

Obrázek 122 Schéma detekce urychleného a odraženého elektronového svazku v elektronovém mikroskopu; podle [315]

## 4.4 Vojenské aplikace scintilátorů

Válečné konflikty provázejí lidstvo od nepaměti. V současnosti můžeme díky jejich silné medializaci nabýt dojmu, že se jejich počet zvyšuje, ale statistiky zatím naštěstí dokazují opak [317]. S hrozbou použití jaderných zbraní vyvstala potřeba monitorování zamoření území zasaženého radioaktivním spadem. Podobné, ale ne tak rozsáhlé zamoření může způsobit též tzv. „špinavá bomba“. Jedná se o zařízení, které za použití běžné výbušniny rozptýlí do okolí radioaktivní materiál. Hrozba použití takovéto zbraně je vzhledem k mezinárodní bezpečnostní situaci poměrně aktuální.

Česká republika disponuje tzv. Armádní radiační monitorovací sítí (ARMS), která funguje v součinnosti se Státním úřadem pro jadernou bezpečnost (SÚJB) a Státním ústavem radiační ochrany (SÚRO). Síť se skládá z měřících sond rozptýlených po celé republice. Ty jsou především plynové, přesněji Geigerovy–Müllerovy trubice, avšak dvě stanice jsou vybaveny spektrometrickým detektorem na bázi scintilátoru NaI:Tl pro určení hrubé spektrometrické situace. Její součástí jsou i mobilní skupiny [318]. Pro monitorování se využívá celá řada různých detektorů včetně plynových. My se ale samozřejmě zaměříme na scintilátory. Již nyní můžeme předeslat, že pro monitorování zamoření se



Obrázek 123 Specialisté SÚRO, vojenští chemici a piloti před vrtulníkem českého letectva Mi-17 se systémem IRIS při cvičení v r. 2018; převzato z [319]

u nás používá téměř výlučně „nesmrtelný“ NaI:TI, který svými parametry i cenou pro tyto účely bohatě postačuje.

Koordinaci leteckého monitorování našeho území má (mimo jiné) na starost 314. centrum výstrahy pro zbraně hromadného ničení v Hostivici u Prahy, které sbírá a vyhodnocuje data z ARMS. K monitorování používá vrtulník Mil Mi-17 s osádkou od 243. vrtulníkové letky z 24. základny dopravního letectva Praha-Kbely (viz obrázek 123) vybavený monitorovacím systémem AIRIS (*Airborne Integrated Radiation Information System*). Je to letecký gama spektrometr, který je schopen ve výšce až dvě stě metrů nad terénem detekovat přírodní záření gama emitované ze zemského povrchu. Měření obvykle probíhá ve výšce sto metrů nad terénem při rychlosti cca 100 km za hodinu. Výsledkem měření je záznam energetického spektra ionizujícího záření a naměřené hodnoty se po skončení měření musí dále zpracovávat a vyhodnocovat. Měřicí systém AIRIS je nutné v průběhu měření znovu zkalibrovat a odečíst jednotlivé složky pozadí (kosmické záření, radiační pozadí samotného vrtulníku a produkty přeměny

atmosférického radonu). Pro tyto účely je vhodné provést měření nad dostatečně velkou vodní plochou, která účinně odstíní záření gama vyzařované ze zemského povrchu. Tento systém vychází ze staršího modelu s označením IRIS, který je ve „výzbroji“ SÚRO. Za zmínku stojí jeden zajímavý technický problém, který vyvstal při prvních pokusech se systémem IRIS. Zpočátku systém měřil velmi vysoké radiační pozadí, jehož původ se nedařilo určit. Nakonec se zjistilo, že zdrojem rušení je námrazový senzor nad kokpitem Mi-17. Ten pro sledování námrazy využívá záření beta izotopu  $^{90}\text{Sr}$ , které v hliníkové konstrukci generuje brzdné rentgenové záření, jež bylo příčinou zvýšeného pozadí. Senzor bylo proto nutné odstranit a sledování námrazy bylo řešeno jiným způsobem [320].

