

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

František Štěrba

Studium jaderných reakcí na katedře jaderné fyziky MFF UK

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 23 (1978), No. 1, 34--41

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138343>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1978

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>

Studium jaderných reakcí na katedře jaderné fyziky MFF UK

František Štěrba, Praha.

Studium jaderných reakcí při nízkých energiích a jejich využívání ke studiu vzbuzených stavů atomových jader představuje již od vzniku MFF UK podstatnou část vědecké práce a tvoří jednu z hlavních náplní vědecké činnosti katedry jaderné fyziky, založené v r. 1955. Od r. 1964 se tyto práce konají v rámci dílčího úkolu státního plánu základního výzkumu řešeného na KJF. V tomto článku bych chtěl stručně ukázat vývoj této disciplíny na KJF a poněkud podrobněji informovat o problematice řešené v posledních letech.

1. Vývoj studia jaderných reakcí na KJF MFF UK

Práce v oblasti jaderných reakcí na KJF MFF UK lze rozdělit do tří základních časových etap, které současně představují různé vývojové stupně v řešení problematiky.

V prvním období, přibližně do r. 1961, byla velkým stimulem pro rozvoj prací v jaderné fyzice pomoc Sovětského svazu, poskytovaná od r. 1955. V tomto období také začínala svou vědeckou činnost většina členů současných pracovišť jaderné fyziky na MFF UK (katedra jaderné fyziky, Nukleární centrum), z nichž někteří začínali přímo na fakultě pod vedením prof. V. PETRŽÍLKY, další se připravovali na pracovištích v SSSR (SÚJV Dubna, Moskevská státní univerzita).

V tomto období bylo nutno provést realistický a perspektivní výběr problematiky se zřetelem na finanční a experimentální možnosti pracoviště. Mimořádná pozornost byla proto věnována různým metodám detekce jaderného záření. Podrobně se studovaly možnosti scintilační techniky pro detekci a spektrometrii γ -záření a neutronů a zejména možnosti využívání jaderných fotografických emulzí pro měření energetických spekter protonů a neutronů. Metodou jaderných emulzí byla také měřena spektra neutronů a protonů v prvních pracích z jaderných reakcí, z nichž práce na jaderném fotoefektu (reakce (γ, p)) tvořily hlavní náplň vědecké práce v celém období [1, 2, 3, 4].

Kolem r. 1960 se pozornost při studiu jaderného fotoefektu ve světě přesunuje k vyšším energiím γ -záření, než měli k dispozici pracovníci KJF. (γ -záření o energii 14,8 MeV a 17,6 MeV bylo získáváno z reakce ${}^7\text{Li}(p, \gamma)$ na kaskádním urychlovači ÚJV ČSAV v Hostivaři.) Proto se těžiště práce přesunulo na právě spuštěný cyklotron U – 120 v ÚJV ČSAV v Řeži, který sliboval širší možnosti práce. S experimentální technikou a metodikou rozpracovanou na KJF v předchozím období byla studována reakce ${}^{59}\text{Co}(p, n){}^{59}\text{Ni}$ při energiích protonů z oblasti od 4 MeV do 6,4 MeV.

Zprvu se pomocí jaderných emulzí studovalo energetické spektrum neutronů a analyzovalo se v rámci statistického modelu jaderných reakcí [5]. Protože však výsledky ukazovaly výrazné odchylky od tohoto modelu, věnovala se systematická práce studiu mechanismu reakce. Měřilo se úhlové rozdělení integrálního spektra neutronů při různých energiích protonů a srovnávalo se s rozdělením odpovídajícím různým mechanismům reakce (p, n). K měření se použilo scintilačního detektoru, připraveného nanesením velmi tenkých vrstev práškového ZnS na skleněné destičky, které sloužily jako světlovod. Registrace záblesků se prováděla elektronicky s použitím fotonásobičů.

Výsledky jednoznačně ukázaly, že kromě vytvoření a rozpadu složeného jádra probíhá reakce i prostřednictvím jiného mechanismu, přičemž podíl tohoto mechanismu závisí na energii protonů [6, 7, 8]. Přesnější interpretaci však nebylo možno s používanou experimentální technikou provést. Protože získání aparatury, potřebné pro další práci, bylo za hranicemi možností KJF a protože neúměrně narůstaly problémy se získáváním ozařovacího času na cyklotronu, nepokračovalo se v práci po r. 1966.

