

Scintilátory kolem nás



Akademie věd
České republiky



věda 62

kolem
nás
výzvy
a otázky

Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., (FZÚ) je veřejná výzkumná instituce zaměřená na základní a aplikovaný výzkum v oblasti fyziky. Zřizovatelem FZÚ je Akademie věd České republiky. FZÚ je s asi 950 zaměstnanci největším ústavem AV ČR. Současný program ústavu zahrnuje pět oblastí: fyziku elementárních částic, kondenzovaných systémů a pevných látek, optiku a fyziku plazmatu, kterým odpovídá členění do vědeckých sekcí. Výzkum ve fyzice elementárních částic uskutečňujeme převážně v rámci velkých mezinárodních kolaborací. Jedná se o experimenty na urychlovačích v CERN u Ženevy a Fermilab v USA, ve kterých se zkoumá nehlubší struktura hmoty a síly působící v mikrosvětě. S tím úzce souvisí i naše aktivity při vývoji detektorů částic. Zabýváme se také astročásticovou fyzikou, oborem na pomezí částicové fyziky a astrofyziky. Kosmické záření nejvyšších energií zkoumáme v rámci mezinárodní kolaborace v Observatoři Pierra Augera v Argentině. Jedná se o největší experiment tohoto druhu na světě. Věnujeme se i teoretické a matematické fyzice a otázce využití svazků částic v lékařství. Ve fyzice kondenzovaných systémů studujeme dynamické a kooperativní jevy v neuspořádaných a nehomogenních materiálech a systémech se sníženou prostorovou dimenzí. Hlavními objekty zájmu jsou kondenzované látky s výraznými fyzikálními vlastnostmi nebo v extrémních podmínkách. Zabýváme se přípravou a zkoumáním funkčních materiálů a kompozitů, supravodičů, kapalných krystalů a slitin s tvarovou pamětí ve formě monokrystalů, polykrystalů, nanostrukturovaných materiálů, tenkých vrstev a materiálových povlaků pomocí kombinace teoretických, experimentálních a moderních technologických přístupů. V oblasti pevných látek je výzkum zaměřen na nové formy pevných látek, nové fyzikální jevy a principy mikroelektronických komponent. Vlastnosti nových materiálů jsou určovány povrchem, defekty, nanometrickou, vrstevnatou či aperiodickou strukturou. Charakteristické je propojení pokročilých technologií přípravy materiálů, unikátních metod jejich charakterizace v rozsáhlém oboru vnějších podmínek až do nanometrické i atomární úrovně a zpracování výsledků pomocí mikrofyzikálních i *ab initio* teoretických výpočtů. Výrazně jsou zastoupeny magneticky a opticky aktivní materiály, nanokrystalické formy křemíku, polovodičů III–V, diamantu a grafitu a nanostruktury pro biologické, lékařské a mikroelektronické aplikace. K přípravě nových optických materiálů pro optoelektroniku se využívají nové plazmové a hybridní technologie. V oboru kvantové optiky jsou vyvíjeny různé typy zdrojů kvantově korelovaných fotonových párů a zařízení pro přenos takto uložené informace. V oboru výkonové fotoniky se věnujeme interakci laserového záření s hmotou a budování nové národní platformy pro výzkum a vývoj nových laserových technologií. Na terawattový laserový systém PALS tak navazuje v rámci sekce výkonových systémů laserové centrum HiLASE (www.hilase.cz), jehož posláním je výzkum a experimentální vývoj nové generace diodově čerpaných, pulzních pevnolátkových laserů s vysokou opakovací frekvencí a průměrným výkonem na úrovni kilowattu. Nové laserové systémy jsou výrazně silnější, výkonnější, kompaktnější a účinnější než zařízení, která jsou v současné době ve světě dostupná. Proto má HiLASE velký potenciál nejen v základním badatelském výzkumu, ale i v aplikacích a hi-tech průmyslu.

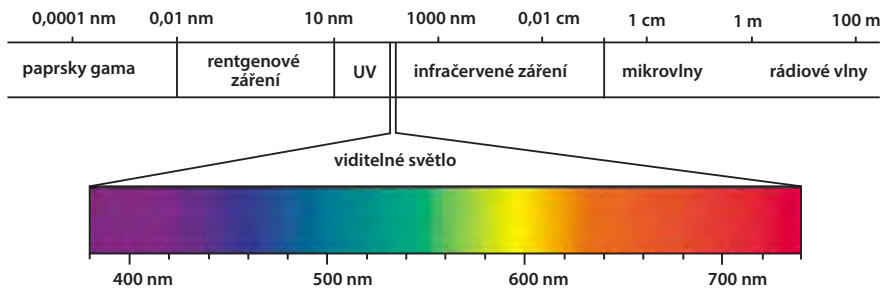
Scintilátor – velmi zvláštní slovo, že? Málokdo by řekl, že označuje něco, s čím se můžeme dnes již poměrně běžně setkat. Jistě víte, že řada nemocnic je vybavena například výpočetním tomografem, lidově zvaným „cétéčko“. Toto zařízení umožňuje nahlédnout do nitra těla pacienta pomocí rentgenových paprsků. Kdo někdy cestoval letadlem, jistě si pamatuje na kontrolu zavazadel pomocí jiného zařízení, které využívá rentgenové paprsky k zobrazení jejich obsahu. Je zřejmé, že rentgenové paprsky procházející ať už tělem pacienta, nebo zavazadlem je třeba nějak zachytit a zpracovat, tedy detekovat. A k tomu slouží scintilátor. Je to totiž materiál, který přemění energii rentgenového záření na ultrafialové nebo viditelné světlo, které je dále detekováno vhodným světlocitlivým senzorem, například fotodiodou nebo fotonásobičem. Fotonásobič je vlastně světlocitlivá elektronka. Elektrický signál z těchto senzorů, který závisí na míře pohlčení rentgenových paprsků v daném zobrazovaném objektu, je dále zpracováván elektronikou a programem v počítači, který vytvoří výsledný obraz vnitřku objektu. Lze tedy říci, že scintilátory přeměňují neviditelné záření na viditelné.

První scintilátory byly používány již na konci devatenáctého století, když bylo objeveno rentgenové záření a později přirozená radioaktivita.

Scintilátory se tedy nepoužívají jen pro detekci rentgenového záření, ale i jiných druhů ionizujícího (nepřesně „radioaktivního“, viz dále) záření. Scintilátory nacházejí široké uplatnění například při detekci částic v jaderném výzkumu, v měření kosmického záření, monitorování radiace v životním prostředí, kontrole paprsků v radioterapii a dalších. Scintilátory jsou velmi různorodá skupina materiálů. Lze do ní počítat například organické krystaly a kapaliny nebo anorganické prášky či keramické materiály. V této publikaci se ale zaměříme na anorganické krystaly, které se hojně uplatňují ve většině výše popsaných aplikací. Abychom vysvětlili fungování scintilátorů, je třeba si nejprve objasnit některé důležité pojmy a fyzikální jevy, jako jsou elektromagnetické záření, ionizující záření a luminescence.

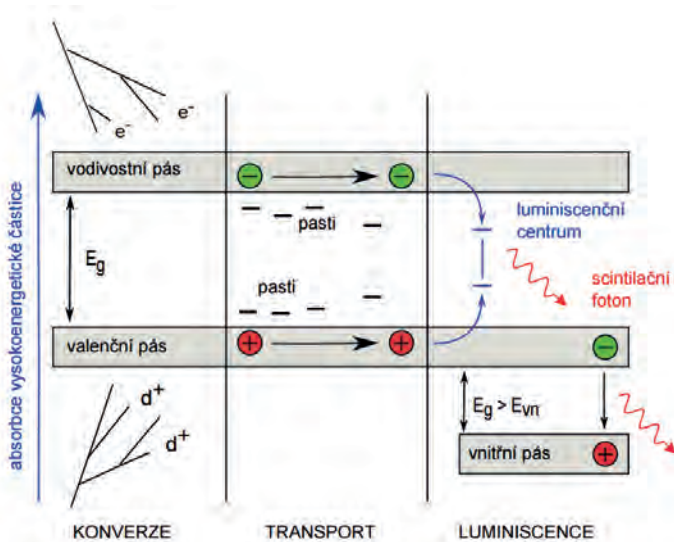
Záření kolem nás

Aniž bychom si to v běžném životě připouštěli a uvědomovali, jsme neustále obklopeni zářením všech možných druhů. Nejznámějším z nich je takzvané elektromagnetické záření, neboť se s ním setkáváme denně jako s viditelným denním světlem. Bílé denní světlo lze pomocí vhodného optického elementu (například hranolu) rozložit na jednotlivé barvy, ze kterých se skládá. Pokud je optickým elementem vodní tříšť nebo vodní kapky v dešťové přeháňce, vzniká všem dobře známá duha. Každá barva odpovídá určité vlnové délce daného světelného záření, která souvisí s energií fotonů tohoto záření. Fotony jsou vlastně částice světla. Elektromagnetické záření můžeme charakterizovat jejich energií v elektronvoltech (zkratka eV, což je energie, kterou získá elektron se svým elektrickým nábojem, je-li urychlen v elektrickém poli s potenciálovým rozdílem 1 V), která souvisí s vlnovou délkou λ (vzdálenost mezi dvěma maximy vlny). Uspořádáme-li všechna známá elektromagnetická záření podle jejich energie, respektive vlnové délky (obr. 1), vidíme, že naše oko a mozek, ač jinak velmi dokonalé orgány, dokážou zachytit a vyhodnotit pouze velmi omezenou část elektromagnetického spektra v oboru vlnových



Obr. 1. Elektromagnetické spektrum

délek cca 380–740 nm, kterou nazýváme viditelné světlo. Záření, které je charakterizováno vyšší energií, pak postupně, s rostoucí energií, nazýváme ultrafialové (UV), rentgenové a konečně gama. Společnou důležitou vlastností těchto druhů vysokoenergetického fotonového záření je jejich vysoká pronikavost běžnou hmotou. Pro úplnost již nyní uvedme, že konvertovaný druh záření nemusí být jen fotony, ale např. i elektrony (β^- záření), pozitrony (β^+ záření), jádra helia (α záření), protony, neutrony, jádra těžších prvků nebo nabitě ionty, které se hojně nacházejí např. v kosmickém záření nebo v urychlovačích částic. Společnou vlastností těchto druhů záření je schopnost ionizovat okolí, tedy vytrhávat elektrony z elektronového obalu atomů prostředí a vytvářet tak ionty. Proto se těmto druhům také říká ionizující záření. Rádi bychom tady upozornili na to, že pojem radioaktivní záření nedává smysl, i když se, i ve vědecké literatuře, občas objeví. Radioaktivní může být látka, která ale vydává ionizující záření.



