

STANOVENÍ IRIDIA V METEORITU KOINCIDENČNÍ INSTRUMENTÁLNÍ NEUTRONOVOU AKTIVAČNÍ ANALÝZOU

IBRAHIMA NDIAYE^{a,b}, MILOSLAV VOBECKÝ^{a,c}, STANISLAV POSPÍŠIL^a, JAN JAKUBEK^a a TOMÁŠ HOLÝ^{a,b}

^a Ústav technické a experimentální fyziky ČVUT, Horská 3a/22, 128 00 Praha 2-Albertov, ^b Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT, Břehová 7, 115 19 Praha 1, ^c Ústav analytické chemie AV ČR, Vídeňská 1083, 142 20 Praha 4

ibrahima.ndiaye@utef.cvut.cz, vobecky@biomed.cas.cz

Došlo 13.6.05, přepracováno 13.3.06, přijato 22.6.06.

Klíčová slova: gama-gama koincidenční spektrometrie, koincidenční instrumentální neutronová aktivační analýza, spektrální interference, iridium, meteorit

Úvod

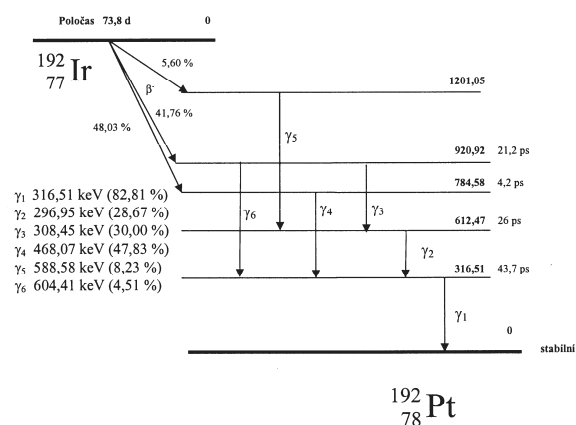
Princip aktivační analýzy formulovali a experimentálně doložili v roce 1936 G. Hevesy a H. Leviová^{1,2}. K praktickému uplatnění neutronové aktivační analýzy (NAA) došlo až po druhé světové válce, kdy se rozšířily možnosti ozařování neutrony v experimentálních jaderných reaktorech.

Objev polovodičového Ge(Li) detektoru záření gama s vysokým energetickým rozlišením³ v 60. letech minulého století umožnil m.j. i realizaci a rozvoj nedestrukční metodické varianty NAA zvané instrumentální neutronová aktivační analýza (INAA)^{4,5}. Do té doby užívané scintilační NaI(Tl) detektory záření gama vykazovaly oproti polovodičovým detektorům Ge(Li) asi 30 × horší rozlišení. Postup INAA, na rozdíl od radiochemické varianty neutronové aktivační analýzy (RNAA), nevyužívá k radio-metrickému stanovení chemickou separaci jednotlivých prvkových frakcí indukovaných radionuklidů. Při aplikaci INAA lze po zpracování naměřených spekter záření gama emitovaného vzorky a prvkovými standardy stanovit současně obsahy řady prvků. Tato jednoduchá metoda má i přes velmi široké analytické uplatnění v některých případech určitá omezení. I při vysokém energetickém rozlišení polovodičových detektorů se totiž mohou projevit spektrální interference, k nimž dochází při výskytu obtížně rozlišitelných blízkých čar záření gama od dvou či více radionuklidů, které indikují různé prvky analyzované matrice.

Jestliže je rozpad radionuklidu indikujícího obsah stanoveného prvku provázen emisí alespoň dvou kvant gama v kaskádě, lze k omezení interference čar použít koincidenční detekce těchto kvant^{6–18}.

Článek pojednává o využití koincidenční instrumentální aktivační analýzy ke stanovení obsahu iridia v prvkově složitě matrici meteoritu. Stanovení iridia prostřednictvím radionuklidu ¹⁹²Ir zde rozebereme jako příklad možného využití instrumentální metody NAA ve spojení s koincidenční gama-gama spektrometrií (CINAA). V rozpadovém schématu ¹⁹²Ir na obr. 1 jsou pro přehlednost uvedeny pouze intenzivní gama kaskádní přechody, které podstatným způsobem přispívají ke koincidenčním událostem. Z hodnot intenzit přechodů gama je vidět, že ke koincidenčnímu stanovení iridia jsou analyticky vhodné zvláště první čtyři čáry s energiemi nižšími než 500 keV. Při něm se, na rozdíl od rutinní aplikace INAA, u těchto čar neuplatňují nežádoucí spektrální interference čar jiných radionuklidů přítomných v aktivovaném vzorku a čáry se nacházejí na nižším, koincidenčně potlačeném, Comptonovském pozadí.

Koincidenční spektra jsou většinou zpracovávána jako jednorozměrná, která představují amplitudová spektra získaná s jedním detektorem za podmínky, že došlo ke koincidenční události i v druhém detektoru. Obecnou formou koincidenčních spekter jsou však tzv. dvourozměrná spektra, v nichž se na jedné ose (např. x) vynáší amplituda události registrované v jednom detektoru, na ose y amplituda události registrované současně ve druhém detektoru a na ose z pak počet takových událostí. Tato skutečnost lze s výhodou využít k výraznému zvýšení selektivity a následně správnosti stanovení.



