

Vlastislav Brabec

50 let jaderné spektroskopie v Řeži

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 50 (2005), No. 3, 237--253

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141274>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2005

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

50 let jaderné spektroskopie v Řeži

Vlastislav Brabec, Řež

Vládním nařízením z 10. června 1955 byl zřízen Ústav jaderné fyziky a v tomto roce je mu 50 let. Jaderná fyzika se však pěstovala ještě před tímto datem, ale to není předmětem našeho článku — toto období podrobně popsal prof. Šimáně [1].

Jedním z předních oborů jaderné fyziky v citovaném ústavu byla jaderná spektroskopie záření beta a gama (počala se rozvíjet už v r. 1952). Jejím zakladatelem byl Z. Plajner, první vedoucí oddělení jaderné spektroskopie (OJS), jehož publikace [2] byla vstupní publikací v tomto oboru u nás. Z. Plajner rovněž sestrojil první bezželezový magnetický spektrometr s krátkou čočkou [3]. Bohužel tomuto perspektivnímu pracovníkovi nebylo dopřáno, aby se podílel na dalším rozvoji jaderné spektroskopie (musel v r. 1972 z ústavu odejít).

Předmětem studia jaderné spektroskopie bylo zkoumání záření beta a gama vysílaného z radioaktivních izotopů. Z naměřených spekter záření beta a gama se získávaly informace o stavu vzbuzených hladin atomových jader. Konstruovala se rozpadová schémata jednotlivých atomových jader a ta se pak srovnávala s různými modelovými představami.

Během uplynulých padesáti let se tento obor významně podílel na rozvoji jaderné fyziky a ve srovnání se světovými laboratořemi byl na dobré úrovni. Jeho úloha se však prakticky již vyčerpala a dnes toto období považujeme za „klasické“ období jaderné spektroskopie. Naskytá se tak příležitost zhodnotit výsledky, kterých bylo dosaženo, a ukázat, jak „klasická“ jaderná spektroskopie pomáhá i současným trendům v jaderné fyzice i v aplikacích. Současně bych chtěl ukázat, jak dříve vypadala práce v naší laboratoři ve srovnání s dneškem. V čem byla i tehdy, kdy nebylo tolik peněz na nákup špičkových zařízení, její práce plodná, krásná a plná romantiky. Ale už zde je třeba říci, že tomuto oboru určitě neprospělo, že řada špičkových pracovníků musela z politických, tedy nikoli odborných důvodů oddělení jaderné spektroskopie začátkem sedmdesátých let opustit.

Ústav jaderné fyziky sice vznikl v r. 1955, ale v té době nebyl zdaleka dokončen. Tak i jaderná spektroskopie zahajovala své první práce (stavba magnetických spektrometrů, radiochemie apod.) v objektu Filmových ateliérů v Hostivaři a část v prostorách pod tribunami Strahovského stadionu a teprve v r. 1958–59 se nastěhovalo oddělení do nové budovy v Řeži.

Pouze z praktických důvodů a pro větší přehlednost je článek rozdělen na tři části: experimentální vybavení, jaderná spektroskopie jako součást jaderné fyziky a aplikace tohoto oboru.

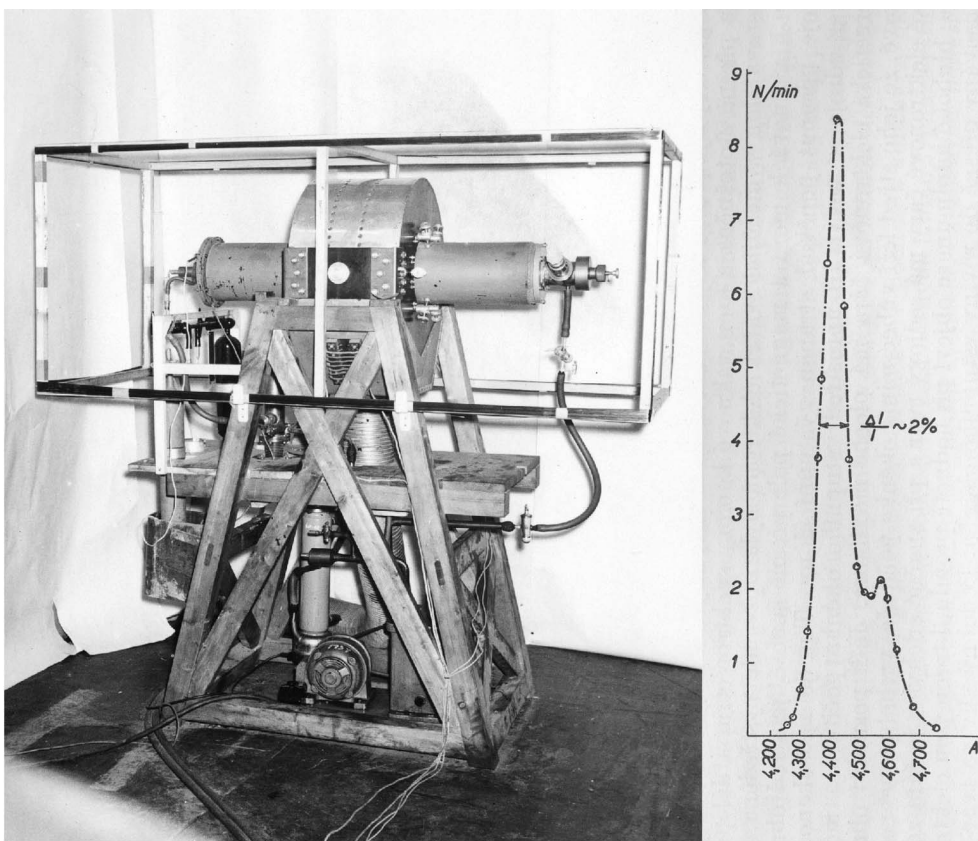
RNDr. VLASTISLAV BRABEC, CSc. (1932), Ústav jaderné fyziky AV ČR, 250 68 Řež.

1. Experimentální vybavení

V jaderné spektroskopii se měří spektra záření beta nebo gama, a proto jsou základními přístroji spektrometry elektronů a záření gama. Nedílnou a důležitou součástí každého měření jsou vhodné radioaktivní zdroje (to znamená mít dobrou radiochemickou laboratoř) a dobrá elektronika.

Magnetické spektrometry elektronů

Pro impulzovou analýzu elektronů vyletujících z radionuklidů jsme v OJS zkonstruovali čtyři magnetické spektrometry a dva spektrografy, které umožnily měřit spektra záření β^\pm , Augerovy a konverzní elektrony a v určité době i fotoelektrony. Byly převážně vyrobeny v ÚJF s pomocí československého průmyslu. Charakteristické parametry jsou impulzové rozlišení a světelnost. U různých typů byly různé, aby dovolily celou škálu měření.



Obr.1 Bezželezový magnetický spektrometr záření beta s krátkou čočkou, vpravo první spektrum konverzních elektronů — linky K, L přechodu o energii 662 keV ^{137}Cs .

Nejstarším spektrometrem elektronů, který vznikl ještě před založením ÚJF, byl bezželezový magnetický spektrometr s krátkou čočkou v analogii s optikou (viz obr. 1) s průměrnými parametry. Skončil v muzeu v Jáchymově. Dalším spektrometrem čočkového typu byl spektrometr s meziobrazem [4] s velkou světelností (vhodný pro koincidenční měření β - γ), ale byl dosti poruchový.

Ke spektrometrům s dobrými parametry (vzhledem k tehdejšímu stavu ve světě) patřily dva železné magnetické spektrometry s dvojitou fokusací (ve dvou rovinách), z nichž jeden byl „hrncového“ typu s poloměrem rovnovážné orbity $r = 30$ cm [5] a druhý „hřibového“ typu (otevřené pólové nástavce) s $r = 50$ cm [6] (viz obr. 2). Poslední byl také zamýšlen jako comptonovský spektrometr (v době, kdy pro měření gama nebyly vynikající Ge(Li) detektory) a jako spektrometr k měření spekter elektronů „on line“ na cyklotronu U-120M, ale nikdy k těmto měřením nedošlo.