Obr. 2. Stadia scintilačního procesu (obrázek přejet z dizertační práce Ing. Jiřího Martinčíka, FJFI ČVUT 2012)

Luminiscence

Scintilátory nebo též scintilační materiály patří mezi takzvané luminiscenční materiály. Po zachycení neviditelného ionizujícího záření v nich dochází k luminiscenci. Slovo luminiscence bylo použito poprvé v roce 1888 historikem vědy E. Wiedemannem jako označení všech jevů, v nichž vyzařované světlo nesouvisí se vzrůstem teploty. Proto se také někdy luminiscence označuje jako studené světlo. Žhnoucí keramická deska na vaření či obyčejná žárovka tedy nevykazují luminiscenci. Luminiscenci naopak vykazuje například zářivka, světelná dioda atd. Pokud je luminiscence vybuzena energií rentgenového nebo gama záření, mluvíme o takzvané radioluminiscenci, která je z hlediska fyzikálního popisu totožná s takzvanou scintilací (emisí, vyzářením scintilačního fotonu). Pro více informací o luminiscenci nejen kolem nás odkazujeme čtenáře na názornou publikaci I. Pelanta a J. Valenty: *Luminiscence doma, v přírodě a v laboratoři* (Academia 2014).

Procesy ve scintilátorech

Nyní, když už tušíme, jak se scintilátor používá, si můžeme vysvětlit, jak samotný materiál funguje. Nejprve si ale musíme alespoň velmi stručně říci něco o elektronové struktuře pevných látek, neboť ta je zodpovědná za průběh celého procesu scintilace. Je známo, že elektron v atomu se může pohybovat jen po daných hladinách, které odpovídají určitým dovoleným hodnotám energie. Ve velmi početném souboru vzájemně vázaných atomů, například krystalu, se hladiny spojí do takzvaných energetických páسů, ve kterých se elektrony mohou nacházet. Někdy se jim též říká páсы dovolených energií. Tam, kde se elektrony nacházet nemohou, jsou takzvané zakázané páсы. Pro bližší vysvětlení teorie pevných látek odkazujeme čtenáře na jakoukoli dostupnou vysokoškolskou učebnici teorie pevných látek. Pro nás bude důležitý energeticky nejvyšší obsazený pás, nazývaný též valenční, a nejnižší neobsazený pás, zvaný vodivostní. Mezi těmito dvěma páсы leží zakázaný pás (obr. 2).

Po pohlcení vysokoenergetického fotonu či částice materiálem dojde k ionizaci atomů materiálu, tedy vytrhávání záporně nabitých elektronů z atomů, na jejichž místě se vytvoří kladně nabitě útvary, takzvané díry. Tento velmi složitý proces se nazývá konverze. Konverze je velmi rychlá, trvá většinou jen několik pikosekund (10^{-12} s). Nosiče náboje, elektrony a díry, snižují svoji energii až na energii tepelných kmitů krystalové mřížky. Říkáme, že se termalizují. Nastává další fáze scintilačního procesu, která se nazývá transport. Elektrony mohou zůstat ve vodivostním pásu a díry ve valenčním pásu a mohou se pohybovat materiálem. Elektron může „seskočit“ z vodivostního pásu do valenčního na místo, kde se nachází díra. Dochází k takzvané elektron-děrové rekombinaci. Dále mohou být elektrony (díry) zachytávány na defektech v krystalu, kterým říkáme elektronové (děrové) pasti, jejichž energetické hladiny leží uvnitř zakázaného pásu. Doputují-li nosiče náboje až na luminiscenční centrum, mohou zde opět rekombinovat a dochází k výše zmíněné luminiscenci, poslednímu kroku ve scintilačním procesu. Je zřejmé, že druhá fáze scintilace, transport, má klíčový vliv na časový průběh tohoto procesu. Proto je nutné připravovat materiály o vysoké kvalitě, s nízkou koncentrací pastí, které by scintilační proces komplikovaly.

Role matrice a aktivátoru

V předchozím odstavci jsme zmínili luminiscenční centrum. Takovým centrem může být např. příměs ve scintilačním materiálu, která je zodpovědná za luminiscenci. Někdy se jí říká také aktivátor. Řada krystalů vykazuje svou vlastní luminiscenci i bez zmíněného aktivátoru. Vlastnosti takové luminiscence ovšem často nevyhovují požadavkům, které na scintilátor kladou konkrétní aplikace (neexistuje totiž univerzální scintilátor, který by se hodil na všechno). Proto se do krystalu přidává zmíněný aktivátor. Jeho koncentrace bývá velmi nízká, i pouhé zlomky procent, což ale stačí k tomu, aby se luminiscenční vlastnosti celého krystalu výrazně změnily. Hovoříme o takzvaných aktivovaných scintilátorech. V případě aktivovaných scintilátorů je rovněž důležité upozornit na vztah krystalické matrice a luminiscenčního centra. Role matrice spočívá v pohlcení vysokoenergetického fotonu/částice a přenesení zachycené energie na luminiscenční centrum. Matrice má často velmi silný vliv na luminiscenční centrum, a tak různé krystaly aktivované stejným luminiscenčním centrem mohou mít i poměrně odlišné luminiscenční vlastnosti. Naproti tomu i samotné luminiscenční centrum může na lokální úrovni ovlivňovat matici. Jelikož se jedná o dodanou příměs, tedy jistý druh poruchy v krystalu, mohou okolo ní v některých případech vznikat další defekty, které mohou souviset například s nábojovými pastmi (viz výše).

Je zřejmé, že energie odpovídající šířce zakázaného pásu krystalické matrice musí být vyšší než energie fotonů emitovaných luminiscenčním centrem. Jednoduše řečeno, krystal musí být průhledný pro světlo vysílané luminiscenčním centrem.

Rozdělení materiálů

Jak již bylo napsáno v úvodu, scintilátory mají většinou formu objemového monokrystalu. V některých zobrazovacích technikách s vysokým rozlišením, kde se nepoužívá příliš pronikavé záření, se osvědčily materiály ve formě tenkých monokrystalických vrstev, silných často jen několik desítek mikrometrů. Podobně lze použít též práškové vrstvy, které jsou cenově dostupnější kvůli méně náročné technologii přípravy, když například daný materiál nelze připravit jako monokrystal. Studovány byly také materiály na bázi skla. Jejich výhodou je poměrně jednoduchá technologie přípravy a možnost výroby téměř libovolných tvarů dle potřeby. Nevýhodou může být struktura skla, která je, na rozdíl od monokrystalů, uspořádaná pouze lokálně, a ne v celém objemu scintilačního elementu. To může negativně ovlivňovat scintilační parametry. V současné době došlo k rozvoji technologií pro přípravu optických keramik, jejichž vlastnosti mohou být někdy i lepší než vlastnosti příslušných monokrystalů o srovnatelném složení. Anorganické scintilační materiály mohou být různé sloučeniny na bázi komplexních oxidů (silikáty, aluminiové granáty a perovskity), halogenidů (fluoridů, bromidů, jodidů) či sulfidů, oxysulfidů a někdy i nitridů (viz níže). Pro více informací odkazujeme na velmi zdařilý přehledový článek M. Nikl, A. Yoshikawa. Recent R & D Trends in Inorganic Single-Crystal Scintillator Materials for Radiation Detection. *Adv. Optical Mater.* 2015, 3, s. 431.

Parametry scintilačních materiálů

Hustota a efektivní atomové číslo

Vzhledem k vysoké pronikavosti rentgenového a zejména gama záření je jednou z důležitých charakteristik scintilačních materiálů jejich hustota (ρ v g.cm^{-3}). Obecně platí, že čím vyšší hustota studovaných materiálů, tím vyšší pravděpodobnost, že foton vysokoenergetického záření bude v materiálu pohlcen a dojde ke scintilaci. S hustotou úzce souvisí i takzvané efektivní atomové číslo sloučeniny Z_{eff} , což je v podstatě jakýsi průměr atomových čísel jednotlivých prvků ve sloučenině. Patrně nejvyšší hustotu mezi známými scintilačními materiály má LuTaO_4 ($9,75 \text{ g.cm}^{-3}$), vyšší než např. železo ($7,86 \text{ g.cm}^{-3}$). Výrazného využití však nedoznal.

Pro paprsky beta nebo alfa, které jsou mnohem méně pronikavé, samozřejmě požadavek vysoké hustoty odpadá. Co se týče neutronů, požadavky na složení materiálu jsou ještě specifitější. U neutronových scintilátorů je žádoucí, aby naopak nebyly citlivé na vysokoenergetické fotonové záření, které neutrony často doprovází (například v kosmickém záření či v jaderném reaktoru). Proto bývá hustota neutronových scintilátorů značně nízká. Nedávno studovaný scintilátor LiAlO_2 má hustotu jen $2,6 \text{ g.cm}^{-3}$.

