

**Jihočeská universita v Českých Budějovicích
Pedagogická fakulta**

SCINTILAČNÍ DEKEKTORY



Vypracoval: **Vladimír Krejčí**

Ročník: 2.

Studijní obor: Měřicí a výpočetní technika – kombinované studium

Datum vypracování: 30.5.2002

SCINTILAČNÍ DETEKTORY

Úvod

Scintilační detektory převádějí absorbovanou energii ionizujícího záření na energii fotonů náležejících zpravidla do viditelné krátkovlnné nebo blízké ultrafialové oblasti spektra. Historicky jde o nejstarší způsob detekce jednotlivých těžkých nabitých částic, kdy záblesky stínítka pokrytého vrstvou ZnS byly počítány pomocí jednoduchého mikroskopu okem pozorovatele (Crookes, Regener 1908). Toto zařízení se nazývalo spintariskop a kladlo na zrak pozorovatele značné nároky, kterým i po jisté době zácvičku vyhovělo jen málo zájemců. V roce 1909 uskutečnili Geiger a Marsden pomocí spintariskopu experiment zabývající se rozptylem α částic na tenké folii, který vedl k Rutherfordovu objevu jádra (1911). V této souvislosti se vypráví, že Marsden, který scintilace počítal (a byly jich statisíce!), měl Geigerem přísně zakázáno vyhlížet z otevřeného okna a pobývat venku v době ostrého slunečního světla, aby se nezhoršily jeho schopnosti "lidského scintilačního počítače". Je udivující zjištění, že navzdory subjektivitě této detekční metody stanovil Regener nejenom počet α částic emitovaných 1 g Ra a Po, ale také ze známého toku částic nabíjejících kondenzátor, po změření celkového náboje, určil náboj α částice s chybou menší než 0,375 % jeho současné tabulkové hodnoty.

Již v roce 1941 se pokusil Krebs využít fotocitlivého GM detektoru jako náhrady lidského zraku při počítání scintilací ZnS stínítka. Přestože se o totéž později snažili i jiní autoři, nebyly výsledky dobré. Nevýhod takto aplikovaného GM detektoru bylo mnoho. Mezi hlavní patřila nevýhodně položená oblast maxima spektrální citlivosti (cca 260 nm), schopnost pouhé detekce (nikoliv spektrometrie), neschopnost rozlišení druhu částice podle odezvy a konečně i velká mrtvá doba řádu 10^{-4} s.

První prakticky využitelný scintilační detektor vznikl (1944) v Los Alamos National Laboratory (USA), když Curran a Baker použili pro detekci světelných záblesků ZnS fotonásobiče firmy RCA typu 1P 21, vyvinutého pro fotometrické účely ve filmovém průmyslu.

K převratu, který znamenal návrat scintilačního detekčního principu do experimentálních laboratoří došlo po roce 1947, kdy v rychlém sledu byly objeveny scintilační vlastnosti organických (antracen - 1947, Kallmann) i anorganických (NaI(Tl) - 1948, Hofstadter) látek. Tyto objevy stimulovaly výrobce k vývoji vhodnějších fotonásobičů, rychlý vývoj nových scintilátorů byl v podstatě ukončen objevy plastických a kapalných scintilátorů v roce 1950. Až koncem šedesátých let byl uveden a dále vyvíjen nový scintilátor BGO ($B_{14}GeO_{12}$) s vysokým protonovým číslem $Z=74$. NaI(Tl) však zůstal dodnes nejpoužívanějším scintilačním detektorem fotonového záření s nejlepší energetickou rozlišovací schopností.

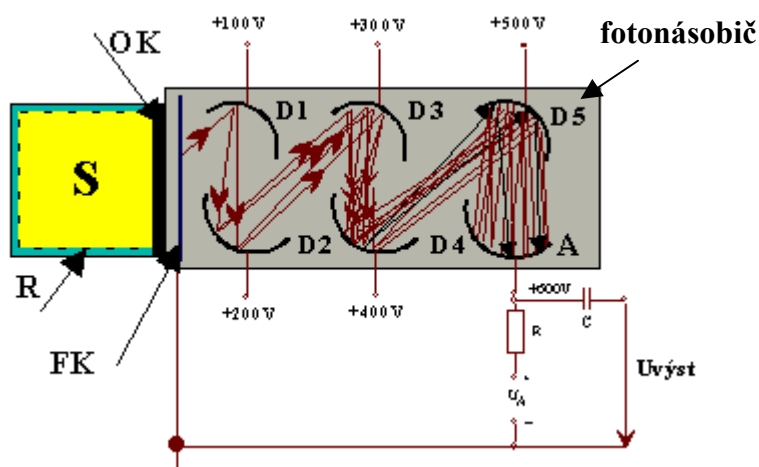
Užívá se jich v lékařských, technických a vědeckých aplikacích ionizujícího záření i v základním výzkumu zejména tehdy, jsou-li požadovány extrémně velké detekční objemy pro detekci slabě interagujících částic. Jejich výhodou, ceněnou především v aplikacích je kompaktnost, provozní nenáročnost a cenová dostupnost.

Základní uspořádání a vlastnosti scintilačního detektoru

Scintilační detektory patří mezi nejpoužívanější detektory ionizujícího záření. jejich výhoda spočívá vedle dobrých spektrometrických vlastností také v tom, že detekční médium, scintilátor, může mít značné rozměry a téměř libovolný tvar. Přitom hmotnost scintilačních látek je dostatečně velká, takže lze dosáhnout poměrně velké detekční účinnosti, zejména pro záření gama. Scintilační detektor dává rovněž výstupní signál, jehož další zpracování obvykle nevyžaduje použití velmi citlivých zesilovačů. Vzhledem k rychlé odezvě uplatňují se scintilační detektory tam, kde je rozhodujícím činitelem zpracování velkých četností nebo kde

potřebujeme získat informace o časových relacích emise částic, popř. jejich interakcí s hmotou.

Základní uspořádání scintilačního detekčního systému je patrné z obrázku. Vlastní čidlo detektoru představuje scintilátor, v němž dopadající záření způsobuje ionizaci a excitaci jeho atomů a molekul. Jejich návrat do základního stavu je doprovázen emisí světelného záření, jehož intenzita odpovídá energii, kterou detekované částice nebo fotonů vyzářených jednotlivými excitovanými centry krystalu je náhodný. Aby se mohly světelné fotony maximálně využít, obklopuje se scintilátor *reflektorem*. Sebrané fotony po průchodu *optickým kontaktem* působí pak na *fotokatodu fotonásobiče*. Nejlepší přenos světelné energie nastává tehdy, je-li prostor mezi scintilátorem a fotonásobičem vyplněn prostředím s velkou světelnou vodivostí. Dobré optické vazby se nejčastěji dosáhne minerálními nebo silikonovými oleji, které na rozhraní krystalu a vstupního skleněného okna fotonásobiče vytvoří velmi tenkou transparentní vrstvu. Kromě tohoto přímého optického kontaktu vyžaduje některé speciální aplikace oddělení krystalu od fotonásobiče. V takovém případě je světlo ze scintilátoru vedeno *světlovodičem*, obvykle ve tvaru válce. Světlovodič se zpravidla připravuje ze syntetického skla (Lucit, Plexiglas), křemene nebo dalších materiálů s velkou průhledností.



SCINTILAČNÍ DETEKTOR

S = scintilátor
R = reflektor
FK = fotokatoda
OK = optický kontakt
Dn = dynody
A = anoda

Mechanismus činnosti fotonásobiče je následující: Fotony po dopadu na fotokatodu uvolňují *fotoelektrony*, které se po fokusaci a urychlení elektrickým polem dostávají na první *dynodu*. Povrch dynod je pokryt materiálem s velkým součinitelem sekundární emise. Vlivem toho se počet elektronů opouštějících každou následující dynodu neustále zvětšuje. Výsledkem tohoto násobícího procesu je, že každý fotoelektron vyvolá celkem *s* elektronů, které jsou potom sebrány na anodě fotonásobiče. Zesílení fotonásobiče bývá v rozsahu 10^5 až 10^9 .