Obr. 2 Magnetický železný spektrometr záření beta s dvojitou fokusací s poloměrem stabilní dráhy 50 cm s veškerým vnitřním i vnějším příslušenstvím.

Významný je spektrometr s $r = 30$ cm nejen pro dobré parametry, ale proto, že byl řízen počítačem HP 2116B (píše se rok 1972) a celý provoz byl plně automatizován a vybaven grafickým displejem se světelnou tužkou. To byl výrazný pokrok v metodě měření spekter. Dřívější ruční způsob měření spekter bod po bodu s expozicí několika minut nepřetržitě po dobu třeba 14 dnů pouze dvěma pracovníky byl skutečně únavný a mnohdy zatížen i lidskými chybami. Dnes je automatizace běžná, ale tehdy tomu tak nebylo. Bylo to první zařízení, které se v Československu řídilo počítačem, proto

vzbudilo velký zájem a mnoho exkurzí tehdy navštívilo náš „spektrák“. Na tomto železném spektrometru (hystereze) byl zaveden „cyklický“ způsob [7] měření konverzních spekter, kdy zadaná část se snímá několikrát po sobě s expozicí v jednom bodě až 1000krát kratší než při běžném měření. Tím se podstatně snížil vliv nestabilit měření a odpadla i korekce na rozpad.

Doplňkem experimentálního vybavení pro analýzu elektronů byly 3 magnetické spektrografy (registrace elektronů fotografickou deskou), které však nebyly tolik využívány pro měření jako předcházející typy.

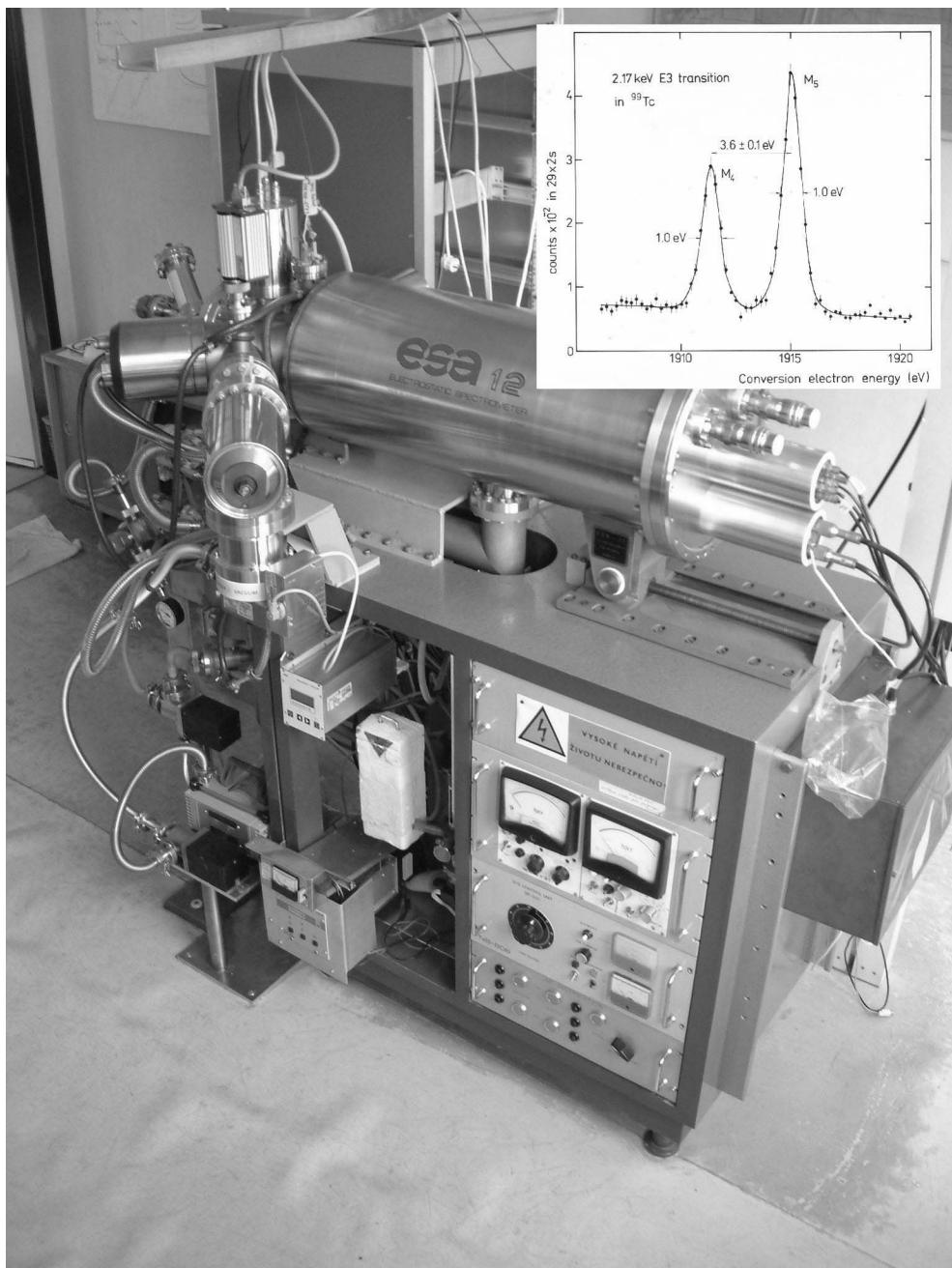
Pro dokončení a chod spektrometrů bylo třeba vybavit je vakuovým systémem (tehdy to nebylo tak jednoduché jako dnes), buzením magnetického pole a stabilizátorem magnetického pole [8]. Ač se to nezdá, velkým problémem bylo zhotovení speciálního Geigerova-Müllerova počítače, který byl vyroben z vyleštěné měděné trubky s wolframovým drátem jako anodou, výměnným okénkem z velmi tenkých fólií o plošné hustotě $2\mu\text{g}/\text{cm}^2$ [9] a speciální náplní. O výrobě radioaktivních zdrojů bude zmínka jinde (radiochemická separace), ale sami fyzikové si pro kalibraci vyráběli velmi kvalitní zdroje Th ($B + C' + C''$), které je členem rozpadové řady Th. Zdroje se připravovaly emanací a možnost zamoření byla velká.

Magnetické spektrometry, které desítky let věrně sloužily „klasické“ jaderné spektroskopii a získaly absolutorium, byly postupně vyřazeny. Pro některé z nich se definitivním koncem stala povodeň v r. 2002, která zatopila část budovy. Chce se mi skoro říct — čest jejich památce.

Elektrostatický spektrometr elektronů

Unikátním zařízením v oddělení byl a dosud je elektrostatický spektrometr elektronů ESA 12 [10] (viz obr. 3), který od září 1977 dovoluje měřit energie elektronů vyletujících z radioaktivních zdrojů v oblasti do 20 keV, která je pro magnetické spektrometry nevhodná. Přístroj byl vyroben v Ústavu jaderného výzkumu Maďarské akademie věd v Debrecenu (ATOMKI), zdokonalen podle našich návrhů a později vybaven Al-*rentgenkou*, transportním systémem a retardační clonou. Tím jsme rozšířili možnosti i na fotoelektronovou spektroskopii (XPS) radioaktivních vzorků, která se provádí jen asi ve třech laboratořích světa. Na konverzní lince M_4 a M_5 přechodu o energii 2,17 keV v ^{99}Tc jsme dosáhli rozlišení 1 eV, a to je vůbec nejužší linka naměřená ve spektroskopii konverzních elektronů. Vakuový systém je na kovových spojkách, je bezolejový a dosahuje vakua 10^{-5} Pa. Kvalita měřených spekter je zaručena přesnými zdroji VN, digitálním voltmetrem Solartron a vysokonapěťovým děličem [11].