Hlavní komponentou systému AIRIS je gama spektrometr GRS10 (*Gamma Ray Spectrometer*) s rozšířením o citlivou Geigerovu–Müllerovu sondu EGM-02-OVP. Součástí systému jsou dále satelitní navigační systém na bázi modulu GPS, navigační displej pilota PGU, radarový výškoměr, kamera pro GeoImage a odolný notebook jako ovládací, vyhodnocovací a zobrazovací jednotka. Systém vyhodnocuje veškerá data v reálném čase. Ta jsou dále zpracovávána, ukládána a zobrazována na palubě vrtulníku na pracovní stanici operátora v předem připravené mapě. Aktuální letové parametry předem naplánovaného projektu jsou zobrazovány na displeji pilota v kokpitu vrtulníku. K tomuto účelu je využíván software dodaný přímo výrobcem zařízení. Zařízení je konstruováno primárně pro vestavbu do vrtulníku, lze je však použít i s jiným vhodným typem letounu nebo pro pozemní radiační průzkum. Spektrometr GRS10 je sestavou čtyř scintilačních detektorů NaI:Tl s jednotlivým objemem  $4,2 \text{ dm}^3$ , uložených po dvou kusech v jednom přepravním obalu s hmotností přibližně 50 kg. Energetický rozsah detektoru je 35–3000 keV ve spektru rozděleném do 1024 kanálů, maximální počet pulzů na krystal je  $250\,000 \text{ s}^{-1}$ . V dobách míru se tento systém používá například k monitorování zbytkového spadu z černobylské havárie na našem území. Radioaktivní spad po havárii v Černobyli je na našem území patrný dodnes, hlavně v Jeseníkách a na Šumavě. Jedná se sice o nízké hodnoty, ale i po třiceti letech od havárie dobře detekovatelné. Třicet let je také poločas rozpadu radionuklidu  $^{137}\text{Cs}$  (cesium), který se v půdě na našem území nachází. Dlouhodobě se ale spekuluje také o dopadu černobylské havárie na území Libereckého kraje, například na Semilsku, kde byla v osmdesátých letech naměřena nadprůměrná hodnota zamoření půd radioaktivním  $^{137}\text{Cs}$ . Je zajisté dobře, že armáda ČR disponuje technickými prostředky a odborníky, kteří jsou schopni tato měření provádět. Obdobných přístrojů na měření radiace je v Evropě jen do deseti kusů, v zemích bývalého východního bloku jsou pouze dva, oba v Česku [321].

Pro monitorování radiace v konkrétním místě v mírových i válečných podmínkách se používá například mobilní polní laboratoř PPCHL-AL-2/R, jež je na obrázku 124, případně novější verze PPCHL-AL-3/R. Je určena k provádění následujících činností:

- kvalitativní a kvantitativní analýza záření gama pevných a kapalných vzorků, jakož i stěrů a vzorků vzdušného aerosolu,
- měření celkové aktivity alfa a beta ve vzorcích pevných a kapalných, jakož i stěrech a vzorcích vzdušného aerosolu,
- monitorování úrovně radiace, neutronového záření,
- měření povrchové kontaminace alfa, beta, beta + gama [322]. Kromě různých systémů odběru, zpracování a měření vzorků je mimo jiné rovněž vybavena gama spektrometrem na bázi scintilátoru NaI:Tl [320].

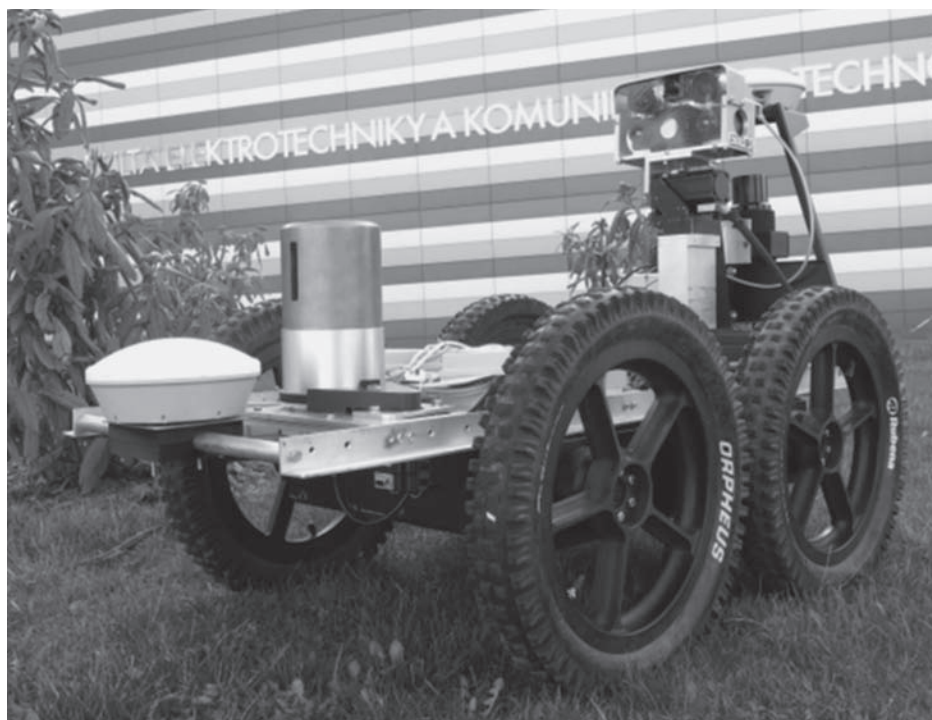
V současné době probíhá taktéž zavádění spektrometrických detekčních systémů pro pozice velitelů čet radiačního a chemického průzkumu a dále pak pro specializované týmy určené k odběru vzorků. Jedná se o identické produkty, které jsou zavedeny u polní laboratoře, tedy identiFINDER R400, avšak zde bude již ve verzi nikoliv s krystalem NaI:Tl, avšak se scintilátorem LaBr<sub>3</sub>:Ce.