Obr. 1. Zjednodušené rozpadové schéma nuklidu iridia ¹⁹²Ir s vyznačením přechodů významných pro analytické použití koincidenční spektrometrie; v závorkách u energií přechodů γ₁ až γ₆ jsou hodnoty jejich intenzit²²

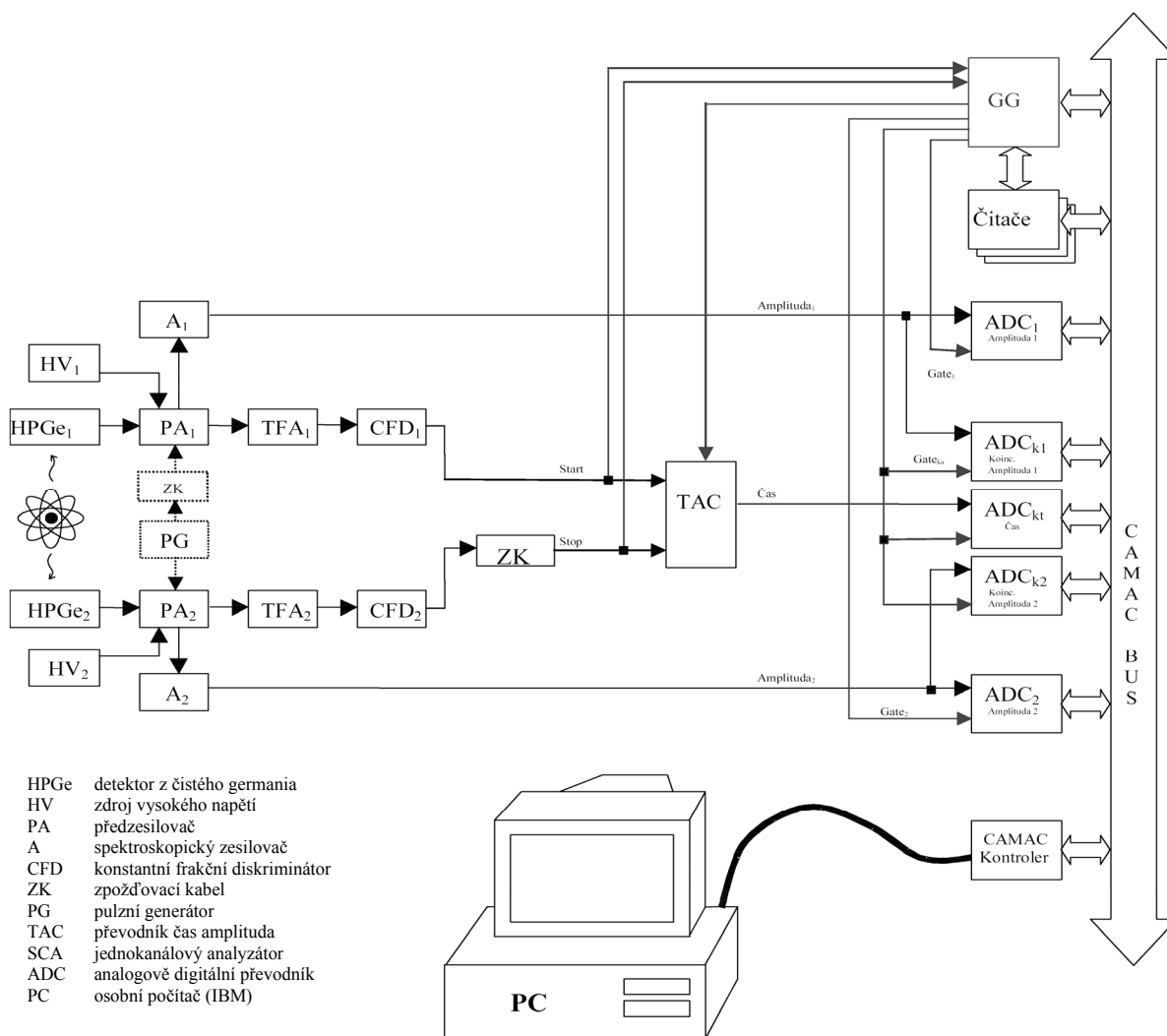
Experimentální část

Gama-gama koincidenční spektrometrický systém

Použitá aparatura byla spolu se softwarovým vybavením vyvinuta v rámci dizertační práce a projektu GA ČR 203/95/0260 (cit.^{19–21}). Následně pak byla testována pro aplikace v koincidenční neutronové aktivační analýze. Její hlavní předností je flexibilita a schopnost současného měření spekter jak v konvenčním režimu měření s jednotlivými detektory nezávisle, tak v režimu koincidenčním a také možnost zaznamenávat průběh celého měření jako „událost za událostí“. V tomto záznamu jsou uloženy události, které obsahují nejen energie jednotlivých koincidujících gama kvant, ale i časový odstup mezi jejich detekcí. Přesnost měření času je kolem 20 ns (dáno typem detektorů). Tato významná vlastnost umožňuje nastavit