Výstupní signál se obvykle odebírá z anody a fotonásobiče. Někdy je však výhodnější zpracovat signál z některé z posledních dynod nebo použít další vyhodnocení oba signály současně. V detekční sondě (obsahující scintilátor a fotonásobič) je ve většině případů umístěn rovněž před zesilovač, jehož funkce spočívá zejména v přizpůsobení výstupního obvodu detektoru ke vstupu kabelů, kterým se signál vede na vstup vlastního vyhodnocovacího přístroje. Vzdálenost mezi detektorem a měřícím přístrojem bývá často i několik desítek metrů.

Fotonásobičem se tedy světelné impulsy převádějí na elektrický signál a jeho vyhodnocení můžeme získat informace o některých důležitých parametrech měřeného záření. Je to především hustota toku částic a jejich energetické rozložení. Další informace souvisí s okamžikem výskytu výstupního signálu a analýzou jeho tvaru. Poslední operace umožňuje identifikaci částic, což lze výhodně použít při měření směsných radiačních polí.

Popis částí scintilačního detektoru

Reflektor

Pokrytím ostatních stěn reflektujícím materiálem lze po několikanásobných odrazech dosáhnout toho, že téměř všechny fotony emitované v celém objemu detektoru nakonec vystupují jeho podstawou. Vzhledem k průzračnosti vícesložkových organických a aktivovaných anorganických scintilátorů pro jejich luminiscenční spektrum nedoprovází podstatné prodloužení délky dráhy fotonů významné zvýšení ztrát samoabsorpcí.

Označme n_s index lomu scintilátoru, n_0 index lomu jej obklopujícího prostředí. Jestliže svazek fotonů dopadá ze scintilátoru na jejich rozhraní pod úhlem Φ (měřeným od normály k rozhraní) větším než je tzv. mezní úhel Φ_m , pro který platí:

$$\Phi_m = \arcsin \frac{n_0}{n_s} \quad /1/$$

dochází k tzv. totálnímu odrazu. Rozhraním neprojde žádný foton do prostředí obklopujícího scintilátor a plných 100 % se jich odrazí zpět do jeho objemu. Po opakovaných odrazech vystupují nakonec všechny emitované fotony jedinou reflektorem neopatřenou stěnou.

Jako reflektory mohou být použity leštěné kovové povrchy, lepších výsledků je však dosahováno s difusními reflektory, kterými jsou nejčastěji práškové kysličníky hořčíku nebo hliníku, u NaI(Tl) krystalů se obvykle používá vysoušeného MgO, který je umístěn do mezery mezi scintilátorem a pouzdrem. V některých případech se používá i speciálního bílého laku. U organických plastových scintilátorů se povrch buď leští nebo naopak zdrsňuje podle tvaru a velikosti scintilátoru. Mezi scintilátorem a reflektorem bývá malá vzduchová mezera.

Materiály pro reflektory musí splňovat požadavky pokud možno absolutní, vlnově nezávislé a časově stálé reflexe v oboru emise scintilátoru (vlnových délek obvykle v rozmezí cca 350 - 550 nm).

Světlovody

V případech, kdy je třeba fotonásobič chránit před vlivy např. teploty nebo silných magnetických polí, případně převést scintilace ze scintilátoru velkého průměru na fotonásobič s menším průměrem nebo z jiných důvodů oddělit scintilátor od fotonásobiče, se používá tzv. světlovodů (světlovodičů).

Jejich funkce je založena na totálním odrazu od stěn podle vztahu /1/. Pro výrobu světlovodičů se používá nejčastěji organických skel (polymethyl metakrylát - např. plexi, perspex, lucit aj.) nebo polystyrenu. Křemenné sklo, které je transparentní i pro UV záření již od vlnových délek 160 nm je sice nejlepším materiálem, ale pro vysokou cenu a obtížnou opracovatelnost se jej používá jen v nezbytných případech.

I správně navržené světlovodiče mají významné ztráty, v důsledku kterých převedou na fotokatodu pouze asi 30 - 70 % do nich vstupujících fotonů

Optický kontakt

Na optických rozhraních scintilátor - výstupní okénko (nutné u hygroskopických scintilátorů) - světlovod - vstupní čelo fotonásobiče nesmí dojít k reflexi, která by zmenšila počet fotonů dopadajících na fotokatodu. Vzhledem k tomu, že materiály tvořící rozhraní mají blízké

indexy lomu ($n \sim 1,5$), nemělo by k odrazům docházet. Z technologických příčin ale nejsou všechny plochy dokonalé rovinné a jsou mezi nimi vzduchové mezery, na jejichž rozhraní dochází k nežádoucím reflexím. Ty zhoršují přechod světla ze scintilátoru do fotonásobiče a snižují účinnost sběru fotonů na fotokatodu.

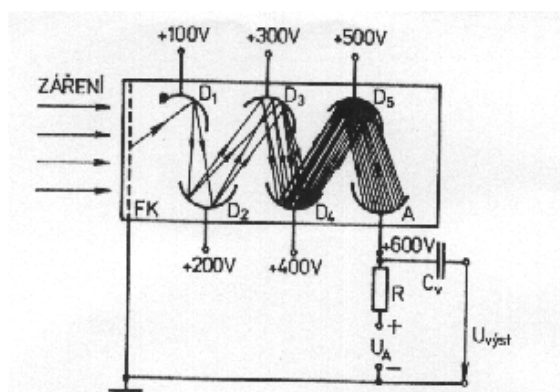
Aby se tomu předešlo vkládá se mezi detektor a čelo fotonásobiče vrstvička materiálu s blízkým indexem lomu, která mezery zaplní. V universálních rozebíratelných scintilačních sondách se používá viskózních silikonových olejů, u vybíraných a nerozebíratelně spojených párů scintilátor - fotonásobič (tzv. scintibloků) jej nejčastěji nahrazují transparentní silikonové gely. Jejich výhodou je časová stálost. Optický kontakt vytvořený silikonovým olejem závislosti na orientaci v prostoru totiž časem steče (projeví se to posuvem spektra a zhoršením energetické rozlišovací schopnosti) a je třeba jej obnovit.

Vedle vhodného indexu lomu je dalším požadavkem kladeným na vlastnosti materiálu pro optický kontakt - a také na všechna skla nebo světlovody ležící mezi scintilátorem a fotokatodou fotonásobiče - velmi dobrá a pokud možno konstantní propustnost světla v celém oboru vlnových délek emitovaných detektorem. Je-li splněn, je světelné spektrum dopadající na fotokatodu totožné s luminiscenčním spektrem a optický systém je "spektrálně přizpůsoben" ke scintilátoru.

Fotonásobiče

Fotonásobič se skládá ze dvou hlavních částí: fotokatody, konvertující fotony na fotoelektrony a dynodového násobícího systému (elektronového násobiče).

Fotonásobiče (zkráceně FN, v anglické lit. PMT - Photo Multiplier Tube) jsou stále nejčastěji používanými fotosenzitivními prvky převádějícími fotony scintilací na (nejčastěji) impulzní



Fotonásobič

FK = fotokatoda

D_n = dynody

A = anoda

elektrický signál. Proudového režimu FN se v jaderné přístrojové technice používá jen málo. Setkáváme se s ním pouze u měřičů dávkového příkonu využívajících kombinovaných scintilátorů (např. MB 3202 Tesla, Szintomat 6134 A firmy Automess, SRN) a ve vyhodnocovacích zařízeních termoluminiscenčních dozimetrů.