Konverzní elektrony v oblasti \sim keV mají určitou zvláštnost, kterou si mnozí jaderní fyzikové dlouho neuvědomovali. Energetické ztráty elektronů ve zdroji totiž deformují konverzní linky. Oddělit bezztrátové elektrony (ty jsou mírou správné energie) od ztrátových lze jen spektrometrem s vysokým rozlišením, linkou s malou přirozenou šířkou a kvalitním zdrojem. To se autorovi tohoto článku podařilo naměřit již v r. 1963 na spektrometru s rozlišením 0,06 % na univerzitě v Uppsale, Švédsko, na konverzní čáře L_1 přechodu o energii 28,2 keV v ^{166}Dy [12]. V posledních letech skupina elektro-



Obr. 3. Elektrostatický spektrometr záření beta. Ve výřezu vpravo jsou konverzní linky M_4 a M_5 přechodu 2,17 keV v ^{99}Tc s rekordním absolutním rozlišením 1 eV.

nové spektroskopie věnuje problému elektronových ztrát velkou pozornost experimentálně i teoreticky [13, 14].

Spektrometry záření gama

Do poloviny šedesátých let jsme jako spektrometry záření gama používali scintilační krystaly NaI(Tl) různých velikostí a fyzikálních parametrů. Nejlepší z nich měly při energii záření gama 1 MeV energetické rozlišení $\Delta E/E \sim (6-8)\%$. Takové rozlišení pro některé úlohy nevyhovovalo. Obvyklé rozměry byly $1,5'' \times 1''$ krystalu NaI(Tl) ($''$ znamená palec a je 2,54 cm).



Obr. 4. Spektrometr záření gama pro měření spekter gama s použitím Ge(Li) detektorů.

Doslova revolucí ve spektroskopii záření gama se stalo použití polovodičových detektorů Ge a Si jako spektrometrů záření gama (viz obr. 4) a beta. Tyto detektory se široce používají dodnes. V polovině šedesátých let Z. Trousil z Ústavu fyziky pevných látek (nyní Fyzikální ústav AV ČR) vyvinul postup výroby monokrystalů z čs. Ge z Kaznějova a spolu s pracovníky OJS vyrobili první Ge(Li) detektor s citlivou vrstvou 3 mm, průměrem 20 mm a s rozlišením 2,8 keV na lince s energií 84 keV a 4–5 keV na lince s energií 662 keV [15]. Za úspěšný vývoj Ge(Li) detektorů byla právem Z. Trousilovi udělena v r. 1966 státní cena, aniž se však přihlédlo k přínosu pracovníků OJS. Ještě jednu věc bych rád připomněl. V polovině šedesátých let bylo Československo po Kanadě druhou zemí (pokud si pamatuji), která uměla vyrábět Ge(Li) detektory. Přesto se nenašel v Československu žádný podnik, který by je vyráběl, i když cena jednoho detektoru se rovnala ceně dvou osobních aut, ale s mnohem menšími náklady. A ve světě o ně byl zájem.

I když se výroba Ge(Li) detektorů přenesla do Ústavu jaderného výzkumu, oddělení zůstalo věrno tradici a dělalo si je i nadále samo (planparalelní, koaxiální), později pak i HPGe detektory. Zhotovovali jsme i Si(Li) detektory a dodnes Si detektory s povrchovou bariérou cizí zájemci žádají, i když ve světě je dost dodavatelů.

Pro úplnost je třeba uvést, že jsme hledali i jiné druhy detektorů, z nichž připomenu scintilační materiál $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, zkráceně BGO, který má velké atomové číslo a je vhodný pro vysoké energie záření γ ($> 1 \text{ MeV}$). Detektory se vyráběly ve spolupráci s Ústavem monokrystalů Turnov.

Speciálním zařízením pro měření γ byl anticomptonovský spektrometr [16], v jehož spektru píky úplného pohlcení zůstaly bez změny intenzity, zatímco spojitě comptonovské spektrum bylo potlačené. V oddělení se pro Spojený ústav jaderných výzkumů (SÚJV) v Dubně vyrábělo zařízení MUK (mnohodetektorové úhlové korelace) a tzv. dodekaedr, sloužící pro koincidenční měření. Bohužel se oba přístroje v SÚJV používají jen málo.

Elektronika

Elektronika v experimentálním výzkumu je jeho nedílnou součástí. Elektronická zařízení se vyráběla v elektronickém oddělení ústavu, v OJS a jen malá část se dovážela, zpočátku zejména ze Sovětského svazu. V oddělení jsme měli tři velmi kvalitní vysokoškoláky a celou řadu schopných techniků-elektroniků.

Jen pro jednobanňová měření spekter záření γ byly třeba předzesilovače, lineární zesilovače, konvertory a čítače pulzů. Přirozená lenost, ale hlavně snaha o zrychlení a zkvalitnění měření vedla k získání mnohobanňových zařízení. Nejprve jsme dostali 200banňový analyzátor firmy Intertechnique, ale už r. 1965 nám naše oddělení elektronického vývoje dalo 4096banňový analyzátor s feritovou pamětí a to umožňovalo i vícerozměrná měření.

Ruční únavný provoz na všech magnetických spektrometrech vedl fyziky ke snaze automatizovat měřicí zařízení. První pokusy automatizovat se uskutečnily ještě před možností použít počítače. Ale již začátkem 70. let jsme získali řídicí počítač HP 2116B [7] a později další. A ještě později tu byly osobní počítače, takže všechna experimentální zařízení jsou automatizovaná. V oddělení se vybudovalo měřicí a výpočetní středisko k ovládání měřicích zařízení a ke zpracování informací z těchto zařízení získaných. Navrhovalo a vyrábělo se mnoho dalších elektronických zařízení, která nebudu jmenovat, ale uvedu jen dvě. Především je to přesný vysokonapěťový dělič stejnosměrného napětí, který je součástí spektrometru ESA12. Dále je to zařízení pro přesná stanovení energií záření gama polovodičovými detektory.

Invazí počítačů do oddělení skončilo „krásné, ale někdy i kruté“ období. Dnes fyzikové tráví většinu času u osobních počítačů a to je velký pokrok, ale období předtím bylo romantičtější.

Radiochemické separace

Radioaktivní zdroje jsou prvořadým problémem v jaderné spektroskopii. Dají se získat ozařováním terčů v reaktoru a v urychlovačích, ale ve formě, v jaké by se alespoň ve spektroskopii elektronů nedaly měřit. Musí tedy nastoupit radiochemici. Připraví vhodný terčik a ten ozáří. Z ozářeného vzorku se různými metodami separují jednotlivé frakce (beznosičová množství) a pak se jinými metodami (elektrolýzou, vakuovým napařováním) uvedou do tvaru, aby byl v daném spektrometru měřitelný. Vybudovala se radiochemická laboratoř, na které má velkou zásluhu M. Vobecký. Po jeho nuceném odchodu se chemie ujali A. Maštalka a M. Fišer. Radiochemická laboratoř byla na vysoké odborné úrovni a rozsahem byla největší v ÚJF.

S trochou nadsázky lze říci, že chemici byli schopni připravit radioaktivní zdroje izotopů v různých chemických stavech prakticky pro všechny prvky periodické soustavy (viz např. [17, 18]). Pro separace požadovaných radioaktivních izotopů jsme vyvinuli a používali různé separační techniky: ionexovou, extrakční a plynovou chromatografii, elektrochemické postupy, extrakce, srážecí metody apod.