šířku koincidenčního okna ΔT až po ukončení měření a optimalizovat tak poměr mezi počtem pravých a náhodných koincencí. Schéma aparatury je znázorněno na obr. 2. Aparatura se skládá ze dvou detektorů z čistého germania (HPGe) se zabudovanými nábojově citlivými předzesilovači (PA). Relativní účinnosti obou detektorů jsou přibližně stejné, a pro energii záření gama 1332,5 keV radionuklidu ^{60}Co jsou kolem 21 %. Výsledná odpovídající relativní koincidenční účinnost je v takovém případě kolem 4 %. Oba HPGe detektory vykazují energetickou rozlišovací schopnost, šířku píku v poloviční výšce odpovídající lince 1332,5 keV ^{60}Co , FWHM, 1,90 keV.

V každé větvi je signál z předzesilovače přiveden do spektrometrického zesilovače (A) a pak do analogově digitálního převodníku ADC (4096 kanálů). Výstup ADC je čten počítačem prostřednictvím CAMAC sběrnice. Současně je signál z každého detektoru veden do rychlé trasy, v níž je určen čas příchodu signálu, z něhož se odvozuje,



Obr. 2. Blokové schéma multiparametrického koincidenčního spektrometru²¹

zda došlo ke koincidenční události. Každá rychlá trasa se skládá z následujících modulů (z praktických důvodů uvádíme české názvy spolu s anglickými ekvivalenty – zkratky názvů modulů jen anglicky):

Rychlý tvarovací zesilovač – „Timing Filter Amplifier“ (TFA, Canberra 2111), který zlepšuje poměr signálu k šumu a optimalizuje náběžnou hranu impulsu v rozmezí 20 ns až 200 ns pro potřeby dalšího určení času příchodu impulsu.

Diskriminátor s konstantní frakcí – „Constant Fraction Discriminator“ (CFD, Canberra 2126), se v aparatuře užívá k určení času příchodu impulsu, a to nezávisle na jeho amplitudě.

Zpožďovací kabel – „Delay“, kabelové zpoždění, které zajišťuje, aby pro každou koincidenční událost signál STOP z druhého detektoru přišel do modulu TAC později než signál START z prvního detektoru.

Analogový převodník čas-amplituda – „Time-to-Amplitude Converter“ (TAC, Canberra 2145), slouží k vytvoření časového spektra událostí zaznamenaných v nastaveném časovém okně. Amplituda jeho výstupního signálu je časovým odstupem mezi signály START a STOP na jeho vstupech.

Generátor spuštění – „Gate Generator“ (GG, označení Gate nebylo pro jednoduchost přeloženo. Gate_{ka} odpovídá spuštění koincidenčních amplitud). V tomto modulu se sledují časové posloupnosti příchodu a zpracování signálu v jednotlivých větvích systému. Modul byl vyvinut speciálně k určování živé doby měření (či komplementárně mrtvé doby) v každé větvi aparatury, ať už ve dvou větvích konvenčních či dvou koincidenčních. Modul umožňuje i evidenci efektu nakupení událostí („pile-up“) ²¹. Při každé koincidenční události dá generátor spuštění (GG) příkaz všem ADC ke konverzi, jen pokud nedošlo k efektu nakupení (pile-up). V případě, že došlo k nekoincidenční události v jedné z větví 1 či 2, spustí se konverze jen v příslušném konvertoru, t.j. v ADC₁ nebo v ADC₂. Údaje o měřených amplitudách impulsů jsou z konvertorů sbírány řadičem ze sběrnice CAMAC do PC, kde jsou ukládány v digitální formě k pozdějšímu zpracování off-line, čili po ukončení měření. Jestliže došlo v některé větvi ke ztrátě či poškození události v důsledku efektu nakupení událostí, generátor spuštění generuje pulz registrovaný čítačem. Multiparametrický koincidenční spektrometr je řízen osobním počítačem, který je vybaven speciálně vyvinutým programem ^{19,21}, jenž umožňuje:

- řízení měření a ukládání dat. Program je schopen obsluhovat 8 AD převodníků, 8 čítačů, případně i další moduly typu CAMAC;
- pořídit protokol o každém realizovaném měření. Obsahuje informace o konfiguraci aparatury, o časech a datech zahájení a ukončení měření, o počtu naměřených událostí, o stavech čítačů údajů z GG při ukončení, o souborech, v nichž jsou uložena naměřená data a o stavu dalších uživatelem definovaných on-line (neboli v průběhu měření) charakteristik měření;
- off-line (neboli po ukončení měření) zpracování naměřených dat buď ve formě jednotlivých spekter vy-

tvorených za různých koincidenčních podmínek či dvourozměrných koincidenčních spekter, v nichž je na jedné ose vynášena amplituda z prvního detektoru a na druhé ose amplituda z druhého detektoru.

