekovaného X-paprsku o známé energii. [8, 9] Jelikož k vytvoření jednoho páru elektron-díra je ve křemíku potřeba 3,67 eV [8], lze vypočítat množství vytvořených párů paprskem X. Z tohoto pak dopočteme počet párů vytvořených fotony ze scintilátoru. Z vypočteného počtu párů elektron-díra Y_{eh} určíme celkový počet vytvořených fotonů ve scintilátoru vztahem (3.5), kde R_r je odrazivost použitého reflektoru. [9]

$$Y_{ph} = \frac{Y_{eh}}{R_r} \quad (3.5)$$

3.3 Měření křemíkovými fotonásobičem

Stejně jako u fotodiody a klasických fotonásobičů je scintilátor obalen do reflektoru. Na rozdíl od klasických fotonásobičů se stejně jako u fotodiody používá optická pasta, která snižuje možnost zachycení fotonu ve scintilátoru. Celkový počet zapálených pixelů se určí podobně jako u fotonásobičů porovnáním pozice píku pro jeden zapálený pixel a píku plného pohlcení. Tato metoda je zobrazena na obrázku 3.5. Jelikož ale jednotlivé pixely křemíkového fotonásobiče poskytují informaci zda byly nebo nebyly zapáleny a ne o počtu absorbovaných fotonů, musíme počet zapálených



Obrázek 3.5: Naměřené spektrum jednotlivých fotonů a spektrum Cesia křemíkovým fotonásobičem. [10]

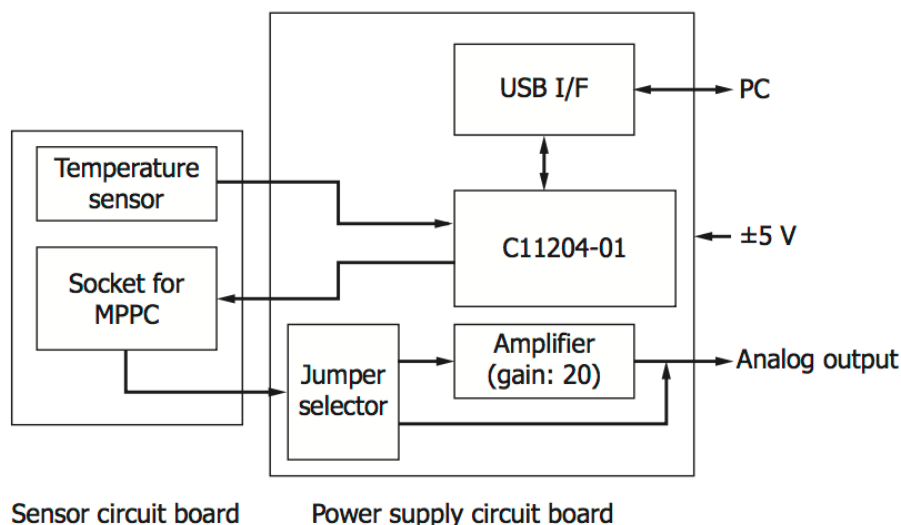
pixelů $N_{zapaleny}$ přepočítat podle vzorce (3.6). [17]

$$N_{zapaleny} = N_{celkem} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-N_{fotonu} \cdot PDE}{N_{celkem}}\right) \right] \quad (3.6)$$

Celkový počet fotonů N_{fotonu} tak určíme z celkového počtu pixelů N_{celkem} a z efektivity detekce fotonu PDE .

3.4 Naše měření

K našemu měření světelné výtěžnosti jsme se rozhodli pro měření jak klasickými, tak i silikonovými. K měření s klasickým fotonásobičem nám