Důležitou etapou ve vývoji radiochemických metod, ve kterém chemici prokázali výjimečnou schopnost, byla separace neutrono-deficitních radionuklidů v oblasti lanthanoidních prvků. Tantalový terčik se bombardoval protony o energii 660 MeV na synchrociklotronu SÚJV v Dubně. Celá operace — Dubna, Vnukovo, Ruzyně, Řež, separace, výroba zdroje — do zahájení měření trvala jen 10 hod. Dokladem může být publikace [19]. V současné době je prakticky nemožné, navíc tak rychle, získat z Dubny radioaktivní zářiče, leda za velké peníze.

2. A co fyzika?

Struktura jádra

Koncem 50. a začátkem 60. let jsme studovali neutronodeficitní izotopy převážně vzácných zemin. Z oblasti deformovaných jader jsme v té době ověřovali zobecněný model, což byla jádra s hmotovým číslem $A \sim 130, 150$ a 190 (Ba, Cs, Xe, Gd, Eu, Dy, Pt, W, Re, Au, Hg aj.), ze sférických jader to byl např. Nd, Zr aj. Dále jsme studovali vlastnosti deformovaných jader z rozpadu izotopů Gd, Tm a Lu. Ověřovali jsme modelové představy nejčastěji z hlediska zobecněného modelu se započtením párové interakce, případně i vazby kvazičástice s fononem. V řadě případů jsme prověřovali modelové představy pro energetické posloupnosti vzbuzených hladin a redukované pravděpodobnosti přechodu gama. Pozornost jsme věnovali i Coriolisově interakci a jejímu vlivu na směšování hladin rotačních pásů. V licho-lichých jádrech Tm se kromě Coriolisovy interakce studovala též zbytková interakce neutronu s protonem. Ukázali jsme, že experimentálně určené posloupnosti energií jednokvazičásticových hladin v jednotlivých jádrech lze uspokojivě reprodukovat v rámci zobecněného modelu s párovou interakcí, vezme-li se v úvahu vhodná změna parametru hexadekapólové de-

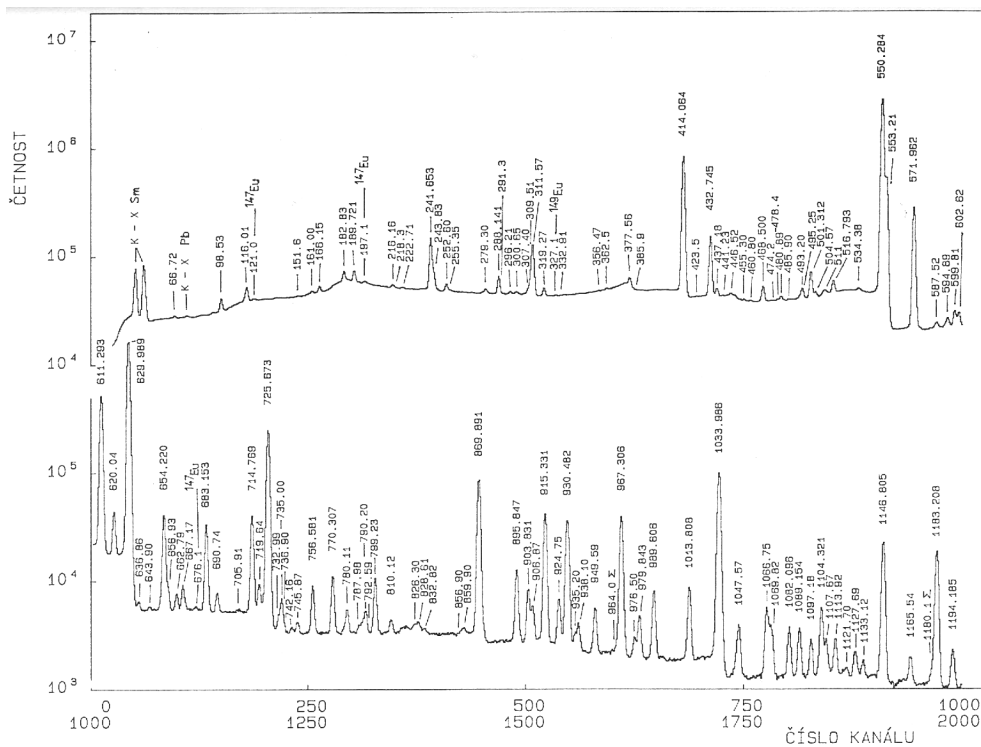
formace. V tomto článku nelze vyjmenovat všechny detaily úloh, které se řešily, neboť v oblasti „klasické“ spektroskopie se v letech 1955–1990 publikovalo asi 490 článků. Většina získaných dat se systematicky shromažďovala a kriticky hodnotila v ATOMIC DATA a NUCLEAR DATA TABLES (dnes ATOMIC DATA AND NUCLEAR DATA TABLES) a také v NUCLEAR DATA SHEETS.

Pro srovnání experimentálních výsledků s teorií jsou důležité přesné hodnoty energií záření γ a β , ale i jiných veličin. Proto jsme tomuto problému věnovali velkou pozornost. Příkladem přesného určení energie je energie kvant γ z radiálního záchytu ${}^1\text{H}(n, \gamma){}^2\text{H}$, ze které jsme stanovili vazebnou energii deuteronu. Získali jsme hodnotu vazebné energie $S_n({}^2\text{H}) = 2224,574 \pm 0,009 \text{ keV}$ [20] ve výborné shodě s výsledky přesných měření jinými způsoby.

Postupně se jaderná spektroskopie radioaktivních izotopů rozšířila o metodu jaderné spektroskopie na svazku urychlovače U120 a umožnila tak získávat informace zejména o hladinách s vyššími spiny, které nejsou dostupné při studiu radioaktivních rozpadů. V oblasti deformovaných jader jsme tak pozorovali hladiny rotačních pásů nad různými vzbuzenými stavy jader. Na urychlovači U-120 se využívala reakce (${}^3\text{He}, xn$) s energiemi iontů ${}^3\text{He}$ od 20 do 28 MeV. První měření funkce vzbuzení a úhlového rozdělení záření gama, stejně jako koincidenční měření γ – γ , jsme v letech 1972–75 provedli na zvlášť upravených terčích ${}^{165}\text{Dy}$, ${}^{159}\text{Tb}$, ${}^{186}\text{W}$, ${}^{185}\text{Re}$, ${}^{104,105}\text{Pd}$, ${}^{181}\text{Ta}$ a ${}^{197}\text{Au}$. Podrobně jsme studovali vzbuzené hladiny izotopů ${}^{159}\text{Ho}$, ${}^{181}\text{Re}$ a ${}^{197}\text{Tl}$. Na rekonstruovaném urychlovači U-120M se používaly částice α o energii 40 MeV. Koincidence γ – γ se měřily v měřicím středisku, do něhož OJS přispělo Ge(Li) detektory a částečně elektronikou. Doby života excitovaných stavů metodou Dopplerova posuvu a různé typy deformací jader jsme studovali v oblasti $A \sim 80$ –100. Předmětem zájmu byl ${}^{74}\text{Se}$ [21], ${}^{77}\text{Se}$ (nebyl však publikován) a liché izotopy Ru (${}^{99,101,103}\text{Ru}$), které byly tématem 2 diplomových prací

Na anticomptonovském spektrometru jsme např. zkoumali jednak rozpady ${}^{146}\text{Eu}$ a ${}^{148}\text{Eu}$ a jednak ${}^{169}\text{Yb}$ a ${}^{166}\text{Ho}$. V prvním případě šlo o složitá rozpadová schémata s velkým množstvím přechodů gama (viz obr. 5), což vyžadovalo velmi přesné měření, anticomptonovský spektrometr to zaručoval. Ukázalo se, že dečiriné jádro ${}^{146}\text{Sm}$ je téměř sférické a vzbuzené hladiny jsou vibračního a dvoukvazičásticového charakteru, zatímco ${}^{148}\text{Sm}$ patří mezi typická přechodová jádra, jehož stavy lze popsat modelem IBA-2. V případě sudo-sudého deformovaného jádra ${}^{166}\text{Er}$ jsme určovali rotační pásy nad základním stavem a vibracemi beta a gama. V případě lichého deformovaného jádra ${}^{169}\text{Tm}$ byla interpretace obdobná. Studovaná jádra byla tématem 2 kandidátských prací pracovníků OJS [22, 23].