Vzorek a prvkový standard

Popsaný koincidenční systém byl využit ke CINA meteoritu Morávka. Vzorek meteoritu Morávka (obecný chondrit typu H5-6, pád 6. května 2000 ve 13 h 52 min v obci Morávka a okolí nazvaný dle místa dopadu) ²³ byl získán z Astronomického ústavu AV ČR. Vzorek odebraný mechanicky z povrchu meteoritu o hmotnosti 6,715 mg byl zataven do pouzdra z polyethylenové fólie tloušťky cca 0,1 mm. Byla připravena i sada prvkových standardů. K ozařování neutrony byly tyto materiály jednotlivě zabaleny do hliníkové fólie. K přípravě standardů byly použity stechiometrické sloučeniny čistých preparátů (NH₄)₂[IrCl₆] (Johnson-Matthey, specpure) a K₂[IrCl₆] (připraven z elementárního iridia jedním z autorů práce, M. V.). Z roztoků těchto látek byly připraveny standardy tak, aby se obsahy iridia pohybovaly v desítkách nanogramů. Po ozaření vykazovaly specifické aktivity ¹⁹²Ir takto připravené série standardů shodu v rámci nejistoty měření.

Ozařování

Vzorek a prvkové standardy byly ozařovány současně v aktivní zóně experimentálního reaktoru LVR – 15 Ústavu jaderného výzkumu Řež, a. s. tokem neutronů $8 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ po dobu 2 hodin. Ozařené vzorky a standardy pak byly zbaveny hliníkové fólie a jednotlivě přeneseny do čistého polyethylenového obalu a v něm zataveny. Tím se minimalizovala možná rizika z hlediska bezpečnosti práce při další manipulaci se zdrojem radioaktivního záření.

Spektroskopická měření indukované aktivity

Série měření byla zahájena dva týdny od konce ozařování, kdy se již rozpadly krátkodobé radionuklidy. Měření vzorek byl umístěn mezi čely obou detektorů. Vzdálenost měřeného vzorku a detektorů činila 25 mm. Toto uspořádání umožnilo vysokou účinnost detekce při optimální aktivitě měřeného vzorku, což vedlo k registraci asi 6000 koincidenčních impulsů za sekundu. Při této koincidenční impulzní zátěži přitom bylo poškození spekter následkem efektu typu nakupení událostí zanedbatelné.

Ke stanovení iridia bylo použito srovnávací metody, při níž se porovnávají plochy piků analytických čar ¹⁹²Ir analyzovaného vzorku s analogickými plochami čar ¹⁹²Ir standardu o známé hmotnosti iridia.

Výsledky a diskuse

O výběru vhodného radionuklidu iridia k danému aktivačně-analytickému postupu rozhodují jaderné vlast-

Tabulka I
Základní charakteristiky aktivace iridia

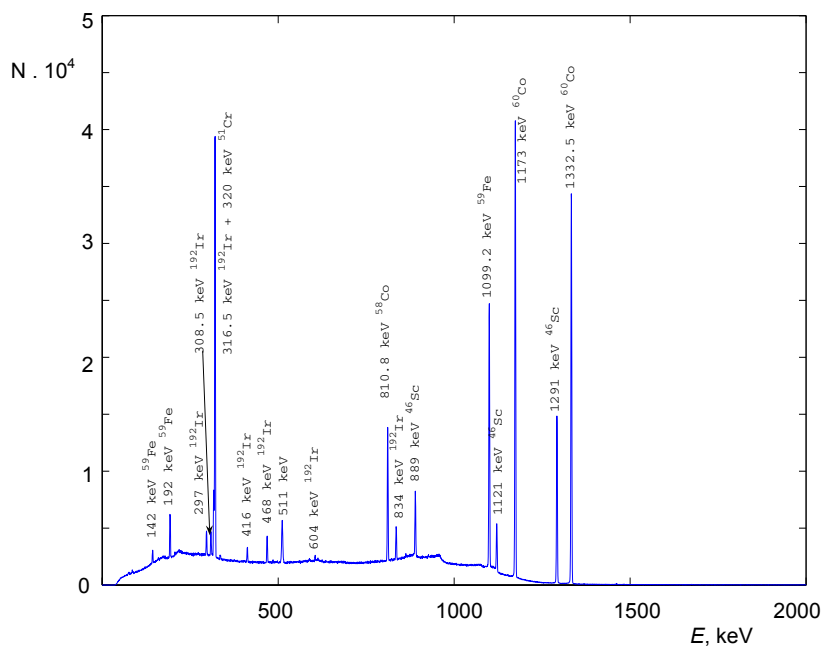
Terčový nuklid (isotopové zastoupení, %) ²⁴	Aktivační účinný průřez, barn ²⁴	Radionuklid (poločas) ²⁵
¹⁹¹ Ir (37,3)	925 ± 50	¹⁹² Ir (73,8 d)
¹⁹³ Ir (62,7)	110 ± 15	¹⁹⁴ Ir (19,15 h)

nosti jeho terčových nuklidů, jako izotopové zastoupení, aktivační účinný průřez jaderné reakce, poločas, emitované záření (energie a jeho intenzita) produktů aktivace.