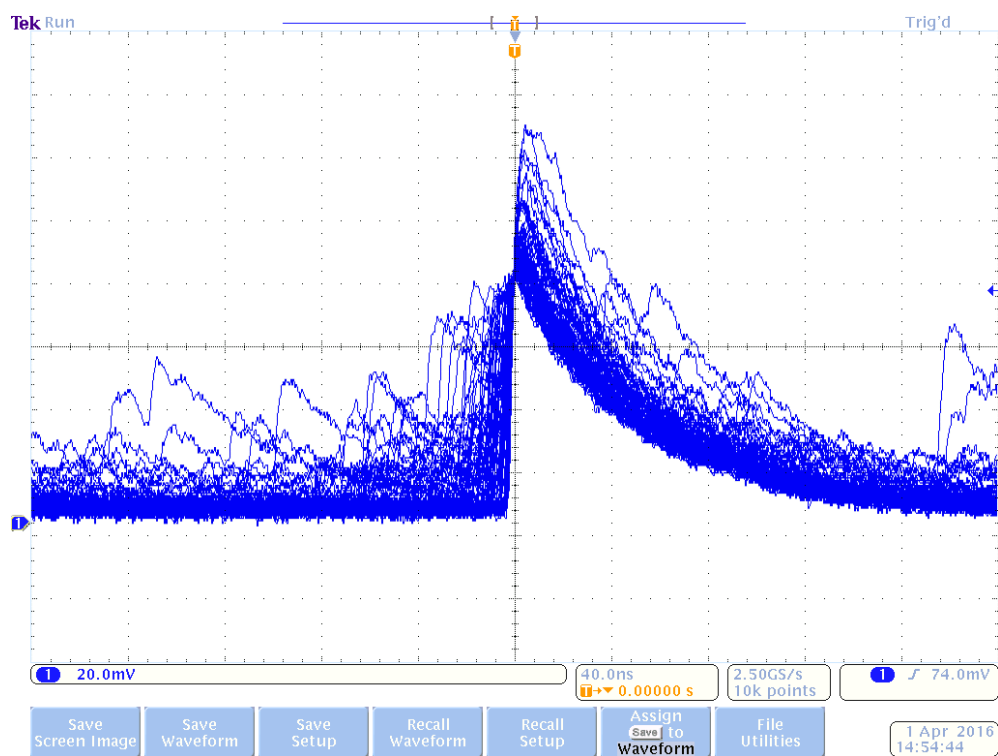


Obrázek 3.6: Diagram základní sady C12332-01 pro měření se silikonovými fotonásobiči od firmy Hamamatsu. [11]

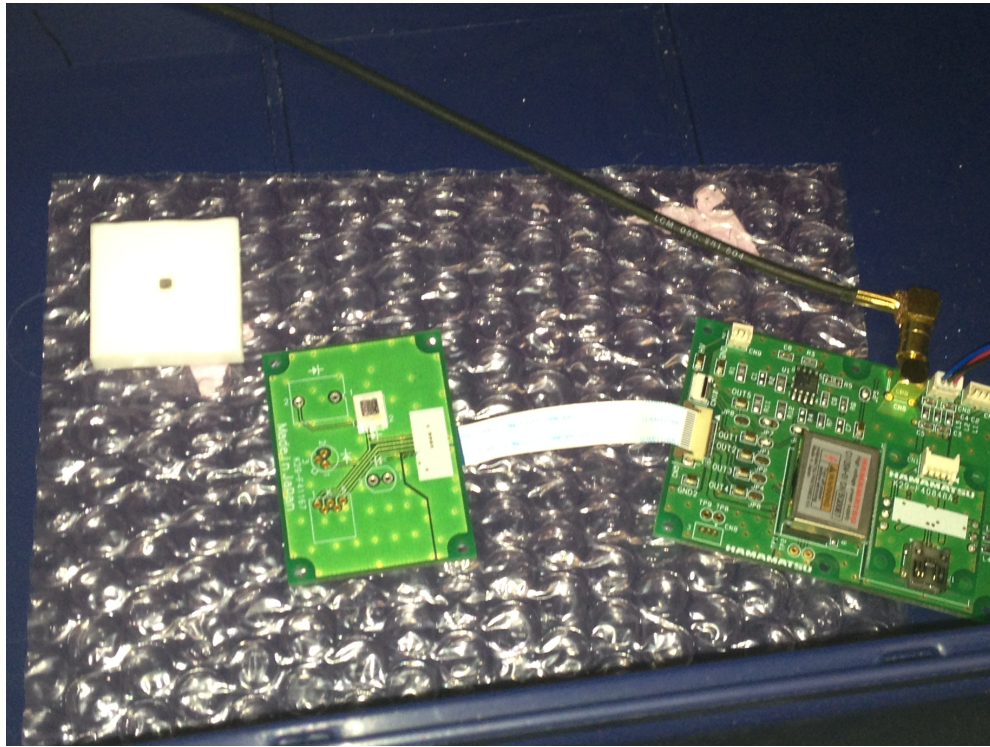
bohužel chyběl správný dělič napětí potřebný k lineárnímu měření. Proto jsme se soustředili na měření se silikonovými fotonásobiči.