Pozice emise

Z hlediska použití určitého typu detektoru scintilačních fotonů je potřeba také uvážit, jakou energii mají scintilační fotony produkované daným scintilátorem (někdy se dokonce mluví o barvě fotonů, např. modré fotony jsou ty s vlnovou délkou kolem 450 nm). Pro UV a modrou oblast vyhoví spíše fotonásobiče, pro nižší energie pak využíváme polovodičové fotodiody.

Celková scintilační účinnost a relativní účinnost

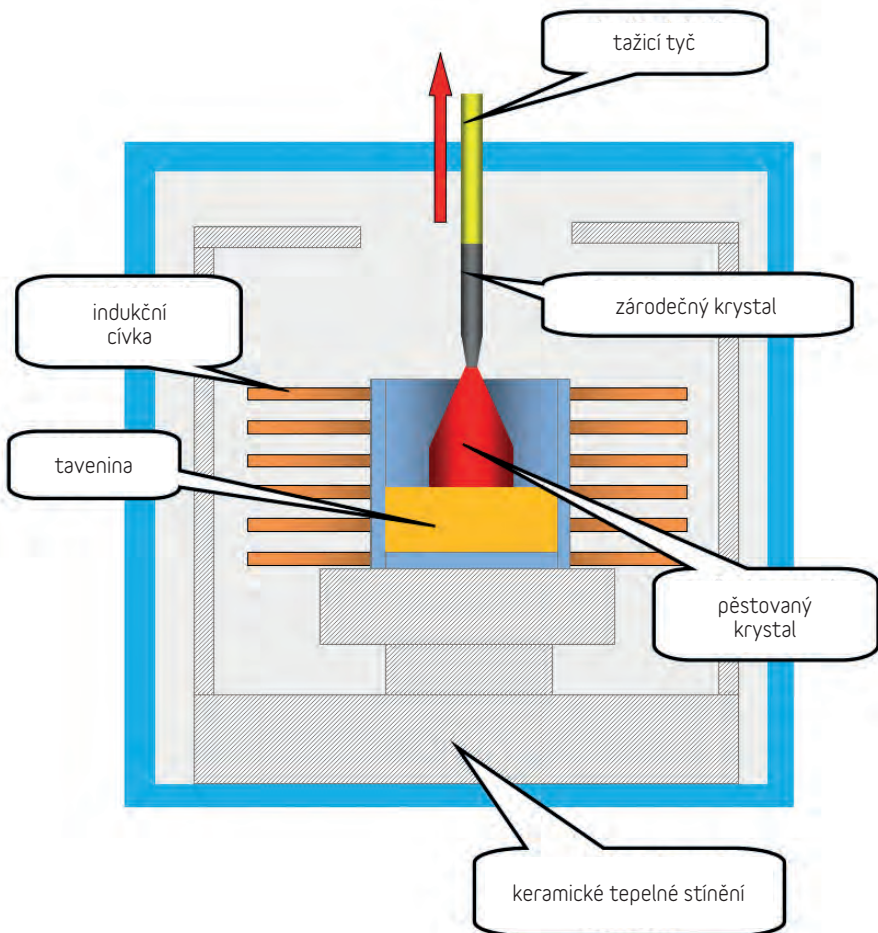
Celková účinnost konverze rentgenového nebo gama záření na světlo daného scintilačního materiálu je dána jak vlastními (vnitřními), tak vnějšími charakteristikami materiálu. Počet UV/viditelných fotonů, který je vyprodukován při scintilační konverzi při energii příchozího fotonu, je nepřímou úměrný šířce zakázaného pásu daného materiálu (pro více informací např. Robbins D. J. On predicting the maximum efficiency of phosphor systems excited by ionizing-radiation. *J. Electrochem. Soc.* 1980, 127, s. 2694–2702; Lempicki A., Wojtowicz A. J., Berman E. Fundamental limits of scintillator performance. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* 1993, A 333, s. 304–311). Mezi neúčinnější materiály kupodivu patří historický ZnS:Ag^+ .

Radiační poškození

Pokud je jakýkoli materiál vystaven intenzivnímu ionizujícímu záření, mohou v něm nastávat změny, někdy dokonce nevratné. Tomuto jevu se říká radiační poškození a projevuje se např. zhoršením průhlednosti materiálu. To je důležité brát v potaz hlavně při těch aplikacích, kde se vyskytují intenzivní svazky záření, např. na urychlovačích částic.

Rychlost scintilační odezvy

Rychlost scintilační odezvy je charakterizována dobou života τ , se kterou scintilační materiál reaguje na interakci ionizujícího záření. Vzhledem k tomu, že emise nenastává v jednom jediném okamžiku, ale je rozprostřena v čase, rozumí se touto dobou života τ takový čas od interakce, ve kterém se intenzita emise snížila na hodnotu $1/e$ (e je Eulerovo číslo, základ přirozených logaritmů), což odpovídá přibližně jedné třetině počáteční hodnoty intenzity. Nejrychlejší známé materiály mají tuto dobu života pod 1 nanosekundu (10^{-9} s); typicky jsou to desítky nanosekund. Pro srovnání: mrknutí oka trvá desetinu sekundy, elektronický blesk na fotoaparátu může trvat mikrosekundu.



Obr. 3. Schéma pěstování krystalu Czochralského metodou

Světelný výtěžek, proporcionalita a energetické rozlišení

Světelný výtěžek je údaj, který nám přímo říká, jaké množství světla se z daného scintilačního materiálu uvolní při absorpci záření o energii 1 megaelektronvoltu (zkratka MeV, viz výše). S tímto pojmem velmi úzce souvisí proporcionalita, respektive neproporcionalita scintilačních materiálů. Ta udává, jak moc se hodnota světelného výtěžku bude měnit se změnou energie dopadajícího záření. Pokud má scintilátor světelný výtěžek například 10 000 fotonů na 1 MeV, pak lze očekávat, že při absorpci záření o dvojnásobné energii 2 MeV vyzáří 20 000 fotonů, tedy dvakrát tolik, a tak dále. To ovšem velmi často není pravda v důsledku různých procesů v materiálu. Tato úměrnost (proporcionalita) je velice důležitá pro dosažení lepšího energetického rozlišení scintilačních detektorů. Energetické rozlišení udává relativní rozdíl energií (v procentech) dvou částic, které mohou být ještě rozlišeny. Pokud totiž máme scintilační detektory s dobrým energetickým rozlišením, můžeme pak experimentálně určit nejenom to, že detektor zachytil ionizující záření, ale i přesně určit, jaká byla jeho energie. Znalost energie nám pak umožňuje jednoznačně identifikovat neznámý zářič (zdroj záření), čehož se využívá ve spektrometrii záření gama. Té se dá využít k zjištění zastoupení různých prvků v daném vzorku materiálu i v případě stopového množství a obsahu radioaktivních prvků v životním prostředí nebo např. ve vesmíru. Každý radioaktivní izotop má totiž své charakteristické záření, které funguje jako jakýsi otisk prstu, podle kterého jej lze jednoznačně identifikovat.

Časové rozlišení

Časové rozlišení detektoru určuje minimální časový interval mezi průchody dvou částic detektorem, které lze ještě od sebe rozlišit. Časové rozlišení je zásadní zejména pro aplikace využívající tzv. *time-of-flight* techniku detekce, např. PET, viz dále.

Teplotní stabilita emise

Emisní vlastnosti každého scintilačního materiálu se mění v závislosti na teplotě, při které pracuje. Zpravidla bývá neúčinnější při nízkých teplotách, při kterých se neuplatňují zhášecí jevy, které tuto účinnost snižují (tzv. termální procesy). Pro velkou část aplikací postačí, aby při pokojové teplotě byla účinnost podobná té u nízkých teplot, ale je i spousta aplikací vyžadujících emisní stabilitu často až do 300 °C (např. karotážní sondy pro geologický průzkum, světelné konvertory...).

Chemická a fyzikální stabilita

Některé scintilační materiály, ač jinak mají např. velmi vysokou hustotu a světelný výtěžek, mají velmi významný nedostatek – jsou silně hygroskopické. To znamená, že velmi rychle reagují s vodou obsaženou ve vzduchu. Proto je potřeba tyto látky nějakým způsobem uchovávat mimo dosah atmosféry, např. speciálním zapouzdřením, což ale práci s nimi značně komplikuje a zdražuje. Jiné materiály jsou dokonce chemicky nestabilní a velmi snadno oxidují na jiné produkty.

Složení

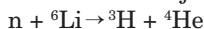
Je zřejmé, že většina z výše uvedených charakteristik závisí na složení materiálu. Například pro dosažení vysoké hustoty a efektivního atomového čísla je výhodné

Obr. 4. Aparatura pro pěstování krystalů metodou *micro-pulling-down*, nainstalovaná ve Fyzikálním ústavu AV ČR



použit těžké prvky, například lutecium, hafnium, olovo atd. Od složení se ale odvíjí i toxicita, mechanická a chemická stabilita materiálu i jeho cena. Pro některé aplikace je navíc třeba uvážit, že některé prvky obsahují radioaktivní izotopy, což může způsobovat falešné scintilační pulzy (typicky ^{176}Lu , jehož přítomnost může způsobovat až 300 pulsů za jednu sekundu v 1 cm^3 krystalu).

Velmi specifické z hlediska složení jsou neutronové scintilátory, jejichž matrice musí být schopna účinně zachytávat neutrony. Musí obsahovat prvek, jehož jádro neutron snadno zachytí, což vede ke vhodné jaderné reakci a vzbuzení matrice materiálu. Může to být například izotop lithia ^6Li či boru ^{10}B . Záchyt neutronu jádrem ^6Li vede k následující reakci:



Nabitá jádra vodíku ^3H a helia ^4He (částice alfa), vylétávající z místa interakce jádra lithia s neutronem, pak tvoří v matrici vzbuzené stavy.