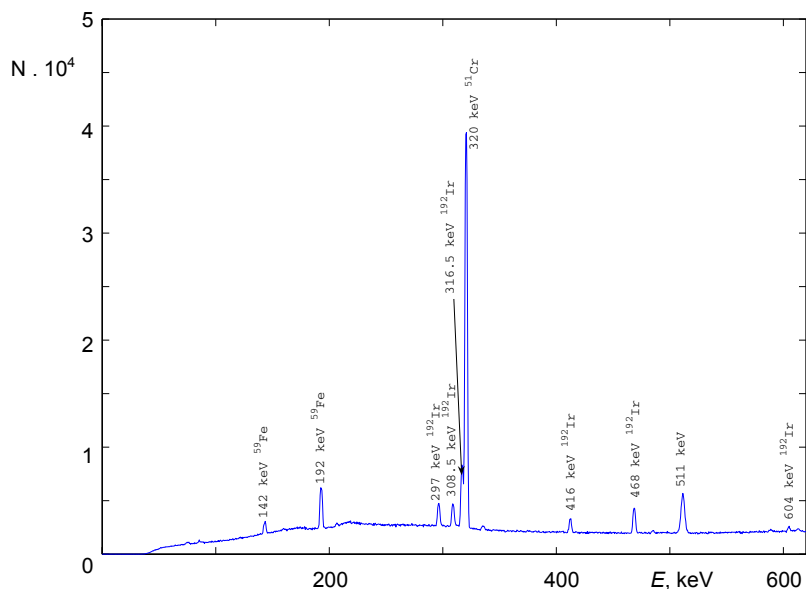
Přírodní iridium obsahuje dva stabilní izotopy ¹⁹¹Ir a ¹⁹³Ir (tab. I). Použijeme-li k jeho stanovení reaktorovou neutronovou aktivační analýzu, vznikají v aktivní zóně jaderného reaktoru při radičním zachytu tepelných neutronů radionuklidy ¹⁹²Ir a ¹⁹⁴Ir.

Kromě vysokého aktivačního výtěžku z terčového

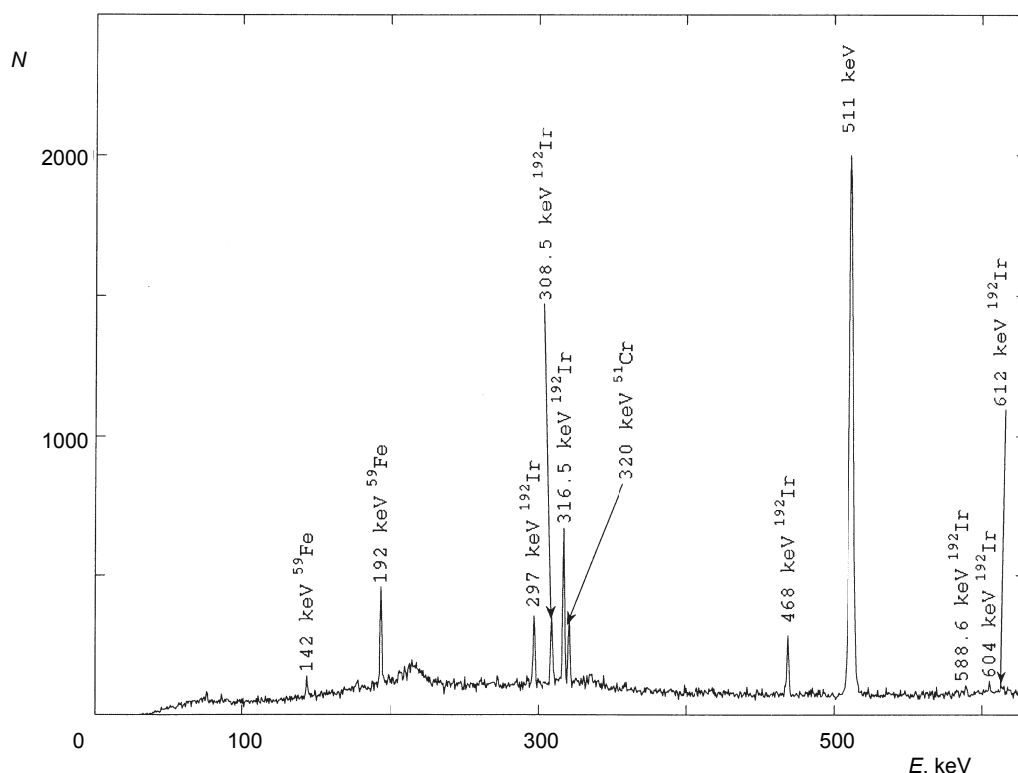
a



b



Obr. 3. **a)** Konvenční spektrum záření gama INAA meteoritu Morávka; doba vymírání 14 dní, doba měření 150 min, **b)** Nízkoenergetická část konvenčního spektra záření gama (INAA) meteoritu Morávka v oblasti energií čar ¹⁹²Ir (detail z obr. 3a)



Obr. 4. Část jednodetektorového koincidenčního spektra záření gama (CINAA) meteoritu Morávka v oblasti energií ^{192}Ir

nuklidu ^{191}Ir splňuje radionuklid ^{192}Ir podmínku emise fotonů v kaskádě (obr. 1), která je nezbytná k analytickému využití gama-gama koincidenční spektrometrické detekce. Za podmínek aktivace vzorku meteoritu Morávka činí specifická aktivita iridia ^{192}Ir 68 Bq ng^{-1} , což při měření vzorku po dobu 1 h odpovídá celkově $2,4 \cdot 10^5$ rozpadům.