K měření byl použit silikonový fotonásobič S13360-3050CS od firmy Hamamatsu, která pro silikonové fotonásobiče používá název MPPC (Multi-pixel photon counter). [18] Aktivní plocha je $3 \times 3 \text{ mm}^2$ s velikostí jednoho pixelu $50 \text{ }\mu\text{m}$. Aktivní plocha je usazena v keramickém pouzdro a krytá silikonovou pryskyřicí. Při doporučeném 3 V přepětí dosahuje efektivita detekce fotonu 40 % pro fotony o vlnové délce 450 nm. K napájení a zároveň i vyčítání Hamamatsu nabízí základní sadu C12332-01. [11] Diagram sady je zobrazen na obrázku 3.6. Sada se skládá ze dvou obvodových desek, které jsou propojené plochým kabelem. Do sensorové obvodové desky se může umístit různé typy silikonových fotonásobičů. K napájecí desce je přivedeno $\pm 5 \text{ V}$ a pomocí počítače USB kabelem se nastaví požadované napětí. Jelikož na sensorové obvodové desce je umístěn teplotní senzor, můžeme nastavit změnu napájecího napětí silikonového fotonásobiče udávaného výrobcem. Vzniklý signál je možné vést přes zesilovač, který je umístěn na napájecí obvodové desce. Výstupní signál, vedený přes zesilovač, je zobrazen na obrázku 3.7.

K měření se scintilátorem jsme také připravili kryt z optického teflonu. Krytů jsme vytvořili více typů, abychom mohli vyzkoušet, jaká varianta



Obrázek 3.7: Signál z silikonového fotonásobiče pozorovaný osciloskopem.



Obrázek 3.8: Námí sestavená měřicí aparatura se silikonovým fotonásobičem. Horní strana teflonového krytu se scintilátorem je při měření překryta teflonovou páskou.

bude nejlepší. Výsledná měřicí aparatura je zobrazena na obrázku 3.8. Při měření jsme byli schopni naměřit spektrum jednotlivých fotonů. Při použití scintilátoru jsme nebyli schopni spektrum naměřit, protože výstup z vyčítací desky byl ořezaný na 1,8 V. Tento problém se zatím nepodařilo vyřešit, a tak je nadále hledáno řešení.

Kapitola 4

Závěr

Scintilátory jsou jedny z nejstarších způsobů detekce ionizujícího záření. Scintilátory obecně dělíme na organické a anorganické, které se od sebe liší způsobem vytváření scintilačního světla. Organické jsou v porovnání s anorganickými mnohem rychlejší, ale produkují mnohem méně světla. Anorganické scintilátory mají lineárnější odezvu a nově vyvíjené anorganické scintilátory dosahují i rychlé odezvy. To z nich dělá dobré kandidáty na použití v detektorech.

K detekci fotonů se používají fotonásobiče, (lavinové-) fotodiody a silikonové fotonásobiče. Úkolem těchto detektorů je produkování měřitelného signálu i pro velmi malý počet fotonů. Signál z detektoru je pak zpracován předzesilovačem a znova zesílen zesilovačem. V zesilovači také dochází k tvarování signálu.

Chceme-li změřit světelný výtěžek scintilátorů máme na výběr několik možností podle zvoleného typu detektoru. Při použití fotonásobiče je nej-používanější metodou porovnání pozice signálu z jednoho fotonu s pozicí fotopíku. Stejnou metodu použijeme i pro silikonový fotonásobič. Při měření s fotodiodami porovnááme změřený signál se signálem, který jsme vytvořili paprskem X o známé energii. Abychom do detektoru dostali všechny vyprodukované fotony, balíme scintilátory do reflektoru.

Při svém měření jsem zatím nebyl moc úspěšný, ale myslím si, že v nejbližší době již budu schopen měřit světelný výtěžek scintilátorů.

Literatura

- [1] Claus Grupen and Boris Schwartz. *Particle detectors*. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Pr. (2008) 651 p, 2008.
- [2] Glenn F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement, 3rd ed.* John Wiley and Sons, New York, 2000.
- [3] 9266b series data sheet. *ET Enterprises*. [Online; cit. 23-Květen-2016].
- [4] Physics and operation of an mppc. *Hamamatsu*. [Online; cit. 23-Květen-2016].
- [5] Preamplifier introduction. *Ortec*. [Online; cit. 23-Květen-2016].
- [6] Introduction to amplifiers. *Ortec*. [Online; cit. 23-Květen-2016].
- [7] Akapong Phunpueok et al. Scintillation response of lso:ce and nai:tl single crystal scintillators. *Journal of Applied Sciences Research 9(12), Special*, pages 5970–5975, 2013.
- [8] J. T. M. de Haas and P. Dorenbos. Advances in yield calibration of scintillators. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 55(3):1086–1092, June 2008.
- [9] Measuring the absolute light yield of scintillators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 537(1–2):97 – 100, 2005. Proceedings of the 7th International Conference on Inorganic Scintillators and their Use in Scientific and Industrial Applications.