V devadesátých letech jsme v OJS začali studovat rozpady atomových jader orientovaných při nízkých teplotách. Experimentální výzkumný program v tomto oboru začal s příslušnou skupinou v Clarendonské laboratoři na univerzitě v Oxfordu, pak se rozrostl na projekt ISOLDE, skupina NIKOL, CERN. V posledních letech se rozšířil na spolupráci s univerzitou v Leuvenu v Belgii, s níž vzniklo několik publikací. Dvě z nich [24, 25] informují o výrobě unikátních planárních detektorů HPGe operujících při teplotě pod 77 K. Tyto detektory byly vyrobeny a testovány v ČR. O detektory



Obr. 5 Část složitého spektra záření gama vznikajícího při rozpadu ^{148}Eu měřená na anti-comptonovském spektrometru.

i technologii výroby byl velký zájem v renomovaných pracovištích, ale i v institucích, které je vyráběly.

Vnitřní konverze záření gama

Studium jevu vnitřní konverze záření gama bylo jedním z hlavních předmětů zájmu OJS. Je to jaderně atomový elektromagnetický proces, při kterém vzbuzené jádro nevysílá foton, ale interaguje s některým z elektronů atomového obalu. Někteří studenti dlouho chápali tento jev jako „vnitřní fotoefekt“, při kterém vzbuzené jádro emituje foton, který „konvertuje“ na elektron. Dávno víme, že tomu tak není, ale trochu matoucí název vnitřní konverze přetrval dodnes.

Výzkum tohoto jevu jsme v OJS prováděli jak experimentálně, tak teoreticky. Ukázalo se, že takový postup byl správný. Poměr pravděpodobností emise elektronů a záření γ se nazývá koeficient vnitřní konverze (KVK) a silně závisí mj. na multipolaritě jaderného přechodu, která je určena změnou spinů a parit vzbuzených stavů a je proto důležitou veličinou při studiu struktury jader. Přehled o výpočtech KVK a naše účast v nich je dosti podrobně podána v práci [26]. Pro přesná měření se KVK počítají pro danou energii přímo a naše laboratoř byla o to často žádána.

Až do sedmdesátých let se pozornost elektronové skupiny soustřeďovala na elektromagnetické přechody s energií větší než 30 keV, které se mohly dobře zkoumat magnetickými spektrometry. Po spuštění elektrostatického spektrometru ESA 12, který umožňuje měřit v oboru jednotek keV, se zájem přesunul do oblasti, která byla málo prozkoumána. Vnitřní konverze nízkoenergetických přechodů je prakticky jedinou možností určení jejich existence a jejich kvantových charakteristik. Tak jsme např. prokázali existenci přechodu E2 s energií 4,028 keV v ^{208}Po , jež byla v rozpadovém schématu předvídána, ale nebyla do té doby experimentálně potvrzena.

Jev vnitřní konverze záření gama byl v OJS prozkoumán velmi podrobně a ze všech možných hledisek důkladně. Tím se elektronová skupina stala v jaderné fyzice známou ve všech laboratořích zabývajících se o tento jev. Dosvědčit to může i fakt, že O. Dragoun byl redakcí *Advances in Electronics and Electron Physics* v r. 1983 požádán o sepsání souhrnného přehledu [27].

Augerovy elektrony

Augerovy elektrony v radioaktivním rozpadu jsou velmi málo prostudovanou oblastí a ani v OJS nezbudily hlubší zájem. Augerův jev spolu s vnitřní konverzí a rozpadem β jsou hlavními zdroji elektronů doprovázejících radioaktivní rozpad. Magnetické spektrometry nejsou vhodné pro studium Augerových elektronů. Jiná situace nastala po spuštění elektrostatického spektrometru ESA 12, kterým jsme zkoumali např. Augerovy elektrony skupiny KLL v Mn [28] a ^{57}Co [29], ale i celou řadu dalších.

Systematicky se Augerovým jevem z experimentálního i teoretického hlediska zabýval až A. Kovalík, který dlouhá léta pracuje v SÚJV Dubna. Podrobně prostudoval Augerova spektra skupin KLL, KLM+KLX, KMM+KMX, LMM+LMX v oblasti $23 \leq Z \leq 70$. Pro mnohé z nich určoval energii a intenzity jednotlivých skupin poprvé, jiné zpřesňoval. Pokud byly naměřené údaje k dispozici, srovnával je i s teoretickými výpočty. Augerovy elektrony tvořily podstatnou část jeho doktorské práce (DrSc.), kterou obhájil v Dubně.

Spektra β^- a β^+

Z naměřených spekter beta se konstruovaly Fermiho-Curieho grafy, určovaly se komponenty (energie, intenzity a zakázanost přechodu) potřebné pro konstrukce rozpadových schémat a tedy i pro jadernou strukturu. Tak např. spektrometrem s meziobrazem jsme změřili spektrum β^+ a Augerovy elektrony skupiny K z rozpadu ^{140}Nd [30]. Na spektrometru s dvojitou fokusací jsme zkoumali pozitronové spektrum z rozpadu ^{132}La [31], určili energie a intenzity, ale udělala se i korekce u jedné komponenty β^+ na unikátní první zákaz. Podobných měření se udělalo ještě několik, ale systematické studium spekter β^\pm pro účely jaderné struktury jsme neprováděli.

Zájem o měření spojitých spekter β znovu ožil, když se objevila zpráva, že ve spektru β ^3H se našla odchylka svědčící o existenci těžkého neutrina s klidovou hmotností 17 keV/c². Zájem nebyl o spektrum β jako takové, ale jeho měřením lze řešit

problém $17 \text{ keV}/c^2$ neutrina. O tomto tajuplném jevu vznikly desítky experimentálních i teoretických prací. My jsme měli spektrometr ESA, jenž mohl měřit ve velmi nízké oblasti energií elektronů a také máme vypracovaný spolehlivý způsob měření spekter elektronů i metodu jejich zpracování. Vybrali jsme si pro tento pokus nízkoenergetickou část β^- ^{241}Pu (např. [32]), které bylo připraveno napařením. Energetické ztráty jsme testovali simulacemi metodou Monte-Carlo jednotlivých pružných a nepružných srážek uvnitř podložky zdroje, ve vlastním zdroji a v kontaminované vrstvě. Zkoumali jsme vliv Fermiho funkce na výsledky vyhodnocení spekter [33]. V rámci Nilssonova modelu jsme vypočítali tzv. „tvarovací faktor“ pro 1. zákaz přechodu beta v ^{241}Pu [34]. Nepozorovali jsme žádný náznak hypotetického neutrina o energii 17 keV . Deformace spektra byla způsobena nezapočtením vlivu elektronových ztrát.

V souvislosti s měřením spektra β^- ^{241}Pu při hledání těžkého neutrina jsme pozorovali linky s energií 260 a 500 eV , které jsme nakonec vysvětlili jako Augerovy elektrony KLL uhlíku a kyslíku, které jsou vždy přítomné na radioaktivních vzorcích.