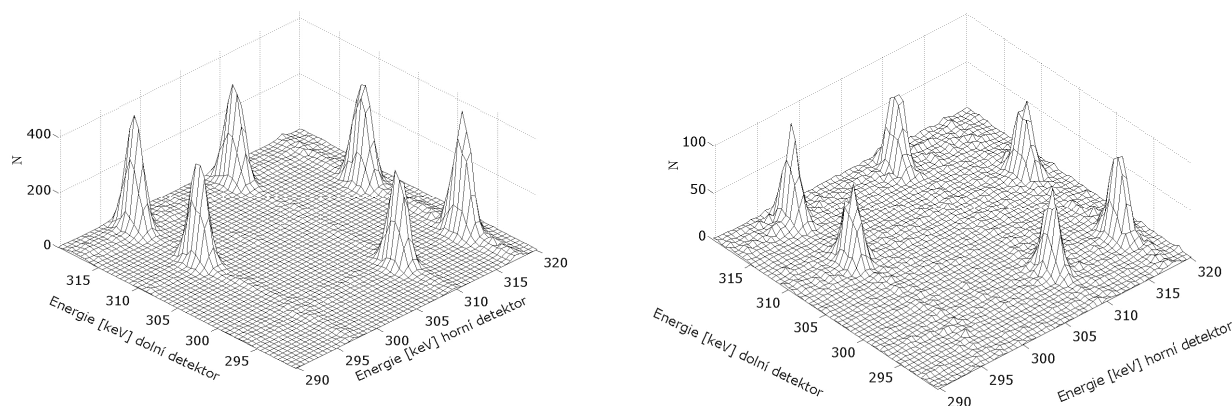
Vysoký obsah železa, niklu, kobaltu, a chromu v chondritech vede při jejich ozařování ke vzniku radionuklidů ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{58}Co , ^{60}Co a ^{51}Cr , které tvoří dominantní část indukované aktivity vzorku. Ve spektru (obr. 3a, 3b) měřeném 14 dní od konce aktivace pak již chybí čáry krátkodobějších radionuklidů (např. ^{198}Au , ^{153}Sm , ^{194}Ir), které vymizely radioaktivním rozpadem. Comptonovská kontinua ve spektrech záření gama způsobená intenzivními zářiči snižují při aktivaci analýze založené na gama-spektrometrickém postupu citlivost metody a tedy omezují stanovení některých prvků ve stopových koncentracích.

Přes dobrou rozlišovací schopnost germaniových detektorů nebylo v našem měření (obr. 3a, 3b) díky relativně vysoké indukované aktivitě ^{51}Cr dosaženo dostatečného rozlišení čar $316,5 \text{ keV } ^{192}\text{Ir}$ a $320 \text{ keV } ^{51}\text{Cr}$. V chondritech totiž koncentrace chromu dosahuje takřka 3 g kg^{-1} a iridia jen cca $0,5 \text{ mg kg}^{-1}$. To je patrné ze špatně rozlišených čar $316,5 \text{ keV } ^{192}\text{Ir}$ a linky $320 \text{ keV } ^{51}\text{Cr}$ (obr. 3b). Vliv rela-

tivně vysoké aktivity ^{51}Cr na energeticky blízkou linku $316,5 \text{ keV } ^{192}\text{Ir}$ lze významně potlačit aplikací koincidenční detekce, jak je vidět ze spektra na obr. 4.

Přestože rozpad ^{51}Cr neposkytuje koinciduující gama kvanta, dochází, zvláště při jeho vysokých aktivitách, k uplatnění náhodné koincidenční detekce fotonů o energii 320 keV . Příspěvek takových náhodných koincidencí do oblasti analytických píků není obecně příliš velký. Vedle toho se však projevují i nepravé koincidenční události. Při nich je jeden foton vyslaný do jednoho z detektorů v něm Comptonovsky rozptýlen do druhého detektoru, ve kterém je pak registrován. Tímto způsobem vznikají nepravé, byť reálné koincidenční události, díky nimž se mohou vytvářet i v jednorozměrných koincidenčních spektrech oblasti s relativně vysokým spojeným pozadím, a to zvláště v částech odpovídajících nízkým energiím. Takto k pozadí přispívají všechny radionuklidy, které jsou obsaženy v matici aktivovaného vzorku. Podíl současné koincidenční detekce gama fotonů z chromu v píci plného pohlcení je přitom při náhodné koincidenci malý, jak je dokumentováno na obr. 4, kde se pík iridia s energií $316,5 \text{ keV}$ stal dominantním a od píku chromu o energii 320 keV je poměrně dobře rozlišen.