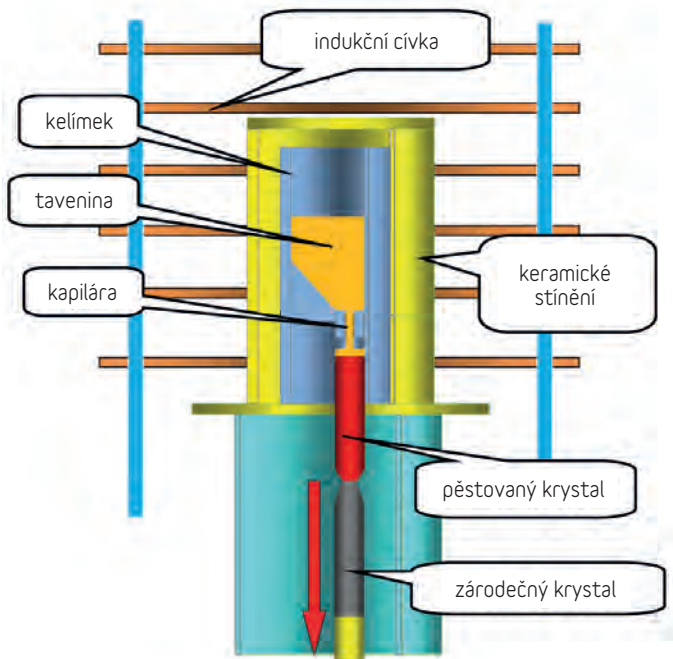
Pro více podrobností čtenáře odkazujeme např. na přehledový článek M. Nikl. Scintillation detectors for x-rays. *Meas. Sci. Technol.* 2006, 17, R37.

Metody přípravy

Jak již bylo řečeno, scintilátory mohou být ve formě prášku, skla či keramiky, ale nejvýznamněji se uplatňují ve formě monokrystalů. V průmyslu se pro přípravu takových monokrystalů používá například Czochralského metoda, která spočívá v postupném tažení krystalu z volné hladiny taveniny (obr. 3).

Výchozí materiál se roztaví v kelímku. Poté se zárodečný krystal umístěný na tzv. tažící tyči dotkne hladiny taveniny, která na něm začne postupně krystalizovat a pohybem rotující tažící tyče vzhůru je vytahován monokrystal. Touto metodou lze připravit krystaly o hmotnosti desítek až stovek kilogramů. Další rozšířenou metodou je Bridgmannova metoda, kdy je ampule s výchozím materiálem protahována skrze pec se zvoleným teplotním polem. Existují i další průmyslové metody. Pro výzkum mohou být ovšem nevhodné kvůli velké spotřebě materiálu a energie. Jednou z metod vhodných pro výzkum je například takzvaná metoda *micro-pulling-down* (český ekvivalent zatím neexistuje). Zařízení pro pěstování krystalů touto metodou bylo v roce 2015 poprvé nainstalováno ve FZÚ AV ČR (obr. 4), zatím jako jediné svého druhu v republice. Metoda spočívá ve vytahování krystalu ze dna kelímku s taveninou (obr. 5).

Metoda byla vyvinuta na počátku devadesátých let na Tohoku University v Japonsku pro přípravu tenkých krystalických vláken. Tavenina ze dna kelímku vytékala mikrokapilárou (odtud první slovo *micro*). Zespodu k ní byl přiložen zárodečný krystal a tažením směrem dolů (*pulling-down* = tahání dolů) bylo ze dna vytahováno monokrystalické vlákno o průměru desetin milimetru. V současné době došlo k modifikaci této metody, kterou lze připravovat krystaly do průměru až 5 mm a délky několika cm. Výhoda této metody spočívá v malé spotřebě výchozích surovin a velmi rychlém růstu. Rychlosti tažení krystalu se pohybují okolo 0,1 mm/min, takže během jediného dne lze připravit krystal vhodný pro optická a scintilační měření. Metoda je tedy vhodná při hledání nevhodnějšího složení materiálu a výrazně tak urychluje výzkum scintilačních, ale i jiných krystalických materiálů. Vzhledem k rychlosti růstu je ale kvalita krystalů o něco nižší ve srovnání s krystaly pěstovanými například zmíněnou Czochralského metodou.



Obr. 5. Schéma pěstování krystalu metodou *micro-pulling-down*

Příklady scintilačních materiálů

V následující části se podíváme na některé nejmodernější scintilační materiály a povíme si něco o jejich vlastnostech a potenciálním využití ve vědě, zdravotnictví nebo v průmyslu.

NaI:Tl^+ , CsI:Tl^+

Jedním z nejdéle používaných scintilačních materiálů je NaI:Tl^+ . Prvek za dvojtečkou ve vzorci značí aktivátor, v tomto případě thallium. Největší výhodou je technologická dostupnost pro produkci libovolných tvarů a objemů takového krystalu, což umožňuje použití v řadě běžných aplikací, které nekladou vysoké požadavky na výkonnost materiálu, a relativně dobrá scintilační účinnost; světelný výtěžek přesahuje 40 000 fot/MeV při vyhovující době života 230 ns. Podobné vlastnosti má i těžší analog, jodid cesný, CsI:Tl^+ . Nevýhodou těchto krystalů je křehkost a hygroskopičnost. Proto krystaly musí být hermeticky uzavřeny, většinou v hliníkovém pouzdře.

$\text{LaBr}_3:\text{Ce}^{3+}$, Sr^{2+}

Scintilátor ze třídy těžkých halogenidů je znám a studován především pro svoje excelentní energetické rozlišení, které díky dobré proporcionalitě atakuje hranici 2 %

(při energii 662 keV, gama záření izotopu ^{137}Cs). Potencionální využití je tedy, i díky vysokému světelnému výtěžku až 80 000 fot/MeV, ve scintilačních detektorech se spektroskopickými vlastnostmi a v lékařství. Nevýhodou pro použití v nízkopozadových detektorech je to, že chemický prvek lanthan obsahuje přirozeně jeden izotop (^{138}La), který je radioaktivní, vyskytuje se v množství 0,09 % a má poločas rozpadu 10^{11} let (M. S. Alekhin, J. T. M. de Haas, I. V. Khodyuk, K. W. Kramer, P. R. Menge, V. Ouspenski, P. Dorenbos. Improvement of $\text{LaBr}_3:5\%\text{Ce}$ scintillation properties by Li^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Sr^{2+} , and Ba^{2+} co-doping. *Appl. Phys. Lett.* 2013, 102, 161915).

$\text{SrI}_2:\text{Eu}^{2+}$

První zmínky o použití $\text{SrI}_2:\text{Eu}^{2+}$ jako detektoru záření jsou už z roku 1968, kdy si tento krystal nechal patentovat R. Hofstadter. Kvůli vysoké výrobní ceně a velmi silné hygroskopičnosti se ale až do nedávna příliš nestudoval. Nejlepší $\text{SrI}_2:\text{Eu}^{2+}$ krystaly dosahují světelného výtěžku 120 000 fot/MeV při velmi příznivém energetickém rozlišení pod 3 % při 662 keV; $\text{SrI}_2:\text{Eu}^{2+}$ má tedy předpoklady nahradit stávající krystaly v lékařských aplikacích.

$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO)

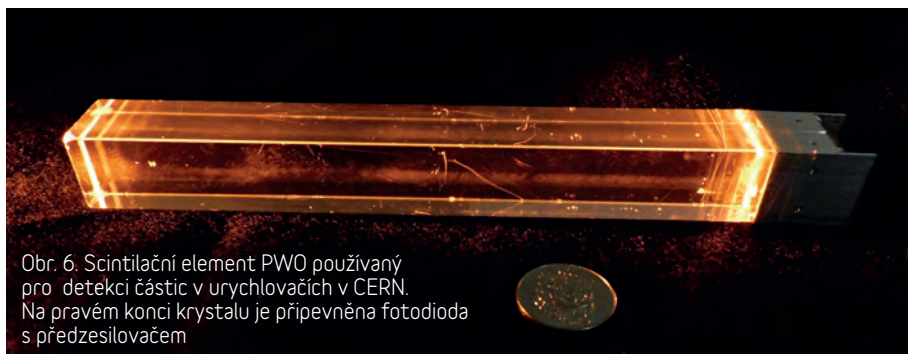
Spolu s $\text{NaI}:\text{Tl}^+$ a $\text{CsI}:\text{Tl}^+$ patří BGO mezi nejstarší používané scintilační materiály. Jedná se o neaktivovaný scintilátor a byl představen už v roce 1973 (Weber M. J., Monchamp R. R. Luminescence of $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$: spectral and decay properties. *J. Appl. Phys.*, 1973, 44, s. 5495–5499). Díky kombinaci vysoké hustoty ($\rho = 7,13 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), vysokého efektivního atomového čísla ($Z_{\text{eff}} = 74$) a možnosti levné a rychlé přípravy velkoobjemových krystalů různých tvarů a velikostí se jeho použití velmi rychle rozšířilo do mnoha odvětví vědy a průmyslu. Maximum emise se nachází u 480 nm s charakteristickou dobou života 300 ns. Navíc se může BGO chlubit velmi vysokou mechanickou a radiační odolností. Jeho největší nevýhodou je relativní nízký světelný výtěžek kolem 8000 fot/MeV, ale i přesto nachází i dnes uplatnění v mnoha aplikacích (lékařské zobrazování, spektroskopie záření gama, vesmírné aplikace).