V posledních letech vznikl velkolepý projekt pro další tritiový experiment s citlivostí $m_{\nu e} = 0,20 \text{ eV}/c^2$ pro určení hmotnosti lehkého elektronového neutrina. Tento projekt se nazývá KATRIN (**K**arlsruhe **T**ritium **N**eutrino) experiment. Na projektu se už pracuje a spektrometr má být dokončen v r. 2008 v Karlsruhe. Je velkým oceněním fyziků z OJS, že byli k projektu přizváni a mají na starosti kalibraci budoucího velkého spektrometru. Zúročí se zde mnohaleté zkušenosti našich pracovníků v oboru nízkých a velmi nízkých energií elektronů. Znovu se ukazuje, že zkušenosti z „klasické“ jaderné spektroskopie se dají využít při řešení úloh moderní fyziky.

3. Aplikace jaderné spektroskopie

Snaha využít existující přístrojovou základnu OJS a zkušenosti ze studia radioaktivních rozpadů i mimo rámec základního výzkumu vedla k různým aplikacím použitelným pro jiné vědní a výzkumné obory, ale i pro průmysl.

Aplikace elektronové spektroskopie

Významnou aplikací konverzních elektronů je metoda ICES [35], která je naším patentem. Tuto nedestruktivní metodu lze považovat za „radioaktivní“ variantu fotoelektronové spektroskopie (XPS). V obou případech se měří energetická spektra elektronů emitovaných z vnějších slupek atomových obalů, ze spekter se určí jejich vazbová energie a ta se koreluje s valenčními stavy atomů. Zásadní rozdíl mezi oběma metodami spočívá v mechanismu produkce elektronů. Metoda XPS užívá vnější zdroj záření (rentgenku), takže elektrony jsou emitovány nespécificky atomy všech přítomných prvků. Metoda ICES analyzuje elektrony emitované z elektronového obalu v důsledku vnitřní konverze záření gama — jevu vyvolaného jádrem téhož atomu, z něhož pochází elektron. Metodu jsme použili pouze ke studiu $^{99\text{m}}\text{Tc}$, resp. konverzní čáry M_4 a M_5 izomerního přechodu E3 s energií $2,17 \text{ keV}$. Měření se prováděla s rozlišením $\Delta E \sim 1 \text{ eV}$

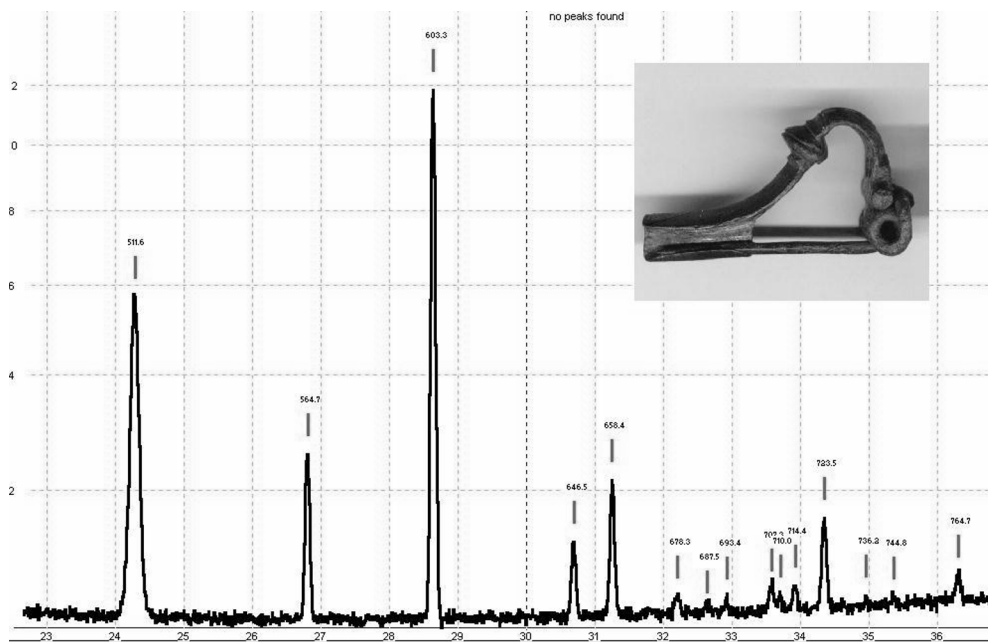
na elektrostatickém spektrometru ESA12. Tato speciální metoda je až o několik řádů citlivější než XPS (10^{-11} g ^{99m}Tc), ale může být použita jen tehdy, když energie konverzní čáry nepřevyšuje několik keV, přirozená šířka a přístrojové rozlišení několik eV. Chemické posuvy vazbových energií bývají v intervalu (0,1 až 10 eV) a u ^{99m}Tc a jeho oxidů v pevné fázi se vztahovaly k technecianu (srovnávaly se s měřením XPS), měřili jsme valenční stav ^{99m}Tc vzniklý rozpadem ^{99}Mo v polykrystalické matici NaOH [36], chelátů aj.

Metoda ICES byla rozpracována a je ke škodě věci, že se dále nerozvíjela tak, aby byla použitelná v medicíně. Nicméně se na nás obrátil supervisor firmy New England Nuclear, která je součástí koncernu Du Pont, zda bychom s nimi mohli spolupracovat při stanovení oxidačního stupně radioaktivního ^{99m}Tc vznikajícího v generátorech $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ vyráběných pro lékařské účely. Informace získali z článků, kde se psalo o existenci Tc v nižším oxidačním stavu než Tc (VII) při rozpadu ^{99}Mo . Navázali jsme spolupráci, ale ukázalo se, že potřebujeme ^{99}Mo s vyšší specifickou aktivitou, než máme k dispozici (NDR). I to firma Du Pont mohla zařídit z Kanady. Firma Atomic Energy of Canada Limited dokonce zaslala technický výkres 19kg kontejneru, ve kterém se ^{99}Mo měl posílat, ale to bylo všechno. Tím vzrušující příběh skončil, nikoli naší vinou.

Aplikace spektroskopie záření gama

Jako příklad aplikace spektroskopie γ v OJS nejprve uvedeme stanovení stupně vyhoření jaderného paliva. Pod pojmem vyhoření se myslí snižování obsahu štěpitelných izotopů v palivovém článku v důsledku štěpení. Metody stanovení jsou buď destruktivní, nebo nedestruktivní. My jsme použili spektroskopickou metodu nedestruktivního určení vyhoření jaderného paliva. Množství jader štěpného produktu se určovalo měřením absolutní intenzity některého přechodu gama v dceřiném izotopu. Výsledky (např. [37]) z měření záření γ detektory Ge(Li) jsme srovnávali s výsledky určenými radiochemicky, tedy destruktivně, a v rámci 15 % souhlasily. Destruktivní metoda je přesnější.

Další široce rozšířená aplikace záření γ je instrumentální (nedestruktivní) neutronová aktivační analýza (INAA). Pro úplnost je třeba říci, že v OJS užíváme jako jadernou analytickou metodu ještě radionuklidovou rentgenovou fluorescenční analýzu (R-XRF). Obě metody se využívají pro archeologické materiály (sklo, kovy (viz obr. 6), keramika), v geologii (horniny, minerály), v životním prostředí (rostliny, spady, aerosoly apod.) a samozřejmě i v průmyslu (analýza vzorků, jejich čistota apod.). Kromě průmyslu výsledky INAA slouží k vědeckým závěrům v jiných vědních oborech a prospívají tedy i základnímu výzkumu. Rozvoji metody INAA pomohlo i to, že v režském areálu je reaktor VVR-5 s potrubní poštou a dobrá měřicí aparatura. Celý proces byl průběžně zdokonalován, upřesňován a automatizován. Byla publikována celá řada prací J. Frány a M. Vobeckého, které nelze všechny uvést. Zajímavou aplikací byla analýza železomanganových konkréci z Tichého oceánu. Získali jsme informace o zastoupení více než 50 prvků ve 12 vzorcích různých částí 5 konkréci.