Obrázek 124 Mobilní laboratoř PPCHL-AL-2/R na podvozku Tatra 815 [323]

Poslední součástí, tou nejsložitější, je stacionární armádní laboratoř, jež spadá pod Univerzitu obrany v Brně. I přes zjevné nevýhody scintilační spektrometrie pro kvalitativní a kvantitativní analýzu oproti polovodičovým detektorům je i tato laboratoř vybavena scintilačními detektory určenými převážně pro zásah při krizových situacích. Jedná se o systém využívající opět scintilátor NaI:Tl v kombinaci s neutronovou sondou na bázi plynového detektoru plněného  $^3\text{He}$ .

Někdy ovšem hrozí, že podmínky v místě, kde je třeba provádět monitorování, jsou tak nebezpečné, že by mohly představovat riziko pro člověka. Pro takové případy jsou nasazovány robotické monitorovací prostředky, jako například robot Orpheus X-4 vyvíjený v rámci spolupráce Vysokého učení technického a Vojenského výzkumného ústavu v Brně (viz obrázek 125). Pro něj byl navržen speciální detekční systém. Obsahuje dva detektory, jeden všesměrový a druhý směrově citlivý. Oba detektory jsou založeny na scintilačních krystalech NaI:Tl o velikosti  $5 \times 5$  cm spojených s fotonásobiči (Nuvia, a. s., ČR). Měřicí



Obrázek 125 Robot Orpheus X-4 s detekčními zařízeními na bázi scintilátorů NaI:Tl (v přední části); podle [325]

elektronika byla speciálně vyvinuta tak, aby se zabránilo zpoždění a zkreslení dat, jež je obvyklé u komerčních zařízení. Elektronika každou sekundu zpracovává 256kanálové spektrum záření gama. První testy zahrnující lokalizaci zařízení dopadly úspěšně. Plánuje se vylepšení systému pomocí plynových detektorů pro měření vysokých dávek záření [324].

## 4.5 Aplikace neutronového záření

V následující kapitole si podrobněji rozebereme některé aplikace využívající neutronového záření a neutronových scintilátorů, o kterých jsme se již zmínili v kapitole o konkrétních materiálech.

### 4.5.1 Zobrazování pomocí neutronů

Zobrazování objektů pomocí neutronů, tzv. neutronová radiografie, v současné době zažívá prudký rozvoj, který též souvisí s budováním tzv. tříštivých neutronových zdrojů. Jsou to výzkumná zařízení, která generují neutronové záření pomocí jaderné reakce vysokoenergetických protonů z urychlovače a jádra některého z těžších prvků, například olova.