PbWO_4 (PWO)

Také PWO je neaktivovaný scintilační materiál, s patrně nejvyšší hustotou mezi současně používanými materiály ($\rho = 8,23 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a $Z_{\text{eff}} = 73$). Proto se používá, i díky velmi rychlé odezvě v řádu jednotek nanosekund, hlavně ve fyzice vysokých energií (obr. 6) a v detektorech nejenergetičtějších fotonů, jejichž energie může dosahovat až desítek TeV (1 000 000 000 eV). Určitou nevýhodou je velmi nízký světelný výtěžek, který dosahuje pouze 300 fot/MeV. Byl intenzivně studován po celém světě, včetně FZÚ AV ČR (obr. 7). Snahou bylo dosáhnout vyššího světelného výtěžku, zrychlit scintilační odezvu, ale hlavně co nejvíc zvýšit radiační odolnost. Jednou z možností je zavedení příměsí Mo^{3+} a La^{3+} nebo iontů Nb^{5+} do struktury PWO (pro více informací viz např. Nikl M. Wide band gap scintillation materials. Progress in the technology and material understanding. *Phys. Status Solidi A*, 2000, 178, s. 595–620).

$\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$, $\text{LuAG}:\text{Ce}^{3+}$

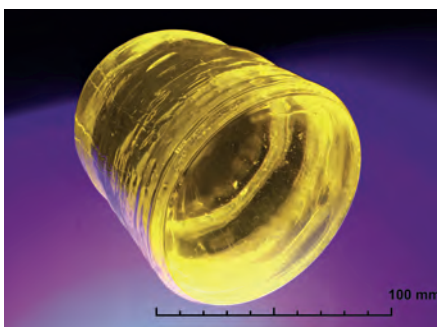
Jedním z neznámějších a nejpoužívanějších scintilačních materiálů je yttrium-aluminiový granát aktivovaný cerem $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$, často v literatuře označovaný



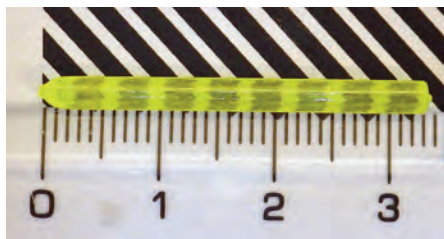
Obr. 6. Scintilační element PWO používaný pro detekci částic v urychlovačích v CERN. Na pravém konci krystalu je připevněna fotodioda s předzesilovačem



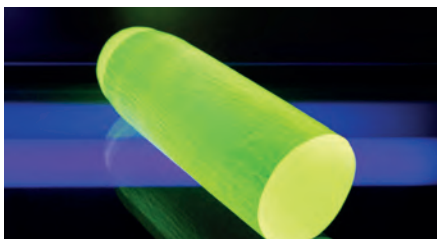
Obr. 7. Scintilační krystal PWO pěstovaný Czochralského metodou na FZÚ AV ČR



Obr. 8. Scintilační krystal YAG:Ce připravený Czochralského metodou (publikováno se svolením Crytur, s. r. o.)



Obr. 9. Scintilační krystal YAG:Ce pěstovaný metodou *micro-pulling-down* na FZÚ AV ČR



Obr. 10. Scintilační krystal LuAG:Ce připravený Czochralského metodou (publikováno se svolením Crytur, s. r. o.)

jako YAG:Ce³⁺ (obr. 8, 9). Spolu s lutecium-aluminiovým granátem LuAG (obr. 10) mají strukturu odvozenou od struktury granátu, který je jedním z dobře známých českých drahých kamenů. S hustotou 6,67 g.cm⁻³ (oproti 4,56 g.cm⁻³ u YAG) a efektivním atomovým číslem 63 (oproti 32 u YAG) pak LuAG:Ce³⁺ (Lu₃Al₅O₁₂) patří mezi nejtěžší scintilátory. Jejich výhodou je mimo jiné i vysoká teplotní stabilita luminiscence. Při podrobném studování LuAG:Ce³⁺ se ale zjistilo, že světelný

výtěžek nejlepších krystalů dosahuje pouze 26 000 fot/MeV, což není ani polovina teoretického limitu. Navíc se ve scintilačním dosvitu objevuje pomalá komponenta, která výrazně zhoršuje celkovou účinnost a reálné použití. Ze strukturních prací se vědělo, že ve struktuře LuAG existují místa, kde si hliník a lutecium vymění své pozice, které by měly regulérně mít. Tento strukturní defekt pak vytváří mělké pasti v zakázaném pásu a může zachytávat scintilaci produkované elektrony a zpožďovat jejich zářivou rekombinaci, čímž vzniká pomalá komponenta v dosvitu (viz výše). Bližší informace např. v M. Nikl, A. Yoshikawa, K. Kamada, K. Nejezchleb, C. R. Stanek, J. A. Mares, K. Blazek. Development of LuAG-based scintillator crystals – A review. *Prog. Cryst. Growth Charact. Mater.* 2013, 59, s. 47.

GGAG:Ce³⁺

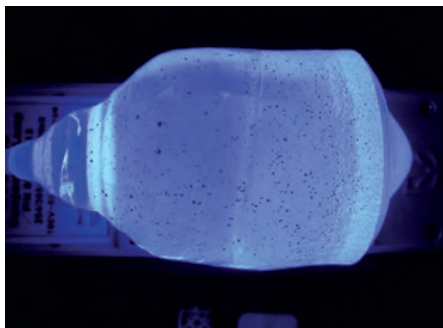
Nejmodernějším scintilačním materiálem ze skupiny oxidů je bezpochyby Gd₃Ga₃Al₂O₁₂:Ce³⁺, (zkratka GAGG:Ce, obr. 11), který je odvozený od granátu LuAG náhradou atomů Lu za Gd a části Al za Ga a je ukázkovým příkladem dokonalé optimalizace a nezbytné spolupráce fyziků s technologií růstu krystalů. Za objevem GGAG totiž stála snaha zlepšit vlastnosti LuAG krystalů kvůli jejich nedostatkům popsaným výše. U zrodu této strategie aplikované na scintilační materiály, která se v angličtině nazývá *bandgap engineering*, což by se dalo vysvětlit jako modifikace a optimalizace zakázaného pásu, stál, mimo jiné, i doc. Ing. Martin Nikl, CSc z FZÚ AV ČR. Přídavek Ga do struktury LuAG snižuje spodní hranu vodivostního pásu, čímž se hladiny výše zmíněných mělkých pastí ocitnou ve vodivostním pásu a tím ztratí schopnost zadržovat elektrony. Dojde tedy k potlačení pomalých složek dosvitu a ke zvýšení světelného výtěžku. Na druhou stranu je snižování spodní hrany vodivostního pásu nevýhodné z hlediska teplotní stability emise, což se kompenzuje přidávkou Gd. U nejlepších krystalů GGAG:Ce³⁺ bylo dosaženo světelného výtěžku až 60 000 fot/MeV, což atakuje teoretický limit. Se scintilační dobou života 90–170 ns, poměrně vysokou hustotou (6,2 g.cm⁻³), dobrým energetickým rozlišením (4,2 % při 511 keV) a hlavně vysokou mechanickou a chemickou stabilitou se GGAG:Ce³⁺ řadí mezi nejlepší moderní scintilátory s velkým aplikačním potenciálem (viz např. K. Kamada, S. Kurosawa, P. Prusa, M. Nikl, V. V. Kochurikhin, T. Endo, K. Tsutumi, H. Sato, Y. Yokota, K. Sugiyama, A. Yoshikawa. Cz grown 2-in. size Ce:Gd₃(Al, Ga)₅O₁₂ single crystal; relationship between Al, Ga site occupancy and scintillation Properties. *Opt. Mater.* 2014, 36, s. 1942).

(Gd;La)Si₂O₇:Ce³⁺

Tento těžký scintilátor ze třídy pyrosilikátů je intenzivně studován od roku 2012 a je opět ukázkou nutnosti spolupráce fyziků a technologií růstu krystalu (obr. 12). Čistý Gd₂Si₂O₇ krystal totiž není možné technicky vypěstovat jako objemový materiál kvůli takzvanému nekongruentnímu tání. To znamená, že při pěstování krystalu není složení pevné fáze stejné jako složení taveniny. Přídavek několika desítek procent lanthanu ale stabilizuje pyrosilikátovou fázi, což zcela mění situaci. Světelný výtěžek přesahuje 40 000 fot/MeV a emise Ce³⁺ v této matici je teplotně stálá až do přibližně 230 °C, tedy dostatečně na to, aby tento materiál mohl být použit do takzvaných karotážních sond a v rámci jiných geofyzikálních aplikací (více viz V. Jary, M. Nikl, S. Kurosawa, Y. Shoji, E. Mihokova, A. Beitle-



Obr. 11. Krystal GAGG:Ce³⁺ pěstovaný Czochralského metodou na FZÚ AV ČR. Milimetrový papír udává měřítko. Bílá část vpravo je zárodečný krystal, který neobsahuje aktivátor Ce³⁺



Obr. 12. Modrá luminescence krystalu (Gd;La)Si₂O₇:Ce³⁺ buzená UV lampou (publikováno se souhlasem profesora Kurosawy z Tohoku University v Japonsku)

rova, G. P. Pazzi, A. Yoshikawa. Luminescence characteristics of the Ce³⁺-doped pyrosilicates: The case of La-Admixed Gd₂Si₂O₇ single crystals. *Journal of Physical Chemistry C*. 2014, 118, s. 26521–26529).

(Lu;Y)₂SiO₅ (LYSO):Ce³⁺

Směsný lutecium-yttrium oxyortosilikát aktivovaný cerem (LYSO:Ce) patří k nejnovější generaci moderních scintilačních materiálů zejména díky vysokému světelnému výtěžku kolem 32 000 fot/MeV, rychlé scintilační odezvě 40 ns bez pomalých složek, vysoké hustotě a velmi dobrému energetickému rozlišení. Navíc příprava velkoobjemových krystalů je dnes technologicky velmi schůdná při relativně nízkých nákladech. I když čistý oxyortosilikát lutecitý Lu₂SiO₅ (LSO) by měl vyšší hustotu (7,4 g.cm⁻³), přistupuje se k přidavku několik desítek % yttria, a to zejména kvůli radioaktivnímu izotopu ¹⁷⁶Lu (beta zářič, poločas rozpadu ~ 4.10¹⁰ let). Dnes se LYSO:Ce³⁺ používá hlavně v lékařských aplikacích (V. Jary, M. Nikl, E. Mihokova, J. A. Mares, P. Prusa, P. Horodysky, W. Chewpraditkul, A. Beitlerova. Influence of yttrium content on the Ce1 and Ce2 luminescence characteristics in (Lu_{1-x}Y_x)₂SiO₅:Ce single crystals. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2012, 59, s. 2079).