Ojedinelé pokusy nahradit FN kompaktními fotosenzitivními polovodičovými diodami nevyžadujícími napájení vysokým napětím zatím nedávají velké naděje na brzkou realizaci této náhrady v širším měřítku. Příčinou jsou pro téměř všechny použitelné scintilátory nevhodné spektrální charakteristiky polovodičových fotosenzitivních diod, jejichž maxima citlivosti leží v oblasti vlnových délek 600 nm a delších. Další významnou nevýhodou je malá citlivá plocha řádu 10^{-1} cm^2 , neumožňující účinný sběr fotonů ze scintilátoru.

Spolu s obrazovkami, které však nejsou postupně vytlačovány pevnolátkovými displeji, zůstávají FN jedinými vakuovými elektronickými prvky současné jaderné instrumentace.

Fotokatody

Činnost fotokatod (dále jen fk) je založena na vnějším fotoelektrickém jevu - fotoefektu, při němž je uvolněný elektron emitován do vakua. Aby k jevu došlo, je třeba, aby energie fotonu byla stejná nebo větší než vazebná energie elektronu materiálu fotokatody. Velikost vazebné energie tedy určuje dlouhovlnnou hranici spektrální charakteristiky FN. Krátkovlnná mez je určena v podstatě spektrální propustností vstupního okénka baňky FN.

V aplikacích pro jadernou techniku se uplatňují výlučně FN opatřené čelními, na vstupní okénko napařovanými fotokatodami. Fotonásobičů s bočními, na kovové podložce napařovanými fotokatodami se používá pro horší sběr fotonů hlavně ve fotometrii pro měření větších světelných toků.

Jsou známy tři typy fk vykazujících maximální emisi fotoelektronů ve spektrální oblasti 350 - 500 nm, do které spadají luminiscenční spektra většiny prakticky významných scintilátorů:

- a) Sb - Cs (s11) - klasická fk, citlivá v UV a viditelné oblasti
- b) Cs - K - Sb, Cs - Rb - Sb tzv. bialkalické fk, nahrazující často typ S11. Vyznačují se větší modrou odezvou a nižším šumem a jsou velmi vhodné pro scintilační techniku
- c) Na - K - Sb - vysokoteplotní bialkalická fk s odezvou blízkou b), díky malé termické emisi schopná provozu až do teplot 150 °C a vhodná pro měření malých světelných intenzit.

Elektronový násobící systém

K zesílení proudu fotokatody se ve fotonásobičích využívá jevu sekundární emise. Při něm primární elektron s jistou nadprahovou kinetickou energií při svém dopadu na povrch kovu s nízkou výstupní prací z něho do vakua vyrazí více než jeden sekundární elektron. Střední počet vyražených sekundárních elektronů je úměrný energii dopadajícího elektronu a je číselně roven proudovému zesílení jednoho násobícího stupně, platí pro něj

$$\delta \sim A \cdot V^s$$

kde A - konstanta, V - potenciál, kterým byl urychlen primární elektron

s - součinitel sekundární emise závislý na materiálu a struktuře povrchu

Opakováním popsaného procesu v elektronovém násobícím systému je možno dosáhnout velkého zesílení G (až 10^8) proudu fotokatody.

Násobící systém se skládá z n (obvykle 10 - 14) dynod opatřených povlakem z materiálu s velkým součinitelem sekundární emise s, zakončen je sběrnou elektrodou - anodou s nejvyšším kladným potenciálem. Nejčastější povlakové vrstvy jsou

SbCs (A~0.2, s~0,7) ; BeO (A ~0.16, s ~ 0,7)

Méně se používá AgMn aktivovaný O + Cs (A ~ 0,025, s ~ 1)

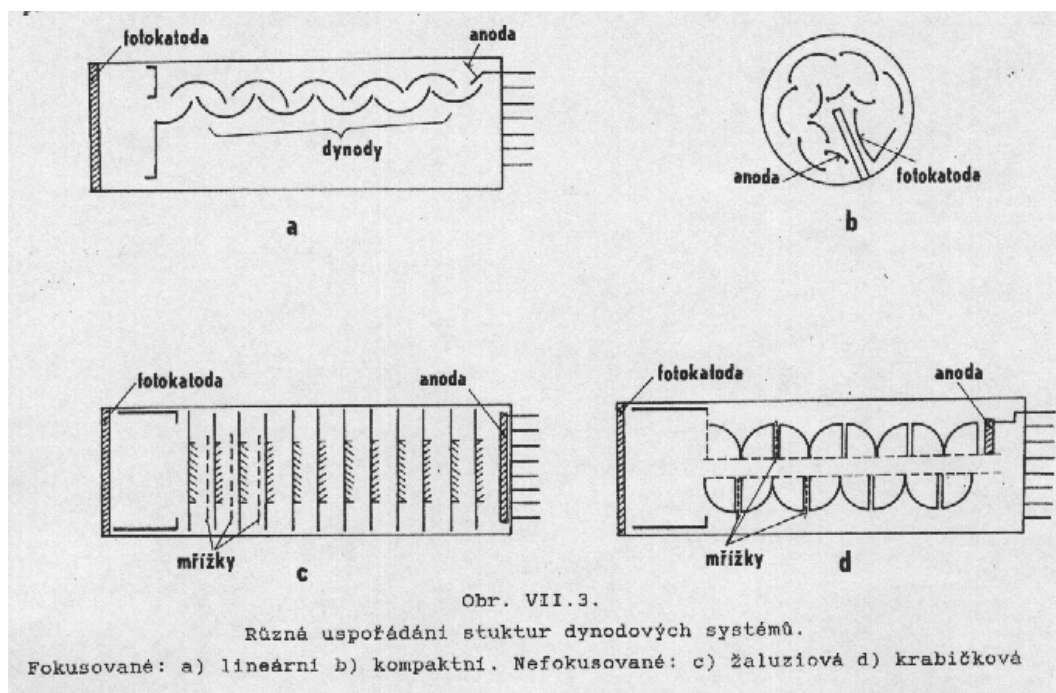
Při obvyklém mezidynodovém potenciálu V ~ 100 V vychází pro první dva typy zesílení δ mezi 4 až 6.

Struktury dynodových systémů a jejich vlastnosti

Ve fotonásobičích se používají čtyři základní geometrická uspořádání dynod.

Fokusovaná uspořádání jsou řešena jako elektronový optický systém. Důsledkem definovaného elektrického pole je nejenom krátká doba průchodu signálu z fotokatody na anodu, ale i její malá disperze a také strmý náběh anodového impulzu jako odezvy na úzký světelný impulz. Proto jsou FN s fokusačně uspořádanými dynodami vhodné pro časová měření. **Nefokusované** dynodové struktury mají mezi dynodami umístěny řídké mřížky spojené s dynodou s vyšším potenciálem, jejichž účelem je zlepšení homogenity pole žádoucí

jak z hlediska sběru, tak zesílení. Obě konstrukce jsou výrobně jednoduché, žaluziové provedení je i relativně krátké a umožňují snadnou modifikaci počtu dynod. Dráhy elektronů jsou hůře definovány a časové vlastnosti jsou horší než u fokusovaných systémů. Fotonásobiče s těmito systémy jsou určeny především pro amplitudovou analýzu.



Volba dynodového uspořádání je kompromisem mezi velikostí systému a jeho elektrickými vlastnostmi jakými jsou: zesílení, časové charakteristiky, linearita a co nejmenší závislost na vnějších magnetických polích. Ohodnotíme-li tyto vlastnosti čtyřstupňovou klasifikací, ve které čtyřka je nejvyšším a jednička nejnižším oceněním, o tom můžeme sestavit tabulku, dávající dobrý přehled o vlastnostech různých uspořádání dynodových systémů.