Jaderné tříštění (anglicky *spallation*) je vyvoláno nasměrováním vysoce energetických nabitých částic, nejčastěji protonů, na kovový terč. Nabité částice produkované urychlovačem se při energiích několika stovek MeV sráží s jednotlivými nukleony (tj. neutrony nebo protony) v terčovém jádru, které pak unikají z místa interakce nebo vstupují do dalších interakcí v jádru (tzv. jaderná kaskáda). Tento proces poskytuje vysoce vzbuzené zbytkové jádro, které se deexcituje uvolněním dalších neutronů nebo protonů. Pro energii nižší než ~15 MeV už dále nedochází k emisi dalších nukleonů a zbylé jádro se nazývá produkt tříštivé reakce. Celý tento proces může uvolnit 10–15 neutronů na jednu příchozí nabitou částici. Tříštivý neutronový zdroj vyžaduje výkonný urychlovač protonů. Protony jsou fokusovány a vedeny magnety uvnitř evakuovaných trubic do silně stíněného tříštivého neutronového zdroje. Výhody použití tříštivého zdroje ve srovnání s jaderným reaktorem spočívají ve výrazně vyšší jaderné bezpečnosti: není potřeba žádný štěpný materiál, není třeba regulovat řetězovou štěpnou reakci a během provozu je vyprodukováno výrazně méně radioaktivních odpadů. Neutrony generované jak ve štěpném jaderném reaktoru, tak v tříštivém zdroji mají příliš vysokou energii na to, aby mohly být využity, a proto musí být zpomaleny rozptylovými procesy až na energii, která odpovídá

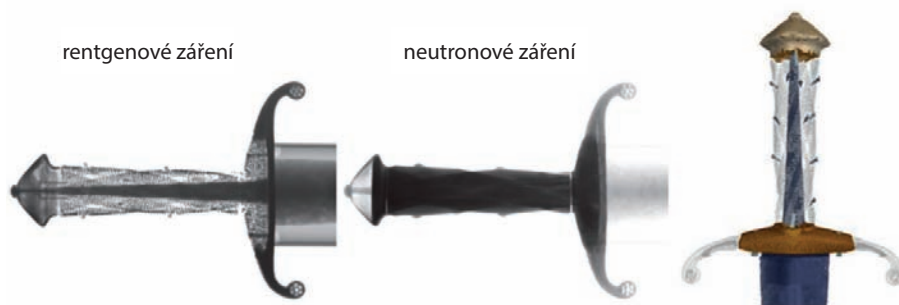
tepelným kmitům v látce ( $\sim 2200$  m/s). Toho lze docílit prostřednictvím tzv. moderátoru, příkladem může být tzv. těžká voda ( $D_2O$ ). Moderaci získáme již zmíněné tepelné neutrony. Tzv. studené neutrony jsou produkovány rozptylem tepelných neutronů na studených molekulách, např. na kapalném deuteriu při teplotě  $-250$  °C.

Jedním z prvních takových zařízení svého druhu je tříštivý zdroj SINQ ve švýcarském Paul Scherrer Institute (PSI) [92], který je v provozu od roku 1996. Neutronový tok činí  $10^{14}$  n.cm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> a produkované neutrony jsou zpomaleny (moderovány) zmíněným kapalným deuteriem. Ke zdroji SINQ je připojena řada experimentálních zařízení pro studium materiálů pomocí neutronového rozptylu či difrakce. Drtivá většina z nich používá plynové detektory na bázi <sup>3</sup>He. Ovšem experimentální stanice pro zobrazování pomocí tepelných neutronů NEUTRA využívá scintilátor ZnS:Ag/LiF [95]. Studené neutrony využívá experimentální zařízení ICON [96].

Interakce volného neutronu s atomy nejsou ovlivněny jejich elektronovým obalem – proto může neutron proniknout hluboko do hmoty. Způsob interakce neutronu s materiálem se velmi liší podle izotopového složení a energie neutronu. Jak již bylo řečeno, některá atomová jádra (např. bor, lithium, kadmium, gadolinium) mají velký účinný průřez pro záchyt tepelných neutronů. Materiály obsahující takové prvky jsou vhodné jako stínící materiály nebo materiály pro detekci neutronů. Jiná atomová jádra (např. hliník nebo olovo) interagují s neutrony jen slabě, pro neutronové záření jsou tedy téměř průhledné. Některá jádra neutrony spíše odchylují od roviny trajektorie, vyvolávají tedy rozptyl neutronů (toto je případ většiny izotopů). Rozptyl se nejvíce uplatňuje v materiálech bohatých na vodík. Stejně jako jiné elementární částice, i neutrony se chovají nejen jako hmotné částice, ale také jako vlny. Platí pro ně tedy analogické zákony jako pro šíření světla, tj. například zákony lomu, difrakce nebo interference, které přesně popisují některé interakce neutronů s hmotou.