Obr. 6 Část spektra záření γ z ozářeného vzorku spony (viz výřez vpravo) z archeologických nálezů z římského období.

Připomenu ještě atlasy spekter záření gama aktivovaných minerálů a hornin (citace atlasu I [38]).

Velkým oceněním průkopnické práce skupiny aktivační analýzy v OJS bylo to, že jí J. A. Baker, chargé d'affaires, 15.7.1970 na americkém velvyslanectví předal k analýzám tři měsíční vzorky po 1 g získané z Apolla 11 a 12. Zároveň ve svém dopise popřál dr. Vobeckému jménem NASA a amerických vědců mnoho úspěchů v tomto výzkumu. Analýzy jsme provedli ve spolupráci s Ústavem nerostných surovin v Kutné Hoře a publikovali je v [39]. Celá akce, která byla čistě vědeckým problémem, byla zpolitizována se všemi nepříjemnými důsledky. Podobný výzkumný program na účast v sovětském lunárním výzkumu už M. Vobecký nesměl provádět, přestože sovětská AV měla zájem, a to i přesto, že sovětská strana neměla k dispozici svoji metodu INAA.

Přijetím členů aktivační analýzy vedené J. Kučerou se současná skupina stala největší v celé ČR. Společně jsme vyvinuli metodu pro stanovení velmi nízkých koncentrací esenciálních a toxických prvků (As, Cd, Cu, Hg, I, Mn, Mo, Ni, Pt, Sb, Se, V aj.) v biologických materiálech. Metody INAA se využily také při certifikaci referenčních materiálů chemického složení ve spolupráci s národními i mezinárodními institucemi, jako je Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE), Vídeň, a americký National Institute of Standards and Technology (NIST, dříve NBS). Nadále tato skupina využívá INAA pro kontrolu životního prostředí, např. analýzu atmosférických aerosolů [40] a aerosolů ze spalování fosilních paliv [41], ale i zajímavých analýz, jako byla např. analýza kostí B. Smetany s cílem objasnit příčinu jeho ohluchnutí [42]. Skupina je na vysoké profesionální úrovni, o čemž svědčí i fakt, že její

vedoucí (J. Kučera) je předsedou mezinárodního výboru pro pravidelně se konající konference „Nuclear Analytical Methods in the Life Sciences“ (NAMLS) a členem mezinárodního výboru pro další pravidelně konanou konferenci „Modern Trends in Activation Analysis“ (MTAA). V roce 2002 obdržel medaili Jana Marka Marci za zásluhy o rozvoj spektroskopických metod.

Závěr

V uplynulých padesáti letech prakticky skončila „klasická“ jaderná spektroskopie. O její zhodnocení jsem se pokusil v tomto článku. Neuvedl jsem všechna zařízení a činnosti oddělení, ale nebyl to úmysl někoho poškodit nebo něco vynechat. Chtěl jsem uvést, co podstatného se pro fyziku udělalo. Ne každá jaderně spektroskopická laboratoř se mohla pochlubit tolika vynikajícími magnetickými spektrometry záření beta a už vůbec ne detektory Ge(Li), které jsme si vyrobili už v šedesátých letech. I když nelze pominout výsledky o jaderné struktuře, vysokou úroveň měl též výzkum jevu vnitřní konverze záření gama. Kromě fyzikálních výsledků jsme získali dobré zkušenosti, které se mohly využít v aplikacích. Metoda INAA, o jejíž rozvoj jsme se zasloužili, je dnes samostatným vědním oborem a má v OJS silnou základnu. Aplikace elektronů vnitřní konverze pro stanovení valenčního stavu ^{99m}Tc ve stopovém množství 10^{-11} g je zcela výjimečná aplikace v obdobných laboratořích.

Čtenář jistě postřehl, že jsem se podrobněji nezmiňoval o zahraniční spolupráci. Chtěl jsem zdůraznit především to, co se udělalo u nás. Spolupráce ale samozřejmě byla (jde o období do 90. let) s SÚJV Dubna, Maďarskem, NDR, Polskem aj., ale i se Švédskem, NSR, Kanadou; byli zde i dlouhodobí stážisté z Egypta.

Název OJS se nezměnil, i když současná náplň je zcela odlišná od dřívější.

Oddělení se dnes zabývá kromě jiného dvěma velmi perspektivními směry. Je to projekt KATRIN (viz výše) a zkoumání jaderné hmoty za extrémních podmínek pomocí jádro-jaderných srážek při velmi vysokých energiích v rámci experimentu HADES (GSI Darmstadt), STAR (RHIC Brookhaven) a ALICE (CERN, Ženeva). Jejich práce zdaleka neskončila, proto by bylo předčasné je hodnotit a také se o nich více nezmiňuji.

„Klasická“ jaderná spektroskopie končí, ale zkušenosti z ní fyzikové uplatňují v uvedených perspektivních směrech a v nich dále žijí.

Všem, kteří se zasloužili o rozvoj jaderné spektroskopie, fyzikům, chemikům, technikům a všem ostatním se sluší poděkovat. Děkuji také těm, kteří mi pomohli si vzpomínat.

L i t e r a t u r a

- [1] ŠIMÁNEĚ, Č.: *Život mezi atomy aneb jak to vše u nás i jinde začalo*. Ústav jaderného výzkumu Řež, a. s., 2005.
- [2] PLAJNER, Z.: *Spektroskopie záření beta*. Čs. Čas. Fys. 5 (1955), 328.
- [3] PLAJNER, Z.: *Magnetický spektrometr pro záření beta s krátkou čočkou*. Čs. Čas. Fys. 5 (1955), 204.