Klasifikace vlastností dynodových struktur

Struktura dynod	rozměry	zesílení	časování	linearita	mgn. odol.
lineární fokusovaná	1	4	4	4	1
kompaktní fokusovaná	4	1	3	3	4
žaluziová	2	3	2	2	2
krabičková	3	2	1	1	3

Časové vlastnosti fotonásobičů

Měří se časové spektrum anodových odezev na velmi úzké světelné impulzy generované luminescenční diodou, laserem nebo mechanickým přerušovačem svazku světla

Časové spektrum má gaussovské rozdělení a poloha jeho maxima je posunuta proti světelnému impulzu o dobu průchodu signálu systémem (transit time).

Struktura dynod	doba průchodu /ns/	Doba náběhu /ns/	Rozlišení /ns/
lineární fokusovaná	20 - 55	1,8 - 2,7	0,5 - 1,2
kompaktní fokusovaná	20 - 35	1,5 - 2,5	0,5 - 1,0
žaluziová	40 - 110	8,0 - 15,0	2,2 - 5,7
krabičková	50 - 80	12 - 18	4,2 - 6,4

Typické časové hodnoty fotonásobičů s různými uspořádání dynod

Napájení fotonásobičů

Postupně od fotokatody po anodu rostoucí kladný potenciál, nutný k fokusaci a dodání nezbytné energie elektronům obstarává zpravidla odporový dělič vysokého napětí. Jeho optimální dělicí poměry předepisuje výrobce FN v katalogu.

Celkový odpor děliče pro spektrometrické aplikace FN je maximálně do 10 M Ω . Poslední dynody před anodou musí být blokovány kapacitami, aby jejich velký impulzní proud nezatěžoval dělič. Kolísání napětí na děliči by vedlo ke změnám zesílení G dynodového systému. Pro spektrometrické účely se obvykle používá zapojení FN s uzemněnou fotokatodou, které má lepší šumové vlastnosti a umožňuje dosahovat nejlepší energetické rozlišovací schopnosti.

Pro časová měření se zásadně používá FN s fokusovaným systémem. Protože časová informace je odebírána z anody na malém odporu, jehož hodnota je rovna charakteristické impedanci koaxiálního kabelu (např. 50 Ω nebo 100 Ω). je vhodnější zapojení FN s uzemněnou anodou. Aby nedošlo k narušení sběru fotoelektronů z fotokatody do dynodového systému je nutné připojit pouzdro scintilačního detektoru a kryt FN alespoň v okolí fotokatody na její vysoký záporný potenciál.

Procesy probíhající ve scintilačních detektorech lze celkově shrnout do těchto bodů:

- a) absorpci měřeného záření scintilátorem
- b) vlastní scintilační proces, tj. konverzi absorbované energie záření na energii emitovaných scintilačních fotonů
- c) přenos fotonů emitovaných scintilátorem na fotocitlivý prvek - fotokatodu fotonásobiče nebo fotocitlivou diodu
- d) absorpci těchto fotonů fotokatodou fotonásobiče či fotodiodou, vedoucí fotoelektrickým jevem k emisi fotoelektronů nebo ke generování elektron - děrových párů v přechodu fotodiody.

U fotonásobiče např. je možno dále sledovat účinnost sběru fotoelektronů na první dynodu, vlastní násobící proces a sběr elektronů z poslední dynody na anodu fotonásobiče.

Druh scintilátoru zásadně ovlivňuje charakter scintilačního procesu. Z tohoto hlediska rozeznáváme: **organické a anorganické scintilátory**.

Organické scintilátory

Scintilační proces v organických scintilátorech

Energie ionizujícího záření absorbovaná v jakémkoliv scintilátoru se projevuje emisí fotonů náležejících do ultrafialové až viditelné části spektra, která se označuje souborně jako luminescence. Ta je v organických scintilátorech vlastností molekulární struktury **aromatických** (odvozených od benzenového jádra) **molekul** a souvisí s energetickými stavy elektronů (tzv. π - elektronů) zprostředkujících meziatomové vazby v organických molekulách. Protože tento způsob vazby není závislý na skupenství, pozorujeme luminiscenci v plynných, tak kapalných i tuhých aromatických látkách .

Celková energie vyzářených luminescenčních fotonů je přirozeně vždy nižší než energie záření absorbovaná scintilátorem. Jejich poměr se nazývá **konverzní účinnost** (také absolutní scintil. účinnost) scintilátoru.

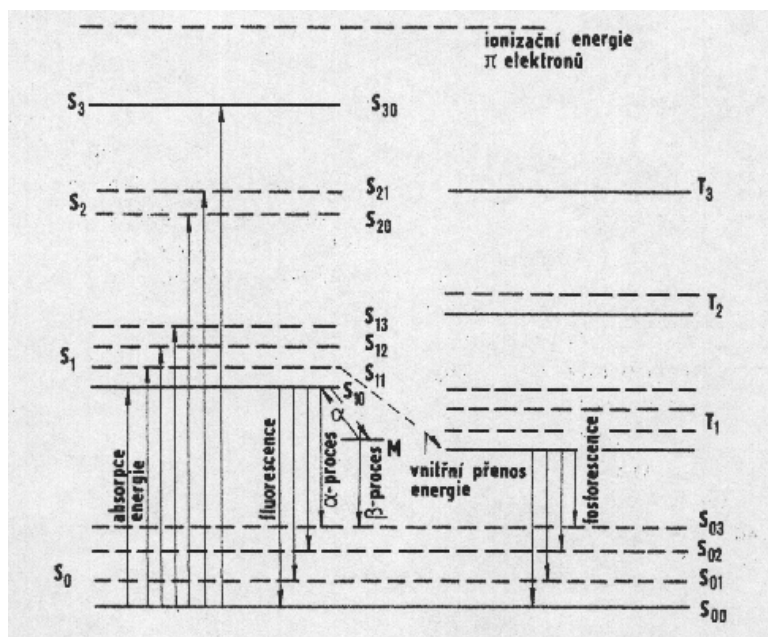


Schéma energetických stavů π - elektronů a názvy lumeniscence jednotlivých deexcitačních stavů

Absorbovaná energie záření se spotřebuje hlavně na ionizaci a excitaci elektronů materiálu scintilátoru, efekt luminescence je spojen pouze s deexcitací π - elektronů. Ionizace jiných než π - elektronů vede k dočasnému nebo i k trvalému poškození molekul scintilátoru, zhoršujícímu jeho optické vlastnosti.

Je-li π - elektron excitován přímo nebo prostřednictvím jiného elektronu, přechází ze základního stavu S_{0j} do excitovaného stavu S_{ij} závislého na velikosti dodané energie (primární proces). Index i označuje excitované singletové stavy, indexem j jsou rozlišeny vedlejší vibrační hladiny i - tého singletového stavu, podobně i u tripletových stavů T_{ij} , jejichž energie je vždy nižší než energie stejně indexovaného singletového stavu. Singletové hladiny odpovídají energetickým stavům molekuly, ve které je součet spinů všech elektronů molekuly roven nule ($s = 0$), tripletové stavy přísluší molekule s celkovým spinem rovným jedné ($s = 1$). Název "tripletový stav" je analogicky odvozen od multiplicity ($2s + 1$) u atomů, která znamená, že v magnetickém poli se každá T hladina štěpí na tři hladiny, odpovídající různým průmětům spinu do směru magnetického pole. Nad nejvyšším excitovaným stavem leží ionizační energie, jejíž dodání znamená odtržení π - elektronu ze struktury molekuly. Schéma excitovaných stavů π - elektronů v organické molekule je na obrázku.