Scintilátory na bázi SrHfO₃

SrHfO₃ dopovaný Ce³⁺ byl jako scintilátor patentován již v roce 1992. Vzhledem k velmi vysokému bodu tání této sloučeniny (> 2400 °C) se zatím nepodařilo vypěstovat monokrystal, ale vlastnosti mikrokrystalického prášku a optické keramiky SrHfO₃ jsou v poslední době podrobně studovány. Mezi jeho velké přednosti patří především vysoká hustota (7,56 g.cm⁻³), vysoké efektivní atomové číslo (60,2), absence radioaktivity a rychlá scintilační odezva kolem 20 ns díky aktivátoru Ce³⁺.

Kvůli vysokým cenám kovů vzácných zemin (např. La, Ce, Pr, Eu, Lu...) se v posledních letech začaly hledat i scintilační materiály, které by tyto kovy neobsahovaly. Při podrobném studiu $\text{SrHfO}_3:\text{Ce}^{3+}$ se v Praze na Fyzikálním ústavu povedlo připravit a charakterizovat nedopovaný (neaktivovaný) nestechiometrický vzorek o složení $\text{Sr}_{0,98}\text{Hf}_{1,02}\text{O}_{3,02}$, který poskytuje vysoce intenzivní emisi v blízké UV oblasti při zachování všech výhod $\text{SrHfO}_3:\text{Ce}^{3+}$. Díky výše zmíněným vlastnostem může být efektivním rychlým materiálem konvertujícím rentgenové a gama záření např. pro 2D zobrazovací techniky (více viz P. Boháček, B. Trunda, A. Beitlerová, J. Drahokoupil, V. Jarý, V. Studnička, M. Nikl. Rare-earth-free luminescent non-stoichiometric phases formed in SrO-HfO_2 ternary compositions. *J. Alloy. Compd.* 2013, 580, s. 468–474).

$\text{YAlO}_3:\text{Ce}$, $\text{LuAlO}_3:\text{Ce}$

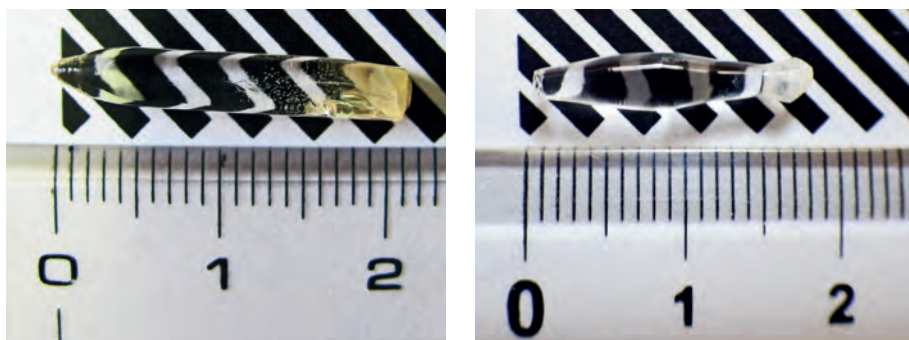
Scintilátory na bázi perovskitů se dnes studují zejména kvůli velmi dobré proporcionalitě, a tedy dobrému energetickému rozlišení kolem 4 % (při 662 keV), nejlepšímu u oxidových scintilátorů. Navíc lutecium-aluminiový perovskit LuAlO_3 (LuAP) má velmi vysokou hustotu ($8,34 \text{ g.cm}^{-3}$) a doba života luminiscence ceru 18 ns v těchto materiálech je 3× kratší než u granátových analogů (YAG, LuAG). Růst krystalů YAP (yttrium-aluminiový perovskit) a zejména LuAP je ale velmi náročný, protože perovskitová fáze je nestabilní a při procesu pěstování často dojde k tvorbě granátové fáze. Zvýšená stabilita ale byla zjištěna u směsného Y-Lu systému (K. V. Ivanovskikh, J. M. Ogiegło, A. Zych, C. R. Ronda, A. Meijerink. Luminescence Temperature Quenching for Ce^{3+} and Pr^{3+} d-f Emission in YAG and LuAG. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 2013, 2, R3148). Nejlepší krystaly $\text{YAP}:\text{Ce}$ mají světelný výtěžek přesahující 25 000 fot/MeV.

$\text{KLuS}_2:\text{Eu}^{2+}$

Tento velmi zajímavý scintilační materiál ze třídy sulfidů byl poprvé popsán a patentován v roce 2013 na Fyzikálním ústavu v Praze. Z hlediska struktury je zajímavé to, že dvojmocné Eu^{2+} obsazuje ve struktuře KLuS_2 jak třímocné pozice Lu^{3+} , tak jednomocné pozice K^+ , čímž přirozeně dochází ke kompenzaci elektrického náboje. Pozornost zaslouží i velmi vysoká účinnost přenosu excitační energie z mřížky KLuS_2 na emisní centrum Eu^{2+} , protože už při nízkých koncentracích Eu^{2+} (0,05 %) dosahuje světelného výtěžku přes 35 000 fot/MeV. Díky relativně vysoké hustotě a efektivnímu atomovému číslu lze tento materiál použít pro detekci fotonového záření (V. Jarý, L. Havlák, J. Bárta, E. Mihóková, M. Nikl. Optical properties of Eu^{2+} -doped KLuS_2 phosphor. *Chem. Phys. Letters* 2013, 574, s. 61–65).

Scintilátory na bázi nitridových polovodičů

Přibližně před 20 lety byla zahájena výroba luminiscenčních diod na bázi nitridových polovodičů, využívající InGaN a GaN kvantové struktury. Za vyvinutí technologie přípravy nitridových luminiscenčních diod vyznařujících v modré oblasti byla v roce 2014 udělena Nobelova cena japonským vědcům Isamu Akasakimu, Hiroshi Amanovi a Shuji Nakamurovi. O deset let později si vědci uvědomili, že podobnou, jen trochu modifikovanou strukturu lze využít také pro scintilátory. Díky silné vazbě mezi atomy jsou velmi radiačně odolné. Velká vazebná energie excitonu umož-



Obr. 13. Krystaly LiAlO_2 (vlevo) a Li_4SiO_4 (vpravo) pěstované metodou *micro-pulling-down*

ňuje vysokou intenzitu luminiscence i při pokojové teplotě a charakter luminiscenčního procesu pak velice rychlou luminiscenční odezvu kolem 1 ns, která je ve scintilačních materiálech většinou nedosažitelná. Takovéto rychlé scintilátory jsou v současné době požadovány pro stínítka elektronových mikroskopů v inspekčních přístrojích polovodičového průmyslu, kde při kontrole kvality integrovaných obvodů jsou nutné extrémně rychlé elektronové rastrovací mikroskopy. Vzhledem k vysoké intenzitě luminiscence jsou však nitridové heterostrukтуры (strukтуры, ve kterých se střídají GaN a InGaN) perspektivní i pro jiné typy scintilátorů, detekující rentgenové či jiné částicové záření. Protože je luminiscence generována v relativně tenké oblasti (několik stovek nm) jsou nitridové heterostrukтуры vhodné také pro scintilátory s vysokým 2D rozlišením. Ve Fyzikálním ústavu probíhá v současnosti vývoj těchto nitridových heterostruktur s různou tloušťkou aktivní oblasti pro různé scintilační aplikace (pro více informací viz např. A. Hospodková, M. Nikl, O. Pacherová, J. Oswald, P. Brůža, D. Pánek, B. Foltynski, E. Hulicius, A. Beitlerová, M. Heuken. InGaN/GaN multiple quantum well for fast scintillation application: radioluminescence and photoluminescence study. *Nanotechnology* 2014, 25, 455501).

Neutronové scintilátory

Absorpce neutronového záření je velmi závislá na složení materiálu a využívá se ve speciálních zobrazovacích metodách, detekci výbušnin, drog či štěpných materiálů pro výrobu jaderných zbraní. Neutronové záření se též využívá ke studiu struktury nových materiálů a v jaderných reaktorech či v experimentech s jadernou fúzí, potenciálním novým zdrojem energie pro lidstvo. Lze je též využít pro léčbu některých druhů rakoviny. Mezi neutronové scintilátory patří například lithiové sklo s příměsí Ce, které se vyznačuje rychlou odezvou 70 ns, ale poměrně nízkým světelným výtěžkem 7000 fotonů na jeden neutron. Dalším materiálem je krystal $\text{Cs}_2\text{LiLaBr}_6:\text{Ce}$, který má též rychlou odezvu a velmi vysoký světelný výtěžek 180 000 fotonů na jeden neutron. Tento materiál je však silně hygroskopický. Na Fyzikálním ústavu AV ČR byly studovány materiály jako hlinitan lithný aktivovaný titanem $\text{LiAlO}_2:\text{Ti}$ (odezva 2,5 mikrosekundy a výtěžek

10 000 fotonů na neutron) a stejně aktivovaný křemičitan lithný $\text{Li}_4\text{SiO}_4\text{:Ti}$ (odezva 50 mikrosekund a výtěžek 12 000 fotonů na neutron) – viz obr. 13. (J. Pejchal, Y. Fujimoto, V. Chani, F. Moretti, T. Yanagida, M. Nikl, Y. Yokota, A. Beitlerova, A. Vedda, A. Yoshikawa. Crystal growth and luminescence properties of Ti-doped LiAlO_2 for neutron scintillator. *Journal of Crystal Growth* 2011, 318/1/, s. 828–832; J. Pejchal, V. Babin, A. Beitlerova, S. Kurosawa, Y. Yokota, A. Yoshikawa, M. Nikl. Improvement of the growth of Li_4SiO_4 single crystals for neutron detection and their scintillation and luminescence properties. *Journal of Crystal Growth* 2017, 457/1/, s. 143–150.)