V plném rozsahu dokládají výhody CINAA dvourozměrná koincidenční spektra získávaná při měřeních standardu Ir (obr. 5a) a vzorku meteoritu (obr. 5b). Ve spekt-



Obr. 5. Multiparametrická koincidenční spektra standardu iridia (a) a meteoritu (b) získaná za stejných podmínek jako spektra znázorněná na obr. 3, 4 a 5; zobrazena je část spektra z okolí analytických významných čar ^{192}Ir (296,95 keV, 308,80 keV, 316,83 keV)

rech jsou na jedné ose vyneseny amplitudy impulzů od koincidenčních událostí registrovaných v prvním detektoru, na druhé ose pak amplitudy koincidenčních impulzů z druhého detektoru. Amplituda impulzu je přitom úměrná energii vzniklé při interakci fotonu gama v detektoru. Na obrázku jsou detailně zobrazeny oblasti analytických píků iridia s energiemi 296,95 keV, 308,80 keV a 316,83 keV. Při koincidenční detekci fotonů vysílaných současně mohou být role detektorů zaměněny. První foton může být registrován prvním detektorem a druhý foton druhým detektorem nebo obráceně. Detektory si přitom jako by svou roli vymění. Proto jsou ve dvourozměrných spektrech koincidenční píky zdvojeny. Jsou-li amplitudy vynášeny v energetické škále, jsou píky vůči svým dvojnásobkům rozloženy symetricky podél diagonály. Takové dvourozměrné spektrum dokumentuje plné potlačení „energetické interference“, jednotlivé analytické píky jsou ve spektrech zcela izolovány a nacházejí se na nízkém pozadí. Obtížně separovatelný pík ^{51}Cr , který v konvenční INAA ztěžuje stanovení iridia, z koincidenčního spektra zcela vymizel.

Tabulka II

Obsah iridia ve vzorku meteoritu Morávka (hmotnost 6,715 mg, doba aktivace $t_a = 2$ h v neutronovém toku $8 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Stanoveno koincidenční metodou, měřeno po době vymírání $t_d = 14$ dní, doba měření $t_m = 150$ min

Energie [keV]	Stanovený obsah [mg kg^{-1}]
296,95	$0,575 \pm 0,015$
308,80	$0,586 \pm 0,012$
316,83	$0,581 \pm 0,011$
468,12	$0,584 \pm 0,017$
588,60	$0,590 \pm 0,021$
604,42	$0,583 \pm 0,015$
Výsledek (vážený průměr)	$0,582 \pm 0,005$

Tabulka III

Obsahy Ir ve vzorcích meteoritu Morávka stanovené konvenční INAA²⁵ z analytických čar ^{192}Ir 296,0 keV, 316,5 keV a 486,1 keV

Vzorek	Navážka [mg]	Stanovený obsah Ir [mg kg^{-1}]
Homogenizovaný materiál	207,1	$0,600 \pm 0,019$
Homogenizovaný materiál	117,7	$0,806 \pm 0,040$
Abláční povrchová vrstva	13,10	$0,960 \pm 0,030$
Kovová magnetická frakce	2,108	$1,78 \pm 0,06$

Spektra na obr. 5a, b dokumentují selektivnost koincidenční metody stanovení iridia ve vzorku. Při použití komparativní metody dle známého obsahu Ir ve standardu, je stanovení založeno na prostém srovnání plochy analytických píků v těchto spektrech po jejich normalizaci na doby měření. Kromě této části spektra ^{192}Ir byly vyhodnoceny též další koincidující analytické čáry (468,12 keV, 588,60 keV, 604,42 keV), které jsou vhodnější pro konvenční INAA. Vypočtené hodnoty obsahu iridia ze všech uvedených čar jsou v tab. II.

Obsah iridia v tomto meteoritu byl stanoven i Řandou, Kučerou a Soukalem metodou konvenční INAA (cit.²⁶). Ti stanovili iridium ve vzorcích různého charakteru z tohoto meteoritu (homogenizovaný vzorek, ablační povrchovou vrstvu a magnetickou kovovou frakci – tab. III). Zvýšený obsah iridia, nalezený citovanými autory, svědčí o jeho obohacení v ablační vrstvě méně těkavým iridiem. Porovnání našich výsledků s výsledky výše uvedených autorů se zřetelem na experimentální podmínky ukazují dobrý soulad.

Závěr

Zavádění principu koincidenční spektrometrie záření gama do instrumentální aktivační analýzy umožňuje potlačit či zcela eliminovat energetické interference, které mohou negativně ovlivnit správnost výsledků v závislosti na prvkovém složení analyzované matrice, zvláště při stanovení nízkých koncentrací některých prvků. Čistota analytické odezvy při užití koincidenční spektrometrie zvyšuje selektivnost a správnost stanovení. Kromě toho koincidenční metodická varianta ve srovnání s konvenční instrumentální aktivační analýzou založenou na nízkoenergetických analytických linkách potlačuje comptonovské pozadí v jejich okolí, jak je názorně dokumentováno na obr. 5, a to umožňuje dosahovat nižších detekčních mezí.