Deexcitace π - elektronů může proběhnout podle výběrových pravidel z vyšších excitovaných stavů buď přímo do základního stavu S_{0j} , nebo kaskádně (postupně) přes nižší excitované stavy až do základního stavu. Experimentálně bylo dokázáno, že k luminescenci, (sekundárnímu scintilačnímu procesu) může dojít pouze při přechodu ze stavu S_{10} do S_{0j} , přičemž tento přechod je s jistou pravděpodobností i nezářivý. Znamená to, že při každém přechodu mezi oběma zmíněnými energetickými stavy nemusí být nezbytně vyzářen foton. Deexcitační energie se v takém případě mění v teplo, stejně jako při všech ostatních možných deexcitacích, které proběhnou jinými způsoby než je S_{10} , S_{0j} . O těchto přechodech potom hovoříme jako o nezářivých (ztrátových). Přechod T_{10} , S_{0j} je spinově zakázán, doba života tripletových stavů je proto mnohem větší než stavů singletových. Důsledkem deexcitací tripletových stavů je velmi dlouhá doba vysvícení, která je u scintilačního detektoru nežádoucí.

Rozecnaváme **tři druhy luminescence**, lišící se časovou konstantou vysvícení a popřípadě i vlnovou délkou emitovaných fotonů, která je nepřímo úměrná rozdílu energetických stavů při deexcitaci (6 eV vlnové délce asi 200 nm).

Jsou to:

- a) fluorescence
- b) fosforescence (dříve označovaná jako pomalá fluorescence nebo β - proces)
- c) zpožděná fluorescence (dříve fosforescence nebo α - proces)

Fluorescence je nejrychlejším luminescenčním mechanismem, při kterém počet zářivých deexcitací π - elektronů ze stavu S_{10} do S_{0j} klesá exponenciálně s časovou konstantou vysvícení řádu $10^{-8} - 10^{-9}$ s. Ta je mnohem delší než doba periody molekulárních vibrací (řádu 10^{-12} s), takže všechny excitované molekuly dosáhnou ještě před emisí tepelné rovnováhy, v důsledku toho všechny pozorované zářivé deexcitace vychází ze stavu S_{10} . Spektrum vlnových délek vyzářených fotonů není vzhledem k vibračním stavům S_{0j} monochromatické, má maxima odpovídající rozdílům energií vibračních hladin, které činí při $T = 300$ K asi 0,16 eV.

Fosforescence je zářivý přechod z metastabilního stavu M, nacházejícího se pod hladinou S_{10} , do základního stavu S_{0j} . Na metastabilní stav M se mohou dostat π elektrony nezářivým přechodem z S_{10} . Vzhledem k nižší energii stavu M je vlnová délka emitovaných fotonů delší než fotonů fluorescenčních, větší doba života stavu M ale daleko podstatněji ovlivňuje časovou konstantu vysvícení, která je řádu 10^{-4} s a delší.

Ke zpožděné fluorescenci dojde, jestliže se π - elektron po dodání potřebné energie (na př. tepelné) vráží z metastabilní hladiny M zpět do stavu S_{10} . Spektrum zpožděné fluorescence je totožné se spektrem normální fluorescence, časová konstanta vysvícení je však řádu 10^{-6} s.

Rozdělení organických scintilátorů

Organické scintilátory dělíme podle počtu scintilačních složek (typů molekul, pro jejichž energie excitovaných singl. stavů platí $S_{1,x} > S_{1,y} > S_{1,z}$, kde x, y, z je označení složky v pořadí jejího klesajícího objemového zastoupení) na:

- a) **jednosložková** (unitární), ke kterým náleží čisté organické krystaly jako je antracen, ($C_{14}H_{10}$) trans-stilben ($C_{14}H_{12}$) nebo quarterfenyl ($C_{24}H_{18}$). Přestože i jiné jednosložkové systémy (čisté roztoky - na př. xylen, nebo plastické hmoty - styren) také scintilují, nejsou pro malou konverzní účinnost využívány.
- b) **dvousložkové** (binární) - patří sem dvousložkové kapalně scintilátory (na př. p - terfenyl v toluenu), dvousložkové plastové scintilátory (na př. p - terfenyl v polystyrenu) a velmi řídké pro obtížnou přípravu používané dvousložkové krystaly, akým je třeba antracen v naftalenu.
- c) **třísložkové** (terciální) systémy, k nimž patří např. kapalně scintilátor p - terfenyl + POPOP(*) toluenu, nebo plastový scintilátor p - terfenyl + POPOP(*) v polystyrenu.

(*) POPOP = 1,4- di-(2-(5 fenyloxazolyl)) -benzen, $C_{24}H_{16}N_2O_2$.

Základní parametry organických scintilačních detektorů

K tomu, abychom mohli organické scintilační detektory srovnávat a kvantifikovat jejich vlastnosti, je třeba stanovit:

- a) konverzní (absolutní scintilační) účinnost S
- b) emisní spektrum
- c) luminiscenční odezvu L na různé druhy záření

- d) časový průběh vysvícení scintilátoru, zastoupení rychlé a pomalé komponenty v závislosti na druhu interagující částice

a) Konverzní účinnost scintilátoru S

je definována jako poměr střední energie vyzářených lunescenčních fotonů E_f k absorbované energii záření E . V diskusi v odstavci scintilační proces jsme odhadli, že na excitaci π - elektronů se spotřebuje pouze $p \cdot E$ (p = přibližně 0,1), označíme-li E_x jejich střední excitační energii, platí:

$$S = p \frac{E_f}{E_x} q$$

Kde $q < 1$ je součinitel zohledňující ztráty vyzářených fotonů

b) Emisní spektrum

je funkcí vlnové délky, udávající poměrnou část z celkového počtu emitovaných fotonů, vyzářených na dané vlnové délce. Tuto závislost nelze jednoduše vyjádřit analyticky, ve specializované literatuře bývá tabelována nebo znázorněna graficky. Ve většině katalogů výrobců scintilátorů se zpravidla setkáváme pouze s údajem o vlnové délce emisního maxima.

c) Luminiscenční odezva na různé druhy záření

Luminiscenční odezva je definována jako energie L , vyzářená scintilačními fotony po absorpci částice S energií E , takže platí:

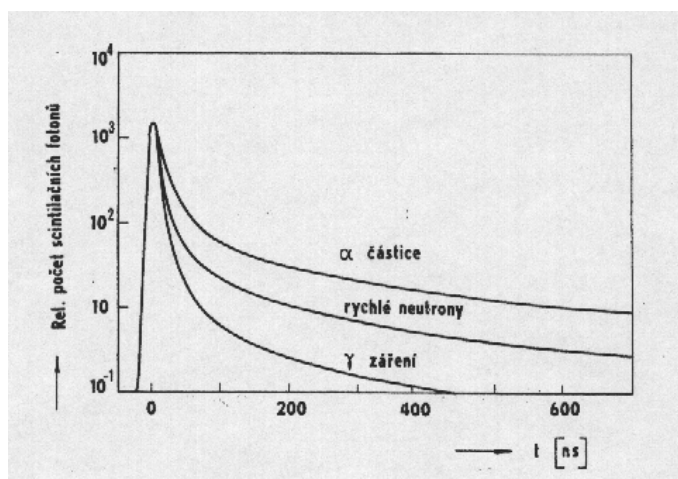
$$L = S \cdot E$$

d) Časový průběh vysvícení scintilátorů

V jednosložkových scintilátorech je největší část emise scintilačních fotonů svázána s exponenciálním rozpadem excitovaných stavů S_{10} na S_{0j} , který probíhá s velmi krátkou časovou konstantou řádu několika ns, odpovídající fluorescenčnímu mechanismu dešexcitace. Dobu primárního excitačního procesu a vnitřní konverze přitom zanedbáváme, protože je řádu ps.