Pro výzkum materiálů mají tepelné nebo studené neutrony zvláštní význam, protože jejich energie nebo vlnová délka je vhodná k objasnění struktury a dynamiky procesů v pevných látkách. Závislost pravděpodobnosti interakce neutronů s hmotou na energii nebo vlnové délce lze použít k tvorbě proměnného kontrastu obrazu v neutronových radiografických aplikacích. Výtěžek reakcí pro detekci neutronů roste při nízkých energiích neutronu, což je předpoklad pro dostatečnou citlivost a prostorové rozlišení v neutronovém zobrazování.

Co se týče rozdílů zobrazování pomocí rentgenového záření a neutronů, jeden z hlavních spočívá v tom, že rentgenové záření je elektromagnetické záření, které interaguje s elektrony v elektronovém obalu atomu. Pravděpodobnost



Obrázek 126 Radiografie (vlevo) a tomografická rekonstrukce (vpravo) dřevěné rukojeti středověkého meče. Kombinace neutronové a rentgenové tomografie odhaluje vnitřní tvar dřevěných částí a jejich bohatou kovovou výzdobu; podle [326]

interakce silně koreluje s počtem elektronů v atomu prvku, tj. atomovým číslem  $Z$ . Těžké materiály rentgenové záření zeslabují mnohem výrazněji než lehké materiály, jako je např. tkáň, voda, či plasty. Pro interakci tepelných nebo studených neutronů s hmotou ale žádná obdobná závislost neexistuje. Absorpce rentgenového záření (fotoelektrický efekt) je dominantní reakce při nízkých energiích fotonů, zatímco rozptyl (Rayleighův rozptyl a Comptonův efekt) převládá při vyšších energiích. Znázorněme si doplňkové charakteristiky rentgenového záření a neutronů na dvou konkrétních vzorcích, dřevěném držadle meče ze středověku a švýcarském armádním noži (obrázky 126, 127). Zkoumání vnitřní struktury předmětů kulturního dědictví a související možné výrobní techniky vyžaduje metody nedestruktivního testování.

Rentgenové zobrazování se v současnosti používá naprosto běžně, zatímco neutronové zobrazování pouze ve speciálních případech. Kombinace obou modalit poskytuje trojrozměrné informace s doplňkovým kontrastem. V případě dřevěné rukojeti rentgenový obraz ukazuje bohatou dekoraci vyrobenou z malých vložek cínového amalgámu a neutronový obraz ukazuje různé dřevěné části a jejich tvary [326].

Zatímco rentgenové zobrazování může být dnes prováděno rutinně s prostorovým rozlišením  $1\ \mu\text{m}$  v mnoha zařízeních po celém světě, stejné prostorové rozlišení je pro neutronové zobrazování stále nedosažitelným cílem. Důvody tohoto zpoždění jsou dva – prvním je nižší dostupnost a mnohem nižší tok neutronů ve srovnání se zdroji rentgenového záření a druhým důvodem je složitost procesu detekce neutronů. Kvůli tomu je počet neutronových zařízení, u kterých je běžně prováděno zobrazování s prostorovým rozlišením asi  $15\ \mu\text{m}$ , zatím