- [4] PLAJNER, Z., BRABEC, V.: *Spektrometr záření beta s velkou světelností*. Čs. Čas. Fys. 10 (1960), 115.
- [5] PLAJNER, Z., MALÝ, L.: *Spektrometr záření beta s dvojitou fokusací*. Čs. Čas. Fys. 10 (1960), 47.
- [6] ŘEZANKA, I., ŠPALEK, A., KUKLÍK, A., FRÁNA, J.: *Magnetický spektrometr beta s dvojitou fokusací*. Čs. Čas. Fys. 17 (1967), 43.
- [7] DRAGON, O., BRABEC, V., FEIFERLÍK, V., KUKLÍK, A., DUDA, F.: *Cycle measurement of internal conversion electron spectra using an iron magnetic spectrometer*. Nucl. Instr. Methods 116 (1974), 45.
- [8] KUKLÍK, A.: *Stabilizátor magnetního pole beta-spektrometru*. Pribory i technika experimenta, No 4 (1967).
- [9] VOBECKÝ, M., DRAGON, O.: *Příprava tenkých filmů*. Jaderná energie, sv. 3, č. 12 (1957), 410.
- [10] VARGA, D., KÁDÁR, I., KÖVER, Á., CZERNY, I., HORIK, G., BRABEC, V., DRAGON, O., KOVALÍK, A., ADAM, J.: *Electrostatic spectrometer for measurement of internal conversion electrons in the 0,1–20 keV region*. Nucl. Instr. Meth. 192 (1982), 277.
- [11] DRAGONOVÁ, N.: *Precision HVDC Dividers and their Calibration*. IEEE Trans. Instrum. Meas., bude publikováno v r. 2005.
- [12] BRABEC, V., BERGMAN, O., GRUNDITZ, Y., AASA, E., KARLSEN, S.-E.: *Transitions following the decay of ^{166}Dy* . Arkiv Fys. 26 (1964), 511.
- [13] ŠPALEK, A.: *Effect of Scattering Processes on the Spectra of Electrons Emitted from the Surface of Solids: Monte Carlo Calculations*. Surface and Interface Analysis 15 (1990), 739.
- [14] DRAGON, O., ŠPALEK, A., KOVALÍK, A., YAKUSHEV, E. A., RYŠAVÝ, M., FRÁNA, J., BRABEC, V., NOVGORODOV, A.-F., LILJEQUIST, D.: *Scattering of 7.3 keV conversion electrons from a Co-57 source covered gradually by gold absorbers of various thicknesses*. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 194 (2002), 112.
- [15] ŘEZANKA, I., ŠPALEK, A., FRÁNA, J., MAŠTALKA, A.: *Radioactive decay of ^{129}Cs* . Nuclear Physics 89 (1966), 609.
- [16] ADAM, J., KRACÍK, B., HOFFMANN, J.: *Increasing of the gamma-ray detection sensitivity using an anti-compton spectrometer*. Jaderná energie 30 (1984), 41.
- [17] VOBECKÝ, M., MAŠTALKA, A.: *Radiochemische Isolierungen I. Isolierung von Hafnium und Wolfram aus Produkten von Abspaltung des Tantals*. Collection Czechoslov. Chem. Commun 26 (1962), 186.
- [18] VOBECKÝ, M., MAŠTALKA, A.: *Radiochemische Isolierungen II. Chromatographische Isolierungen Seltener Erden*. Collection Czechoslov. Chem. Commun. 28 (1963), 709.
- [19] FRÁNA, J., ŘEZANKA, I., VOBECKÝ, M., MAŠTALKA, A.: *γ -spectrum of neutrondeficient La isotopes of $T_{1/2} \sim 5$ hours*. Czech. J. Phys. B14 (1964), 652.
- [20] ADAM, J., HNATOWICZ, V., KUGLER, A.: *Determination of the deuteron binding energy*. Czech. Phys. 33 (1983), 465.
- [21] ADAM, J., HONUSEK, M., ŠPALEK, A., DOYNIKOV, D. N., EFIMOV, A. D., KUDOJAROV, M. F., LEMBERG, J. K., PASTERNAK, L. A., VOROV, O. K., ZHOVLIEV, U. Y.: *Lifetimes and Structure of Se-74 excited states*. Z. Physik A — Hadrons and Nuclei 332 (1989), 143.
- [22] WAGNER, V.: *Kandidátská disertační práce*. Řež 1990.
- [23] TLUSTÝ, P.: *Kandidátská disertační práce*. Řež 1988.
- [24] VĚNOS, D., SRNKA, D., ŠLESINGER, J., ZÁKOUCKÝ, D., STEHNO, J., SEVERIJNS, N., VAN GEERT, A.: *Performance of HPGe detectors in the temperature region 2–77 K*. Nucl. Instr. Meth. in Physics Research A 365 (1995), 419.

- [25] VÉNOS, D., VAN ASSCHE-VAN GEERT, A., SEVERIJNS, N., SRNKA, D., ZÁKOUCKÝ, D.: *The behaviour of HPGe detectors operating at temperature below 77 K*. Nucl. Instr. Meth. in Physics Research A *454* (2000), 403.
- [26] DRAGON, O., RYŠAVÝ, M.: *Padesát let výpočtů koeficientů vnitřní konverze záření gama*. Pokroky matematiky, fyziky a astronomie *46* (2001), č. 3, 191.
- [27] DRAGON, O.: *Internal Conversion — Electron Spectroscopy*. Adv. Electronics Electron Phys. *60* (1983), 1, ed. PETER W. HAWKES.
- [28] BRABEC, V., DRAGON, O., RYŠAVÝ, M., FIŠER, M., KOVALÍK, A., CZERNY, I., KÁDÁR, I.: *The KLL Auger Spectrum of Manganese*. J. Phys. A — Atoms and Nuclei *311* (1983), 37.
- [29] KOVALÍK, A., INOYATOV, A., NOVGORODOV, A. F., BRABEC, V., RYŠAVÝ, M., VYLOV, TS., DRAGON, O., MINKOVA, A.: *K-Auger spectrum of iron from the ^{57}Co decay*. J. Phys. B: At. Mol. Phys. *20* (1987), 3997.
- [30] BRABEC, V., KRACÍK, B., VOBECKÝ, M.: *Decay of $\text{Na}^{140} \rightarrow \text{Pr}^{140} \rightarrow \text{Co}^{140}$* . Czech. J. Phys. B (1960), 855.
- [31] FRÁNA, J., ŘEZANKA, I., PLAJNER, Z., ŠPALEK, A., JURSIK, J., VOBECKÝ, M., MAŠTALKA, A.: *The decay of ^{132}La* . Nuclear Physics *A94* (1967), 366.
- [32] DRAGON, O., ŠPALEK, A., RYŠAVÝ, M., KOVALÍK, A., YAKUSHEV, E. A., BRABEC, V., NOVGORODOV, A. F., DRAGONOVÁ, N., ŘÍZEK, J.: *Search for an admixture of heavy neutrinos in the β -decay of ^{241}Pu* . J. Phys. G: Nucl. Part Phys. *25* (1999), 1839.
- [33] BRABEC, V., RYŠAVÝ, M.: *Effect of the Fermi Function on the Results of the β -Spectrum Evaluation*. Europhys. Lett. *21* (8) (1993), 811.
- [34] ŘÍZEK, J., RYŠAVÝ, M., BRABEC, V.: *Effect of nuclear structure on the single particle β -transitions in deformed nuclei*. Czech. Journal Phys. *45* (1995), 497.
- [35] DRAGON, O., FIŠER, M., BRABEC, V., KOVALÍK, A., KUKLÍK, A., MIKUŠÍK, P.: *A new method of valence state determination based on measurements of internal conversion electrons*. Phys. Lett. *99A* (1983), 187.
- [36] FIŠER, M., BRABEC, V., DRAGON, O., KOVALÍK, A., FRÁNA, J., RYŠAVÝ, M.: *Determination of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ Valent Form in Solids by Measurement of Internal Conversion Electrons*. Int. J. Appl. Radiat. Isot. *36* (1985), 219.
- [37] KRIŠTÁK, J., FRÁNA, J., VOBECKÝ, M., FIŠER, M.: *Stanovenie stupňa vyhorenia uranu pomocou polovodičového detektora žiarenia gama*. Preprint ÚJV 2164.R, 1969.
- [38] VOBECKÝ, M., ŘANDA, Z., BENADA, J., KUNCÍŘ, J.: *Nondestructive neutron activation analysis of mineral materials I*. Report ÚJV 2319 Ch, 1970.
- [39] FRÁNA, J., VOBECKÝ, M., ŘANDA, Z., BENADA, J., KUNCÍŘ, J.: *Instrumental neutron activation analysis of lunar samples by means of short activation*. Radiochem. Radioanal. Letters *8* (1971), 97.
- [40] KUČERA, J., HAVRÁNEK, V., SMOLÍK, J., SCHWARZ, J., VESELÝ, V., KUGLER, J., SÝKOROVÁ, I., ŠANTROCH, J.: *INAA and PIXE of atmospheric and combustion aerosols*. Biol. Trace El. Res. *71–72* (1999), 233.
- [41] SMOLÍK, J., SCHWARZ, J., VESELÝ, V., SÝKOROVÁ, I., KUČERA, J., HAVRÁNEK, V.: *Characterization of solid emissions from atmospheric fluidized — bed combustion of two Czech lignites*. Environ. Sci. Technol. *33* (1999), 3543.
- [42] VLČEK, E., VALVODA, M., ČIHÁK, R., ŠMAHEL, Z., RAMBA, J., HANDZEL, J., ČI-GÁNEK, L., SEDLÁČEK, K., BETKA, J., NĚMEČKOVÁ, A., STREJC, P., KNAPPOVÁ, M., POVÝŠIL, C., MUSIL, J., KUČERA, J., SOUKAL, L.: *Bedřich Smetana — fyzická osobnost a hluchota*. Vesmír, Praha 2001.