Závislost doby vysvícení na druhu interagujícího záření

Vedle rychlé složky vysvícení byla pozorována přítomnost pomalejších komponent dosvitu



Časový průběh vysvícení transtilbenu, detekující záření gama, alfa a neutrony

neřídících se exponenciální závislostí. I tyto pomalé komponenty mají v podstatě stejné

emisní spektrum jako složka rychlá, což vede k závěru, že jde patrně o zpožděnou fluorescenci. její původ je vysvětlován iontovou rekombinací buď přímo do stavu S_1 nebo prostřednictvím vyšších tripletových stavů, předcházejícím přechodu do S_1 . Poměr zastoupení rychlé a pomalé složky v celkové emisi fotonů scintilátorem je, jak bylo zjištěno experimentálně, funkcí brzdné schopnosti částice dE/dr . Časový průběh scintilace je tedy funkcí druhu interagující částice. Na obrázku /nahore/ jsou tyto průběhy normované na stejnou amplitudu rychlé složky uvedeny pro stilben při interakci záření alfa, gama a neutrony.

Použití organických scintilátorů

Organické scintilátory můžeme podle složení a struktury rozdělit na krystaly, plastické scintilátory a kapalně scintilátory.

Typickými představiteli prvních krystalů jsou krystaly aromatických látek, zejména uhlovodíků, např. naftalen, trans-stilben, difenylbutadien a antracén, který se z nich používá nejčastěji. Základem plastických scintilátorů jsou polymerní látky, zvláště polystyren a polyvinyltoluen. Kapalně scintilátory jsou v podstatě roztoky scintilačních aktivátorů, popřípadě i dalších látek v organických rozpouštědlech. Rozlišujeme mnoho druhů těchto scintilátorů, které se liší použitým rozpouštědlem, scintilačním aktivátorem, popřípadě posunovačem spektra.

Organické scintilátory se vesměs vyznačují krátkým dosvitem, který bývá kolem 10^{-8} až 10^{-9} s. Některé z těchto scintilátorů vykazují vedle rychlé složky vysvícení i charakteristické podstatně pomalejší složky. Tak např. u stilbenu a stejně tak u některých kapalných scintilátorů závisí velikost druhé složky dosvitu na lineárním přenosu energie detekovaného záření. proto pokles intenzity světelného impulsu u lehčích částic je strmější, kdežto u částic s většími měrnými ionizačními ztrátami je výrazně pozvolnější. Rozdílu v odezvě pro odražené protony a Comptonovy elektrony se využívá ve spektrometrii rychlých neutronů pro diskriminaci záření gama od neutronového záření.

Rozsáhlá oblast použití organických scintilátorů se nachází v detekci záření beta a alfa. U zářičů beta se často používá metody tzv. vnitřního počítání, vyznačující se velmi velkou detekční účinností. Metoda spočívá v tom, že radioaktivní vzorek je rozpuštěn nebo rozptýlen v kapalném scintilátoru, který potom vlastně představuje bezokénkový detektor. Tento postup je hojně rozšířen při měření aktivity zářičů s malou energií (např. ^3H a ^{14}C).

Detekce a spektrometrie elektronů a β záření

Možnosti využití organických scintilátorů jsou určeny jejich interakčními parametry, danými malou hustotou a nízkým protonovým číslem. Protože při interakci B záření závisí podíl jak brzdného záření, tak zpětného rozptylu na velikosti Z_{ef} , jsou tyto scintilátory velmi vhodnými detektory i spektrometry záření beta a elektronů vůbec. pro energie vyšší než 125 keV je jejich odezva lineární, pouze při nízkých energiích se projevuje mírná nelinearita, kterou je možno korigovat použitím vztahů $V - 12$ nebo $V - 13$. V antracenu při zabrzdění elektronu s energií 1 MeV vznikne asi 13,7.104 fotonů s vlnovou délkou 447 nm, na vznik jednoho scintilačního fotonu je třeba energie asi 73 eV.

Kapalně scintilátory

Jsou nejčastěji používány jako interní (4π) detektory pro měření aktivit β zářičů emitujících nízkoenergetické záření (hlavně ^3H , ^{14}C). Vyhneme se tak ztrátám způsobeným povrchovým zhášením i ztrátám ve vstupním okénku, které by nastaly v pevných scintilátorech. Při této aplikaci je někdy problémem zajistit převedení měřeného vzorku do scintilátoru, mnohdy je k

tomu třeba použít složitých chemických postupů. Ve většině kapalných scintilátorů se používá jako první složky kapalných uhlovodíků nebo jejich směsí (nejčastěji toluenu nebo xylenu), někdy také minerálních olejů (Bicron, USA) - nelze v nich proto rozpouštět vodné vzorky.

Byly proto vyvinuty hlavně pro lékařské aplikace (moč, serum, sliny apod.) scintilátory na bázi dioxanu, které mají omezenou (až do 30 %) rozpustnost vody. Vzorek měřené aktivity se - pokud není jako někdy např. ^{14}C nebo ^3H zabudován chemicky přímo do struktury rozpouštědla - projevuje vždy jako nečistota, která výrazně zvyšuje zhášení a tedy snižuje konverzní účinnost. Pro korekci tohoto jevu výrobci scintilátorů a vyhodnocovacích zařízení doporučují v manuálech svých výrobků vhodné metody, založené na měření zhášecích křivek při různých koncentracích daných vzorků. Pro každý typ vzorku je třeba přirozené zjistit jinou korekci. Kapalně scintilátory jsou vesměs citlivé na obsah kyslíku a účinky světla. Jsou proto obvykle světlotěsně baleny v ampulích či větších nádobách, naplněných inertním plynem nebo dusíkem. Vyhodnocení se provádí ve standardních kyvetách, které jsou buď dnem položeny přímo na čelo fotonásobiče, nebo obklopeny dvěma i více fotonásobiči jež nejsou v přímém kontaktu s kyvetou.

Detekce a spektrometrie neutronů

Neutrony interagují s jádry vodíku, který je významně zastoupenou součástí scintilátoru mechanismem pružného rozptylu. Monoenergetickým neutronům s energií E_n odpovídá spojitě spektrum energií protonů s energiemi $E_p \in \langle 0; E_n \rangle$, které jsou registrovány scintilátorem. Jeho rozměry musí být voleny tak, aby nedocházelo k vícenásobným srážkám, které komplikují protonové spektrum. Příliš malé rozměry vedou na druhé straně při vyšších energiích neutronů k úniku protonů, které nepředaly celou svoji kinetickou energii scintilátoru - tzv. "stěnovému efektu".

Převod naměřeného protonového přístrojového spektra na spektrum neutronů, nazývaný dekonvolucí je poměrně složitý. Používá se buď derivační nebo maticové metody. Prvky matice odezvy jsou pro nedostatek vhodných monoenergetických neutronových zdrojů obvykle vypočítávány z matematického modelu metodou Monte Carlo. Přitom je třeba respektovat skutečnost, že funkce odezvy není lineární funkcí energie protonů.

Rozdílného časového průběhu vysvícení scintilátoru pro různé částice se v praxi využívá pro rozdělení odezvy při měření hlavně ve směsných polích $n - \gamma$. používají se jednosložkové krystalické (stilben) nebo dvousložkové kapalně scintilátory (např. NE 213 firmy Nuclear Enterprises, KL 360 firmy Koch Light).

Organické scintilátory a fotonové záření

Vzhledem k malé hustotě a nízkému protonovému číslu Z nejsou organické scintilátory běžně používány pro fotonové záření.

V poslední době se však plastové nebo kapalně organické scintilátory používají stále více pro prostou detekci záření γ při měření nízkých aktivit ve velkých objemech. Jedná se o měření aktivit potravin, radioaktivního odpadu v sudech, kontrolu zamoření osob a vozidel při vstupu a výstupu z kontrolovaných objektů. Výhodou organických scintilátorů je možnost realizace "stěn" o rozměrech až do 1,5 m, citlivých v celé ploše při relativně nízké ceně.

Jinak se organických scintilátorů používá hlavně pro časová měření, kdy je rozhodující jejich rychlá odezva. Ve spojení s rychlým fotonásobičem je možno dosáhnout časového rozlišení řádu 10^{-10}s , takže lze studovat doby života excitovaných stavů jádra, mesonů, pozitronů a jiných krátce žijících elementárních částic a smysluplně snížit rozlišovací dobu koincidencí.