Aplikace scintilačních materiálů

LHC urychlovač, CMS detektor

Součástí komplexu výzkumných laboratoří CERN je největší světový urychlovač částic LHC (z anglického *Large Hadron Collider* – velký srážecí hadronů; hadrony jsou těžké částice jako např. protony, neutrony). Toto zařízení dokáže urychlit nabitě částice (typicky protony s kladným elektrickým nábojem) na extrémně vysoké energie a rychlosti. Při těchto rychlostech dochází k cíleným vzájemným srážkám, čímž se uvolní obrovské množství energie, dnes až desítky TeV. Při těchto extrémních srážkách vznikají velmi exotické částice, které v pozemských podmínkách vůbec neexistují a mohou nám pomoci porozumět základům fyziky a světa kolem nás. Jeden z detekčních systémů je ECAL (*Electromagnetic CALorimeter*) využívající scintilační materiály. (Pro další informace odkazujeme zájemce např. na <http://cms.web.cern.ch/news/how-cms-detects-particles>; <http://home.cern/topics/large-hadron-collider>.) Na scintilační materiál, který by obstál v těchto extrémních podmínkách, jsou kladeny velmi přísné nároky. Materiál musí odolat extrémně silnému magnetickému poli, musí být schopen fungovat při extrémně vysokých energiích dopadajících částic a musí být dostatečně rychlý, neboť čas mezi dvěma kolizemi je pouze 25 ns! Po zralé úvaze byl jako nejvhodnější materiál vybrán PWO. Při dopadu elektronů a fotonů ze srážek na krystal PWO v něm vznikají scintilační záblesky úměrné energii dopadajících částic, které se dále zpracovávají výkonnými počítači.

V ECAL detektoru je celkem použito 75 848 monokrystalů PWO o rozměrech $3 \times 3 \times 22$ cm, přičemž díky vysoké hustotě každý krystal váží více než 1,5 kg, celkově tedy detektor obsahuje více než 100 tun scintilačního materiálu.

Zvažuje se i možnost, že by se v budoucnosti scintilátory PWO velkého objemu nahradily scintilačními vlákny na bázi LuAG a LuAG:Ce³⁺, která by lépe dokázala charakterizovat různé druhy a energie záření na základně různé časové odezvy materiálů.

Za účelem optimalizace a použití krystalů v podobných detektorech dokonce vznikla speciální mezinárodní skupina, v níž je zastoupena i Česká republika (Fyzikální ústav AV ČR) a která má za úkol vyvíjet nové detekční koncepty na bázi scintilačních krystalů. Skupina se jmenuje Crystal Clear Collaboration (spolupráce na poli scintilačních krystalů), byla založena v roce 1990 a je koordinovaná z CERNu. Podílí se hlavně na zkoumání scintilačních materiálů vhodných pro detekci ve fyzice vysokých energií, v jaderné fyzice, v astrofyzice, při hledání temné

hmoty, ale i v lékařských zobrazovacích technikách a v průmyslových aplikacích. Navíc se hledají i nové způsoby přípravy a formy těchto materiálů (více informací viz <http://crystalclear.web.cern.ch/crystalclear/>).

Výpočetní tomografie – CT

V současnosti je CT (*computed tomography*, česky výpočetní tomografie) jedním z nepoužívanějších přístrojů v lékařství. Ať už se jedná o vyšetření pacientů po havárii, vyšetření kvůli rakovině nebo kontrolu správného srůstání složitějších zlomenin a mnoho dalších, CT vyšetření umožňuje lékařům nahlédnout do nitra pacienta a rozhodnout o případné léčbě. Princip je podobný jako u klasického rentgenu, ale jedním CT vyšetřením, na rozdíl od rentgenu, získáme obraz v různých řezech. Rentgenové záření se v těle pacienta různě zeslabuje v závislosti na složení jednotlivých tkání a na základě rozdílů změřeného zeslabení je tak možné v počítači zrekonstruovat obraz těla pacienta v příčném řezu. Nevýhodou je, že ani nejnovější CT přístroje nedokáží zobrazit měkké tkáně s vysokým kontrastem (jako například magnetická rezonance). Nejnovější generace CT pracuje s vějířovitým svazkem rentgenového záření, je tedy možné obsáhnout celý průřez vyšetřovaného objemu. Přímě naproti rentgenové lampě jsou na společné ose umístěny detektory uspořádané do oblouku. Během vyšetření rotuje celý systém kolem pacienta, u nejmodernějších přístrojů spolu s posouváním pacienta, čímž vznikne 3D spirálový obraz. Tím se zkracuje doba vyšetření na několik minut, v ideálním případě na desítky sekund. V detektorech se stále běžně používají krystaly BGO nebo CdWO_4 , dále pak keramické scintilátory na bázi $(\text{Gd}, \text{Y})_2\text{O}_3:\text{Eu}$ nebo $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Pr}$, ve vývoji jsou materiály na bázi cerem dopovaných multikomponentních granátů. Momentálně je CT jediný diagnostický přístroj, který umožňuje provést velmi rychlé a komplexní vyšetření s vysokým rozlišením. Díky rychlosti získání snímků je CT používáno mimo jiné k předoperačním vyšetřením polytraumat, kde pomáhá zachraňovat lidské životy (více informací viz např. <http://atominfo.cz/2013/04/vypocetni-tomografie-neboli-ct-jak-funguji-zobrazovaci-metody-v-medicine-ii/>).

Pozitronová emisní tomografie – PET

Pozitronová emisní tomografie (PET) je diagnostická metoda poskytující 3D zobrazení distribuce nitrožilně podaného radiofarmaka, vyzařujícího pozitrony v těle pacienta. Pozitrony (antielektrony čili elektrony s kladným nábojem), což jsou částice antihmoty, ihned interagují s elektrony v okolním prostředí a výsledkem této interakce, které se říká anihilace, jsou dva gama fotony s přesně definovanou energií (511 keV na jeden), které letí z místa vzniku po přímce opačnými směry (to vyplývá ze zákona zachování hybnosti). Tyto gama fotony jsou registrovány prstencem scintilačních detektorů kruhově rozmístěných okolo těla pacienta. Elektronika registruje pouze signály přicházející současně z protilehlých scintilačních detektorů a ostatní vyloučí. Tímto trikem je omezen vliv záření přicházejícího z okolí (tzv. přírodní pozadí). Těžko se například dva vysokoenergetické fotony kosmického záření treťí ve stejný okamžik do přesně protilehlých scintilačních detektorů. Na rozdíl od CT odpadá potřeba přírodního pozadí přezářit. Vzhledem k tomu, že dokážeme přesně detekovat dopad fotonu, známe jeho energii a víme, že v jeden okamžik vzniknou dva fotony letící od sebe po přímce, dokážeme pomocí výpočetní techniky velmi přesně určitě místo, kde fotony vznikly (ve

tkáních pacienta). Po registraci a počítačovém zpracování dat je možno trojrozměrně zobrazit distribuci radiofarmaka v organismu a zhotovit tomografické řezy v libovolných rovinách. Nejčastěji používaným radiofarmakem je fluorodeoxyglukóza (FDG), značená radioizotopem fluoru ^{18}F , který má poločas radioaktivní přeměny 109 minut. Jednoduše řečeno se jedná o radioaktivní cukr (glukózu). Po nitrožilní aplikaci FDG vstupuje do buněk stejnými mechanismy jako glukóza, ale nepodléhá následným metabolickým procesům, a je proto v buňkách zachytávána. Stupeň záchytu odpovídá spotřebě glukózy (metabolické aktivitě) ve tkáních. Vyšetření PET s ^{18}F -FDG se tedy nejvíce využívá v onkologické diagnostice, neboť většina zhoubných nádorů a jejich metastáz vykazuje zvýšený metabolismus glukózy. Přesnost určení polohy nádoru se pak pohybuje v jednotkách mm pro nejmodernější přístroje. Na vlastnosti scintilačních materiálů jsou kladeny podobné nároky jako v případě přístroje CT, tedy musí mít vysokou hustotu, efektivní atomové číslo, musí pracovat rychle a v jejich odezvě nesmí být pomalé komponenty. Z těchto důvodů se stále často používá BGO, modernější přístroje pak využívají např. $\text{LYSO}:\text{Ce}^{3+}$. Nejnovější generace PET skenerů navíc dokáže určit přesný čas, ve kterém je anihilační foton detekován. Vzhledem k tomu, že bližší foton dopadne do svého detektoru dříve, rozdíl v detekčních časech může pomoci zlepšit přesnost určení polohy anihilační události, tedy i nádoru. Tato metoda se označuje jako *time-of-flight PET*, neboli TOF-PET, česky PET s měřením času (<http://www.iss.infn.it/topem/TOF-PET/timeofflightpet.pdf>). Pro tyto účely jsou na detektory kladeny ještě vyšší nároky z hlediska rychlosti fungování a v současné době se klinicky používá $\text{LYSO}:\text{Ce}^{3+}$, Ca^{2+} , testují se ale např. i monokrystaly $\text{GAGG}:\text{Ce}$ s příměsí malého množství Mg. V České Republice se nachází více než desítka pracovišť vybavených zobrazovací technikou PET.