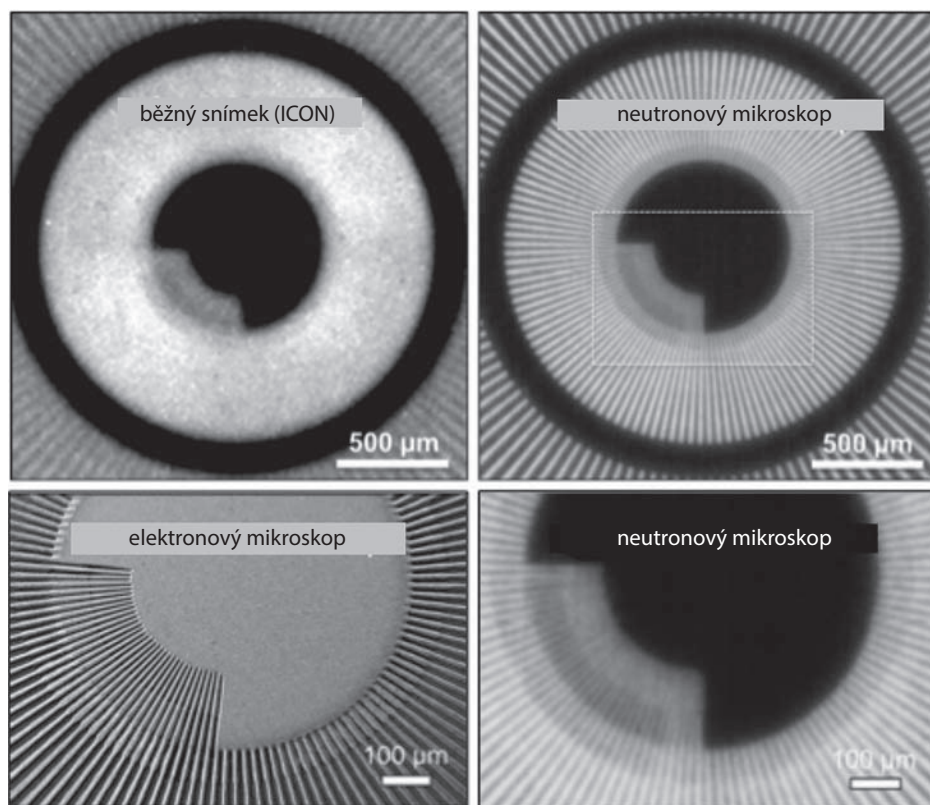




Obrázek 127 Transmisní radiografie (vlevo) a tomogram (vpravo) švýcarského armádního nože. Na rentgenovém obraze vynikají kovové části, zatímco plastové části jsou téměř průhledné. Neutronový obraz naopak zvýrazňuje plastové části a ochrannou olejovou vrstvu; podle [326]

stále nízký. Vysoké rozlišení stále zůstává hlavním požadavkem na neutronové zobrazovací techniky.

Existuje mnoho odvětví, která by mohla v budoucnu významně těžit z neutronových zobrazovacích technik s vysokým rozlišením, od elektrochemie a materiálů pro jadernou bezpečnost přes fyziku půdy až k zobrazování různých biologických systémů. V důsledku toho byl v PSI zahájen projekt pro vývoj neutronového mikroskopu s cílem vyvinout nástroj pro neutronové zobrazování s velmi vysokým rozlišením. Hlavním technickým cílem bylo dosažení prostorového rozlišení pod  $5\ \mu\text{m}$  a zachování přiměřené doby expozice (tj. méně než 10 minut pro jednotlivé snímky). Neutronový mikroskop sám o sobě není založen na neutronové optice, ale na běžné optice s velkou aperturou, která je připojena k vysoce výkonnému neutronovému scintilátoru na bázi oxysulfidu gadolinitého dopovaného ionty terbia ( $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}^{3+}$ ). První prototyp byl sestaven a testován na PSI a dovoluje pořizovat snímky s prostorovým rozlišením asi  $8\ \mu\text{m}$ , což je asi čtyřnásobné vylepšení rozlišení (viz obrázek 128) ve srovnání s dosud běžně používanými zařízeními [327]. V rámci projektu bylo vyrobeno scintilační stínítko ze zmíněného oxysulfidu gadolinitého obohaceného o izotop  $^{157}\text{Gd}$  a dopovaného terbiem [328]. Stínítko z takto izotopicky obohaceného materiálu poskytuje téměř čtyřnásobné vylepšení neutronových radiogramů díky vyšší intenzitě scintilačního světla ve srovnání s materiálem s neobohaceným



Obrázek 128 Srovnání snímků testovacího předmětu Gadolinium Siemens Star z běžného neutronového radiogramu ze zařízení ICON (vlevo nahoře), neutronového mikroskopu (vpravo nahoře a dole) a z elektronového mikroskopu (vlevo dole); podle [327]

(přírodním) složením. Toto zjištění poskytuje potenciál pro další zlepšení prostorového a časového rozlišení neutronového zobrazování. Usazení objektivu a podstavce na vzorky je vidět na obrázku 129, schéma vlastního detektoru a objektivu pak na obrázku 130.

Experimentální zařízení NEUTRA a ICON se dále využívají pro různá tomografická zobrazování například v archeologii, biologii, materiálovém inženýrství a dalších. Umožňují i dynamické zobrazování velmi rychlých procesů, jako je třeba snímkování běžícího spalovacího motoru a podobně. Zařízení ICON bylo též použito k zobrazení růstu scintilačního krystalu Bridgmanovou metodou v reálném čase (viz obrázek 131). Jednalo se o růst materiálu BaBrCl:Eu.