Koincidenčního zapojení organických scintilačních detektorů se používá pro měření aktivity, pro spektrometrii neutronů metodou doby průletu, při studiu úhlových korelací apod.

Plastové scintilátory jsou výrobci dodávány buď jako zapouzdřené v okénkovém nebo bezokénkovém provedení (určené pro světlotěsné měniče vzorků), nebo ve formě a scintilačních folií, desek, bloků nebo tyčí.

Přehled nejdůležitějších vlastností vybraných organických scintilátorů .

scintilátor	hustota (g . cm ⁻³)	rel. lum. výt % NaI (TI)	čas. k. vysv. (ns)	vln. d. (nm)
<u>krystalické:</u>				
antracen – C ₁₄ H ₁₀	1,25	40	30	447
transtilben – C ₁₄ H ₁₂	1,16	20	6	410
<u>plastové:</u>				
PST + TPB	1	14	5	450
PVT + pT + p,p difenylstilben	1	19	3	380
PVT + pT + TPB	1	18	4	445
PVT + PBD + POPOP	1,1	26	2 – 4	425
PVT + pT + POPOP (viz př. slož. 1)	1,05	24	3	425
<u>kapalné:</u>				
toluen + pT + POPOP	0,88	24	3,5	425
toluen + PBD	0,88	26	3	365
toluen + PPO + POPOP (př. slož. 2)	0,88	30	3,7	425
xylen + PBD	0,89	28	3	365
xylen + PBD + POPOP	0,90	38	4	425
xylen + naftalen + POPOP	0,87	30	3,7	425
dioxan + PPO + POPOP (do 9% H ₂ O)	1,04	26	3,8	425
<u>komerční</u> (Nuclear Enterprises, GB)				
<u>plastové:</u>	1,032	28	3,7	425
NE 102	1,032	24	1,7	375
NE 111				
<u>kapalné:</u>	0,874	34	3,7	425
NE 213 (vhodný pro tvar. disk.)	0,91	28	3,8	425
NE 311A (obsahuje 5% hm. ¹⁰ B) pro n	0,93	15	4	425
NE 316 (obsahuje 10% hm. Sn) pro X	0,879	26	3,8	425
NE 323 (obsahuje 0,5%hm. Gd) pro n				
<u>scintilační gely:</u>				
NE 221	1,08	24	4	425
Výklad zkratk: PST- polystyren, PVT – polyvinyltoluen, pT – p-terfenyl, TPB- tetrafenylnutadien, PBD – 2-fenyl-5-(4 bifenyl)-1,3,4 oxadiazol, PPO – 2,5-difenyloxazol, POPOP – 1,4-di-(2-(5-fenyloxazol))-benzen <i>Příklady složení:</i> 1) <i>plast.scint.</i> : PVT (1000 g) + pT (36 g) + POPOP (0,2 g) 2) <i>kapal. scint.</i> : toluen (1 l) + PPO (3 g) + POPOP (0,1 g)				

Anorganické scintilátory

Pro detekci a spektrometrii fotonového záření jsou výhodné scintilátory s co největším Z . Organické scintilátory svým prvkovým složením tomuto požadavku nevyhovují. Vhodné jsou anorganické scintilátory, které dělíme do tří skupin:

- a) čisté monokrystaly (neaktivované)
- b) monokrystaly aktivované příměsí
- c) samoaktivované nebo aktivované polykrystalické látky, tuhé roztoky a vzácné plyny + dusík.

První skupina je představována čistými monokrystaly alkalických halogenů jako jsou NaI a CsI, které scintilují pouze při chlazení na teplotu kapalného dusíku. Dále sem patří CsF, BaF₂, CaWO₄ a Bi₄(GeO₄)₃, zkráceně označovaný BGO. Tyto čisté monokrystaly nevyžadují chlazení a vyznačují se díky vysokému efekt. protonovému číslu velmi dobrými interakčními parametry pro fotonové záření. Jejich konverzní účinnost je však podstatně menší než u aktivovaných scintilátorů, takže v důsledku většího relativního statistického rozptylu při tvorbě scintilačních fotonů mají podstatně horší energetickou rozlišovací schopnost. Další jejich nevýhodou je, že většinou mohou být vyrobeny jen v malých rozměrech řádu jednotek centimetrů.

Do druhé skupiny, která je v praxi nejvíce používána, patří hlavně alkalické halogeny aktivované těžkými kovy (Tl, Eu, Na, In, Pb). Tyto detektory nevyžadují chlazení. NaI(Tl) dosahuje ze všech známých scintilátorů nejlepší energetické rozlišovací schopnosti pro fotonové záření, kromě toho jej lze vyrobit v relativně velkých rozměrech řádu 10 cm. Dále sem náleží skupina aktivovaných monokrystalů s nižším Z představovaná CaF₂(Eu), Y₃Al₅O₁₂, YAl₃(Ce), nahrazující organické scintilátory při detekci záření beta v těžkých provozních podmínkách (např. v elektronové mikroskopii nebo v chem. agresivním prostředí).

Poslední skupinu tvoří především sirníky ZnS a CdS buď buď samoaktivované přebytkem Zn či Cd nebo aktivované těžkými kovy, nejčastěji Ag nebo Cu (např. ZnS(Ag)), tyto typy scintilátorů jsou polykrystalické a patří mezi nejstarší. Dále do této skupiny náleží sklenění a jen velmi zřídka používané plynové scintilátory (Ar, Ne, Kr, Xe, N₂).

Základní parametry anorganických scintilačních detektorů

Podobně jako u organických scintilátorů uvedeme důležité parametry nejužívanějších anorganických scintilátorů, jimiž jsou především aktivované monokrystalické halogenidy a BGO. Jsou to:

- a) konverzní účinnost S , relativní luminiiscenční účinnost
- b) luminiiscenční spektrum scintilací
- c) odezva scintilátoru na různé druhy záření
- d) doba dosvitu její závislost na druhu interagujícího záření

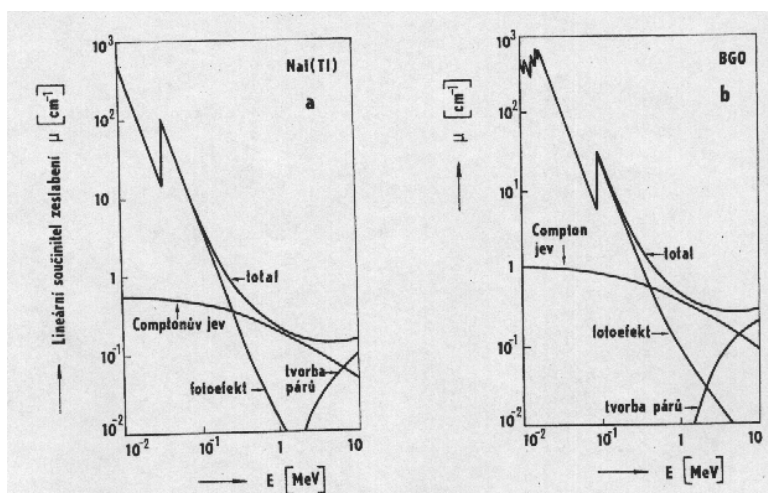
Z hlediska mechanického provedení detektoru je velmi důležité zda je scintilátor hygroskopický. Většina halogenidů je silně hygroskopická a vyžaduje proto hermetické pouzdření. Přehled základních parametrů různých anorganických scintilátorů je v přiložené tabulce./strana17/