- [10] A. Nassalski, M. Moszynski, A. Syntfeld-Kazuch, T. Szczesniak, L. Swiderski, D. Wolski, T. Batsch, and J. Baszak. Multi pixel photon counters (mppc) as an alternative to apd in pet applications. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 57(3):1008–1014, June 2010.
- [11] Driver circuit for mppc c12332-01. *Hamamatsu*. [Online; cit. 23-Květen-2016].
- [12] N. Tsoulfanidis. *Measurement and Detection of Radiation*. McGraw-Hill series in nuclear engineering. Hemisphere Publishing Corporation, 1983.
- [13] E. Sakai. Recent measurements on scintillator-photodetector systems. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 34(1):418–422, Feb 1987.
- [14] I. Holl, E. Lorenz, and G. Mageras. A measurement of the light yield of common inorganic scintillators. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 35(1):105–109, Feb 1988.
- [15] M. Moszynski, M. Kapusta, M. Mayhugh, D. Wolski, and S. O. Flyckt. Absolute light output of scintillators. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 44(3):1052–1061, Jun 1997.
- [16] E Sysoeva, V Tarasov, and O Zelenskaya. Comparison of the methods for determination of scintillation light yield. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 486(1–2):67 – 73, 2002. Proceedings of the 6th International Conference on Inorganic Scintillators and their Use in Scientific and Industrial Applications.
- [17] D. Renker. Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 567(1):48 – 56, 2006.
- [18] Mppc (multi-pixel photon counter) s 13360 series. *Hamamatsu*. [Online; cit. 23-Květen-2016].
- [19] C. W. Fabjan and F. Gianotti. Calorimetry for particle physics. *Rev. Mod. Phys.*, 75:1243–1286, 2003.

- [20] P. Brůža, D. Pánek, V. Fidler, P. Benedikt, V. Čuba, T. Gbur, P. Boháček, and M. Nikl. Applications of a table-top time-resolved luminescence spectrometer with nanosecond soft x-ray pulse excitation. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 61(1):448–451, Feb 2014.
- [21] Lenka Procházková, Tomáš Gbur, Václav Čuba, Vítězslav Jarý, and Martin Nikl. Fabrication of highly efficient zno nanoscintillators. *Optical Materials*, 47:67 – 71, 2015.
- [22] Gennadiy M. Onyshchenko, Lyudmila L. Nagornaya, Valeriy G. Bondar, Yuriy Borodenko, Olga V. Zelenskaya, Evgeniy N. Pirogov, and Vladimir D. Ryzhikov. Comparative light yield measurements of oxide and alkali halide scintillators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 537(1–2):394 – 396, 2005. Proceedings of the 7th International Conference on Inorganic Scintillators and their Use in Scientific and Industrial Applications.
- [23] R. Shendrik and E. Radzhabov. Absolute light yield measurements on SrF₂ and BaF₂ doped with rare earth ions. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 61(1):406–410, Feb 2014.
- [24] A. E. Borisevich, V. I. Dormenev, M. V. Korzhik, O. V. Misevich, and A. A. Fedorov. Lead tungstate scintillation crystals with improved light yield for experimental high-energy physics. *Instruments and Experimental Techniques*, 49(2):199–202, 2006.
- [25] Weerapong Chewpraditkul, Chalerm Wanarak, Lukasz Swiderski, and Marek Moszynski. Scintillation properties of csi(co₃) and csi(na) crystals for gamma ray detection. 31(2):217–230, 2012.
- [26] N. Pavlov, G. Mashlum, and D. Meier. Gamma spectroscopy using a silicon photomultiplier and a scintillator. 1:173–180, Oct 2005.
- [27] Peter F. Bloser, Jason Legere, Christopher Bancroft, Mark L. McConnell, James M. Ryan, and Nathan Schwadron. Scintillator Gamma-Ray Detectors with Silicon Photomultiplier Readouts for High-Energy Astronomy. 8859, 2013. Conference on UV, X-Ray, and Gamma-Ray Space Instrumentation for Astronomy XVIII, San Diego, CA, AUG 25-26, 2013.

- [28] D. Ginzburg, N. Kopeika, J. Paran, I. Cohen-Zada, M. Ghelman, V. Pushkarsky, E. Marcus, A. Manor, T. Mazor, Y. Kadmon, Y. Cohen, and A. Osovizky. Optimizing the design of a silicon photomultiplier-based radiation detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 652(1):474 – 478, 2011. Symposium on Radiation Measurements and Applications (SORMA) {XII} 2010.