Geofyzikální sondování

Zajímavou aplikací scintilačních materiálů je hledání nových ložisek ropy, zemního plynu nebo rud. Do geologického vrtu se spustí takzvaná karotážní sonda obsahující radionuklidový zdroj a za ním dobře odstíněný scintilační detektor (aby detektor neregistroval záření z tohoto zdroje). Radionuklidový zdroj vysílá ionizující záření do okolí, ve kterém toto záření budí gama záření charakteristické pro prvky, které se v hornině nachází. Z energie záření tak můžeme získat informace o složení hornin v okolí vrtu, a tím i informaci o možné přítomnosti ložisek ropy, zemního plynu nebo rud. Scintilátory použitelné pro tuto aplikaci musí být dostatečně mechanicky odolné a teplotně stálé do vysokých teplot. Jedním z používaných materiálů je $\text{GSO}:\text{Ce}^{3+}$ ($\text{Gd}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}^{3+}$).

Elektronová mikroskopie

Elektronové mikroskopy jsou přístroje, které místo světelného svazku používají elektrickým polem urychlené elektrony a místo skleněných čoček jsou použity čočky elektromagnetické. Elektronové záření s podstatně kratší vlnovou délkou (~ 0,01–0,001 nm), než má viditelné světlo (450–780 nm), umožňuje dosáhnout mnohem vyššího rozlišení a dnešními nejmodernějšími přístroji dokáže zobrazit i objekty o velikosti 0,1 nm, tedy v rozměrech atomu (více např. na <http://www.fzu.cz/popularizace/elektronovym-mikroskopem-do-nitra-materialu-aneb-jak-vypada-jejich-struktura>). Princip fungování je schematicky znázorněný

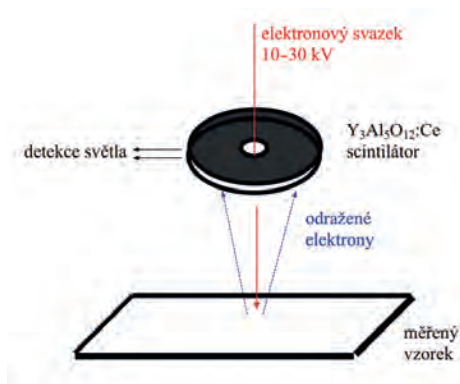
na obr. 13. Paprsek urychlených elektronů prochází centrálním otvorem v disku scintilátoru YAG:Ce, odráží se od povrchu zkoumaného vzorku a je zabrzděn v ploše scintilátoru. Tyto odražené elektrony nesou informaci o povrchu vzorku. Scintilační záblesky se vyvádí bokem disku na detektor a po jejich převedení na elektrický signál se tento signál použije k vytvoření obrazu povrchu vzorku. Významným světovým výrobcem detektorů právě pro elektronovou mikroskopii je česká společnost Crytur.

Vzdušné monitorování radioaktivní kontaminace pomocí bezpilotní helikoptéry

V Japonsku byla vyvinuta speciální detekční sonda, která může být připevněna k bezpilotní helikoptéře. Může tak z výšky ve vzduchu monitorovat výskyt radioaktivních izotopů, hlavně ^{137}Cs , především v oblasti jaderné elektrárny Fukušima. Sonda tedy musí být velmi lehká a spotřebovávat málo energie. Z materiálů pro detekci záření gama byly vybrány krystaly GGAG:Ce³⁺. Cesta helikoptéry byla naprogramována předem tak, aby při rychlosti 1 m/s a měřicím intervalu 10 m pokryla oblast $65 \times 180 \text{ m}^2$ ve výšce 10 m po dobu přibližně 30 minut. První pokusy dokazují, že v budoucnosti tento systém může sloužit pro rychlé a přesné měření dekontaminačního procesu, hledání horkých zón (lokální oblasti s prudce zvýšenou radioaktivitou) a sledování šíření ^{137}Cs životním prostředím v okolí Fukušimy; pro více informací viz *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2016, 53(12).

Předpovídání zemětřesení

Po velkém zemětřesení v Taškentu v roce 1966 a v souvislosti s pozorováním výskytu radonu v Číně se od roku 1966 začal v Japonsku budovat nový systém umožňující předpovídání zemětřesení na základě monitorování výskytu radonu v podzemních vodách. Jeho koncentrace v podzemních vodách s velkou pravděpodobností reflektuje strukturní změny ve skalním podloží a bylo zjištěno, že se před velkými zemětřeseními jeho obsah významně zvyšuje, až desetkrát. Detekovat radon v těchto podzemních podmínkách je možné pomocí scintilačních detektorů, které jsou dostatečně mechanicky odolné a mohou kontinuálně pracovat roky.



Obr. 14. Použití scintilačních krystalů v elektronové mikroskopii (převzato z M. Nikl. Moderní anorganické scintilační materiály: Fyzika a aplikace. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* 2003, 48/4/, s. 294-307).

Do oblasti laserové fyziky spadá i současný největší investiční projekt Fyzikálního ústavu AV ČR, v. v. i., kterým je Extreme Light Infrastructure (ELI). Tento projekt je součástí evropského plánu na vybudování nové generace velkých výzkumných zařízení vybraných Evropským strategickým fórem pro výzkumné infrastruktury (ESFRI). V Dolních Břežanech u Prahy proto FZÚ AV ČR buduje nejmodernější laserové centrum zaměřené na uživatelský výzkum. V ELI mají být realizovány výzkumné a aplikační záměry zahrnující interakci světla s hmotou v intenzitě, která je daleko větší než současně dosažitelné hodnoty. Laserové systémy ELI Beamlines budou dodávat ultrakrátké laserové impulsy trvající typicky několik femtosekund (10^{-15} s) a produkovat výkon až 10 PW. Díky tomu získáme přístup k novým poznatkům potenciálně využitelným např. v astrofyzice, lékařském zobrazování a diagnostice, nanotechnologiích, vývoji a testování nových materiálů, rentgenové optice atd. ELI chce také být atraktivní platformou pro výchovu nové generace vědců. Další informace o projektu ELI Beamlines je možné nalézt na www.eli-beams.eu/cs. V roce 2014 Fyzikální ústav oslavil 60 let od svého založení.

V oddělení optických materiálů, ze kterého pochází autoři předkládané brožury, se vyvíjejí technologie přípravy objemových a tenkovrstvých materiálových systémů, u kterých je potenciál využití převážně v optických aplikacích (luminiscenční a scintilační materiály, diamantové vrstvy, fotovoltaika, nanotechnologie). K měření charakteristik těchto a dalších, externě získávaných materiálů, se v oddělení používá široká paleta experimentálních technik z oblasti optických, magnetických a fotoelektronových spektroskopí. Kromě technologických a experimentálních aktivit jsou v náplni oddělení zahrnuty i aktivity teoretické, zejména z oblasti nukleárních procesů, fázových přechodů a kinetických modelů luminiscence.

Během let 2014–2017 byl výzkum v oddělení podpořen 24 českými a 20 mezinárodními projekty.

Domácí projekty byly uděleny převážně v rámci soutěže vyhlášené Grantovou agenturou České republiky. Bilaterální spolupráce se zahraničím (zejména s laboratořemi v Japonsku a Číně) jsou podpořeny bilaterálními projekty MŠMT či AV ČR.

Spolupráce s průmyslovými partnery v ČR (Crytur s. r. o, Nuvia) či v zahraničí (Tokuyama, GE) je podpořena výzkumnými projekty a dohodami. Oddělení je partnerem v evropských projektech EU FP7 „Luminet“, FP7-PEOPLE-2012-ITN, č. 316906 (2012–2016); Horizon2020 INTELUM, H2020-MSCA-RISE-2014, č. 368921 (2015–2018); COST TD1401 (2015–2018) a koordinátorem projektu H2020-TWINN-2015 ASCIMAT, č. 690599, 2016–2018.

V posledních letech raketově roste počet průmyslových, lékařských, bezpečnostních a vědeckých aplikací, při kterých je nutné detekovat neviditelné ionizující záření (např. gama záření, rentgenové záření). Předkládaná brožura se zabývá popisem scintilačních materiálů, které jsou pro tyto účely vhodné. Scintilační materiály přeměňují energii vysokoenergetického ionizujícího záření na fotony z oblasti ultrafialového nebo viditelného záření, které se pak dají běžnými fotodetektory převést na elektrický signál a dále zpracovat. Mezi neznámější aplikace patří výpočetní tomografie (CT), pozitronová emisní tomografie (PET), detektory urychlovače částic LHC v Cernu nebo moderní monitorovací drony používané kolem Fukušimy v Japonsku.

V EDICI VĚDA KOLEM NÁS PŘIPRAVUJEME:

P. Soudek, R. Podlipná, Š. Petrová, P. Landa, T. Vaněk:

Fytoremediace a možnosti její aplikace

Milan Řípa: **Soukromý kapitál v termojaderné fúzi**

Jan Vít: **Jan Patočka**

DOSUD VYŠLO:

Jaroslav Pánek: **Historický ústav AV ČR**

Michaela Tučková: **Pamětní místa na komunistický režim**

Marie Makariusová: **Biografický slovník českých zemí**

Edice Věda kolem nás | Výzvy a otázky
Scintilátory kolem nás | *Vítězslav Jarý, Jan Pejchal*

Vydalo Středisko společných činností AV ČR, v. v. i. Grafická úprava dle osnovy Jakuba Krče a sazba WOW, spol. s r. o. Odpovědná redaktorka Petra Královcová. Vydání 1., 2017. Ediční číslo 12200. Tisk WOW, spol. s r. o., Washingtonova 1567/25, 110 00 Praha 1.

ISSN 2464-6245

Evidováno MK ČR pod e. č. E 22344

Další svazky získáte na:

www.vedakolemnas.cz | www.academiaknihy.cz | www.eknihy.academia.cz