Použití anorganických scintilátorů

Anorganických scintilátorů se nejčastěji používá pro detekci a spektrometrii záření gama a X. Pokud není výslovně uvedeno jinak, je zvykem uvádět relativní energetickou rozlišovací schopnost (FWHM %) pro pík ^{137}Cs (661,6 keV). Její závislost na energii je úměrná $E^{-0,5}$, protože impuls scintilační detekční jednotky (dále "scintilační impuls") je výsledkem řady čistě statistických a vzájemně nezávislých procesů (scintilace, emise fotonů z fotokatody a násobícího procesu v dynodovém systému). Všechny scintilátory proto mají Fano faktor $F = 1$. Ze široké nabídky různých druhů scintilátorů se v praxi nejvíce užívá:

- a) **NaI(Tl) - jodid sodný aktivovaný thaliem**, který dosahuje nejlepší energetické rozlišovací schopnosti ze všech známých anorganických scintilátorů. Výběrové krystaly dosahují na ^{137}Cs FWHM >6,4%, při $E = 6$ keV (^{55}Fe) je však FWHM horší než 40 %. Díky malé (0,23 s) časové konstantě dosvitu může NaI(Tl) pracovat při vysokých četnostech impulsů. Vlnová délka maxima emise je 410 nm, hustota $3,67 \text{ g.cm}^{-3}$, konverzní účinnost pro elektrony (fotony) činí 8 - 10 %. Nevýhoda spočívá v tom, že je hygroskopický a vyžaduje vzduchotěsné pouzdro.
- b) Méně často se užívá **CsI(Tl)**, hlavně jako bezokénkového detektoru záření X (není hygroskopický) a dále také pro měření ve směsných polích n - gama, kde v **NaI(Tl)** dochází k aktivaci Na. Radionuklid ^{24}Na vzniká ze stabilního nuklidu reakcí $^{23}\text{Na}(n, \text{gama})$. Na, má poločas rozpadu 15 h a emituje intenzivně fotony s energiemi 2,754 a 1,369 MeV, jejichž spektrum interferuje se spektrem měřeného fotonového pole. Nevýhodami CsI(Tl) jsou: maximum luminiscenčního spektra posunuté do oblasti delších vlnových délek (565 nm), vhodné pro fotosenzitivní diody, ale nevhodné pro běžně používané fotonásobiče, dlouhá (1μs) časová konstanta dosvitu, pouze 45 % rel. luminiscenční účinnost vůči NaI(Tl) a velmi vysoká cena Cs suroviny.

Závislost lineárního součinitele zeslabení na energii fotonů je na následujícím obrázku.



- c) **BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$)** se vyznačuje velkou hustotou $7,13 \text{ g.cm}^{-3}$ a protonovým číslem $Z = 73,03$. Průběh lineárního součinitele zeslabení BGO je na obr. nahoře. Poměr celkových

lineárních součinitelů zeslabení BGO a NaI(Tl) pro fotony je okolo 2,5 a málo závisí na energii. Úměrné lineární zmenšení rozměrů detektoru odpovídá asi šestnáctinásobnému zmenšení objemu detektoru při stejných absorpčních vlastnostech. Krátká časová konstanta dosvitu 0,3 umožňuje provoz při vysokých četnostech impulzů a dosažení dobrého časového rozlišení. Z těchto důvodů jsou krystaly BGO vhodné tam, kde je třeba zmenšit rozměry detekčního systému. Příkladem jsou antikoincidenční stínění nebo detektory pro karotáž ve vrtech malého průměru v geologii.

Přehled vlastností organických scintilátorů

Scintilátor	Vlnová délka 1. maxima (nm)	časová konst. dosvitu (us)	nejkrat. vlnová délka (nm)	teplot. součin. luminis. (%.K ⁻¹)	index lomu n	hustota (kg.m ⁻³)	hygrosko pičnost +ano -ne	liminisc účinnost vzhledem k NaI (Tl)(%)
NaI (77K)	303	0,06			1,85	3670	+	190
NaI (Tl)	410	0,23	320	0,22-0,9	1,85	3670	+	100
CsI (Na)	420	0,63	300		1,84	4510	+	85
CsI(Tl)	565	1,0	330	0,24-0,5	1,8	4510	-	45
CsI (77K)	400	0,6			1,8	4510	-	220
CsF	390	0,05	220		1,48	4110	+	5
⁶ LiI (Eu)	470-485	1,4	450		1,96	4080	+	35
CaF ₂ (Eu)	435	0,94	405	0,3-0,5	1,44	3190	-	50
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO)	480	0,3	350	1 - 1,5	2,15	7130	-	8
BaF ₂	325	0,63	135		1,49	4880	-	10
TlCi(Be,I)	465	0,2	390		2,4	7000	-	2,5
KI(Tl) *	425	0,24/2,5	325		1,71	3130	+	24
CaWO ₄ **	430	0,3-20	300	0,8	1,93	6062	-	50
CdWO ₄ **	540	0,5-20	450	0,0	2,3	7900	-	65
CaI ₂ (Tl)	400	1,0				3960	+	110
Sklo	400	0,075				2700	-	10
Argon	250	0,02				1,8	-	4
Xenon	330	0,02				5,9	-	20

Časová konstanta dosvitu je uváděná (pokud není uvedeno jinak) za laboratorní teploty (300K).

Index lomu je udán na vlnové délce luminiscenčního maxima.

Luminiscenční účinnost vzhledem k NaI (Tl) je měřena s fotonásobičem s Cs - Sb fotokatodou (S-11).

* - KI (Tl) má při excitaci fotony dvě dosvitové komponenty.

** - W má celou řadu dosvitových komponent, vážená střední hodnota je uváděna mezi 3,8-5us.

Praktické použití scintilačních detektorů

Český kosmický experiment na palubě amerického satelitu



Stručný popis přístroje, jehož základem jsou dva scintilační detektory, tvořené krystalem NaI(Tl) o průměru 25 mm a tloušťce 4,5 mm, spojené s fotonásobičem firmy Hamamat. Jeden z těchto detektorů má speciální stínění proti nabitým částicím a to navíc (kromě vědeckých cílů) umožní i důležitý technologický experiment - zjištění účinnosti tohoto stínění...tím i poznání, zda podobný přístroj může úspěšně měřit na geostacionární dráze. Signály z obou detektorů jsou zesilovány a v amplitudovém analyzátoru rozříděny podle velikosti, tedy podle energie dopadajících kvant. Počet impulsů v jednotlivých energetických pásmech je následně spočítán a výstup předán do telemetrie satelitu. Celý přístroj a jeho funkce jsou řízeny palubním počítačem, který umožňuje nejenom a velmi efektivní měření v závislosti na aktivitě Slunce, ale zajišťuje rovněž dlouhodobou stabilitu kontinuální kalibrací během letu. Váha přístroje je 7,5 kg. Data, přenášená pomocí telemetrie do národní laboratoře Sandia v

Novém Mexiku, jsou bezprostředně předávána pomocí Internetu do Astronomického ústavu AV ČR v Ondřejově a následně pak do SEC v Boulderu. V rámci celosvětové sítě budou volně k dispozici všem uživatelům z řad slunečních fyziků.

Přístroje na měření radioaktivních vzorků



Obsah radioizotopů u pevných vzorků se měří pomocí scintilačních detektorů, citlivých na procházející záření gama. Na obrázku jsou zobrazeny dva scintilační detektory, lišící se velikostí krystalu (NaI/Tl) a tím i účinností, s jakou záření gama detekují. Tyto detektory se pro odstínění přírodního radioaktivního pozadí umísťují do olověného nebo železného stínění. Tloušťka a materiál

stínění velmi silně ovlivňují dobu měření, přesnost stanovení a nejmenší hodnotu, kterou lze ještě detekovat (MDS). Pohled do otevřeného stínění může vypadat např. takto:



Použitá literatura:

1. Gerndt J. : Detektory ionizujícího záření
2. Tykva R., Sabol J. Stanovení nízké aktivity radionuklidů
ČVUT Praha Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
3. Internet
4. Přednášky Ing. M. Švadlenková, CSc