Děkujeme Dr. P. Spurnému a Dr. J. Borovičkoví z Astronomického ústavu AV ČR v Ondřejově za poskytnutí vzorku meteoritu Morávka. Tato práce byla z počátku podpořena granty GA ČR 203/95/0260 a ČVUT (CTU 300010204 a CTU 300110914), později pak v rámci výzkumných záměrů MSM 210000019 a AV OZ 40310501. Jeden z autorů (I. N.) děkuje i za podporu, kterou mu v průběhu doktorského studia poskytlo MŠMT ČR a MZV ČR, Nadání Josefa, Marie a Zdeňky Hlávkových a Ministerstvo školství Senegalské republiky.

LITERATURA

- Hevesy G., Levi H.: Kgl. Danske Videnskabernes Selskab. Matematisk-fysiske Meddelelser. 14, 5 (1936).
- Rakovič M.: *Activation Analysis*. Academia – Iliffe Books Ltd, Prague, London, 1970.
- Tavendale A. J., Ewan G. T.: Nucl. Instrum. Methods 26, 183 (1963).
- Gordon G., Randle K., Goles G. G., Corliss J., B., Marvin H., B., Oxley S. S.: Geochim. Cosmochim. Acta 3, 368 (1968).
- Vobecký M., Petrů F.: Collect. Czech. Chem. Commun. 33, 3903 (1968).
- Siegbahn K.: *Alpha-, Beta-, and Gamma-Ray Spectroscopy*. North-Holland Publ., Amsterdam 1965.
- Ljunggren K.: Pure Appl. Chem. 1, 31 (1960).
- Ehmann W. D., McKnown D. M.: Modern Trends in Activation Analysis, NBS Spec. Publ. 312, 308 (1969).
- Wing J., Wahlgren M. A.: J. Radioanal. Chem. 3, 37 (1969).
- James W. D., Ehmann W. D., Hamrin C. E., Chyi L. L.: J. Radioanal. Chem. 32, 195 (1976).
- Bibby D. M., Champion H. M.: Radiochem. Radioanal. Lett. 18, 177 (1974).
- Vobecký M., Pavlík L., Beneš J.: Radiochem. Radioanal. Lett. 29, 159 (1977).
- Vobecký M., Dědina J., Pavlík L., Valášek J.: Radiochem. Radioanal. Lett. 38, 197 (1979).
- Wangen L. E., Gladney E. S., Hensley W. K.: Anal. Chem. 52, 765 (1980).
- Alvarez L. W., Alvarez W., Asaro F., Michel H.: Science 208, 1095 (1980).
- Meyer G.: J. Radioanal. Nucl. Chem. 114, 223 (1987).
- Koeberl C.: J. Radioanal. Nucl. Chem. 168, 47 (1993).
- Meyer G., Piccot D., Rocchia R., Toutain J. P.: J. Radioanal. Nucl. Chem. 114, 125 (1993).
- Jakůbek J., Nuiten P., Pluhař J., Pospíšil S., Šiňor M., Štekl I., Timoracký S., Vobecký M.: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A 414, 261 (1998).
- Vobecký M., Jakůbek J., Granja C. Bustamante, Koníček J., Pluhař J., Pospíšil S., Rubáček L.: Anal. Chim. Acta 386, 181 (1999).
- Jakůbek J.: *Dizertační práce*. FJFI ČVUT, Praha 2000.
- Firestone R. B.: *Table of Isotopes* (Virginia S. Shirley, ed.), John Wiley & Sons, New York 1996.
- Borovička J., Jakeš P., Spurný P., Frýda J., Ceplecha Z.: Meteoritics Planet. Sci. A31 Suppl. No.5, 35 (2000).
- Handbook on Nuclear Activation Cross-Sections*, Technical Reports Series No. 156, str. 12. International Atomic Energy Agency, Vienna 1974.
- Reus U., Westmeier W.: At. Data Nucl. Data Tables 29, 362, 364 (1983).
- Řanda Z., Kučera J., Soukal L.: J. Radioanal. Nucl. Chem. 257, 275 (2003).

I. Ndiaye^{a,b}, M. Vobecký^{a,c}, S. Pospíšil^a, J. Jakůbek^a, T. Holý^{a,b} (^a Institute of Experimental and Applied Physics, Czech Technical University, Prague, ^b Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering, Czech Technical University, ^c Institute of Analytical Chemistry, Academy of Sciences of the Czech Republic): **Determination of Iridium in Meteorites by Coincidence Instrumental Neutron Activation Analysis**

Analytical application of the coincidence instrumental neutron activation analysis (NAA) was demonstrated on a sample of the Morávka meteorite (2000). The use of the strongest low-energy coinciding γ -lines of ^{192}Ir has shown a significantly enhanced resolution power of the detection system as well as improved selectivity with respect to the accurate Ir determination compared with conventional single-detector instrumental NAA, even for highly active samples. Comparison of the results with those obtained by similar types of analysis has shown not only a high degree of correspondence, but also highlighted some advantages of the new method.