V r. 1965 byl navázán kontakt mezi KJF a Laboratoří tandemového urychlovače Ústavu Nielse Bohra v Kodani v Dánsku a pracovníci KJF se zapojili do spolupráce při studiu deformovaných jader přímými jadernými reakcemi s deuterony. S použitím Elbekova magnetického spektrografu těžkých částic se na tandemovém urychlovači studovala reakce (d, d') na izotopech ^{155}Gd , ^{157}Gd , ^{167}Er , ^{233}U a ^{235}U a později úhlové rozdělení reakcí (d, p), (d, d') a (d, t) na izotopu ^{162}Dy . Výsledky byly registrovány na jaderné fotografické emulze, které byly zpracovány a vyhodnoceny na KJF MFF UK a položily základ pracím, na kterých se dosud pokračuje.

2. Studium deformovaných jader přímými procesy

2.1. Studium úhlového rozdělení

Úhlová rozdělení pro reakce (d, p), (d, d') a (d, t) na jádře ^{162}Dy byla studována při energii deuteronů 12,1 MeV a v rozmezí úhlů $10^\circ - 150^\circ$. Analýza výsledků pro reakce (d, p) a (d, t) se konala v rámci Bornova přiblížení s porušenými vlnami (DWBA). Na přechodech do známých stavů konečných jader se studovala závislost tvaru úhlového rozdělení jednak na interakci mezi částicemi ve vstupním a výstupním kanále reakce,

Tabulka 1. Optické potenciály pro interakci $d + ^{162}\text{Dy}$ při $E_d \doteq 12$ MeV a $t + ^{161}\text{Dy}$ při $E_t \doteq 9$ MeV.

	$U_0[\text{MeV}]$	$q[\text{fm}]^a)$	$\alpha[\text{fm}]$	$W_0[\text{MeV}]^b)$	$q'[\text{fm}]^a)$	$\alpha'[\text{fm}]$
d	120,3	1,16	0,86	21,2	1,30	0,76
t	154,8	1,09	0,85	24,3	1,27	0,46

^{a)} $R = q \cdot A^{-1/3}$

^{b)} Potenciál s povrchovou absorpcí.

jednak na momentu hybnosti l , předávaném při reakci jádra. Získané závislosti umožnily určit charakteristiky dalších buzených stavů.

Interakce mezi jádrem a nalétávající, resp. vylétující lehčí částicí se popisuje pomocí optického potenciálu ve tvaru

$$(1) \quad V(r) = U(r) + iW(r),$$

kde $U(r) = -U_0 f(r)$, $W(r) = -W_0 g(r)$. Funkce $f(r)$ a $g(r)$ popisují tvar potenciálu a obvykle se předpokládá, že mají tvar Woodsovy-Saxonovy jámy, tj.

$$f(r) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{r - R}{\alpha}\right)},$$

kde R je střední poloměr jádra, α charakterizuje oblast rychlého poklesu potenciálu („difúzní parametr“). Obdobný tvar má i potenciál $g(r)$. Pro komplexní částice se však častěji používá tzv. „potenciál s povrchovou absorpcí“, pro který $g(r) = f'(r)$ (tento tvar potenciálu byl pro deuterony a tritony použit i v naší práci – viz tabulku 1). S potenciálem (1) bylo metodou DWBA počítáno úhlové rozdělení protonů a tritonů pro odpovídající reakce. Parametry potenciálu U_0 , ρ a α pro reálnou část a W_0 , ρ' a α' pro imaginární část byly optimalizovány na počítačím stroji tak, aby pro známé přechody souhlasil tvar počítaného úhlového rozdělení s experimentálním. To umožnilo, spolu s výsledky práce [9] o pružném rozptylu 12 MeV deuteronů, určit optické potenciály pro interakci ~ 12 MeV deuteronů s jádrem ^{162}Dy a ~ 9 MeV tritonů s jádrem ^{161}Dy [10]. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 1 a shoda počítaných a naměřených úhlových rozdělení pro tritony je zřetelná na obr. 1. Obdobné shody i závislosti na přenášeném momentu hybnosti l se dosáhlo i pro protony.

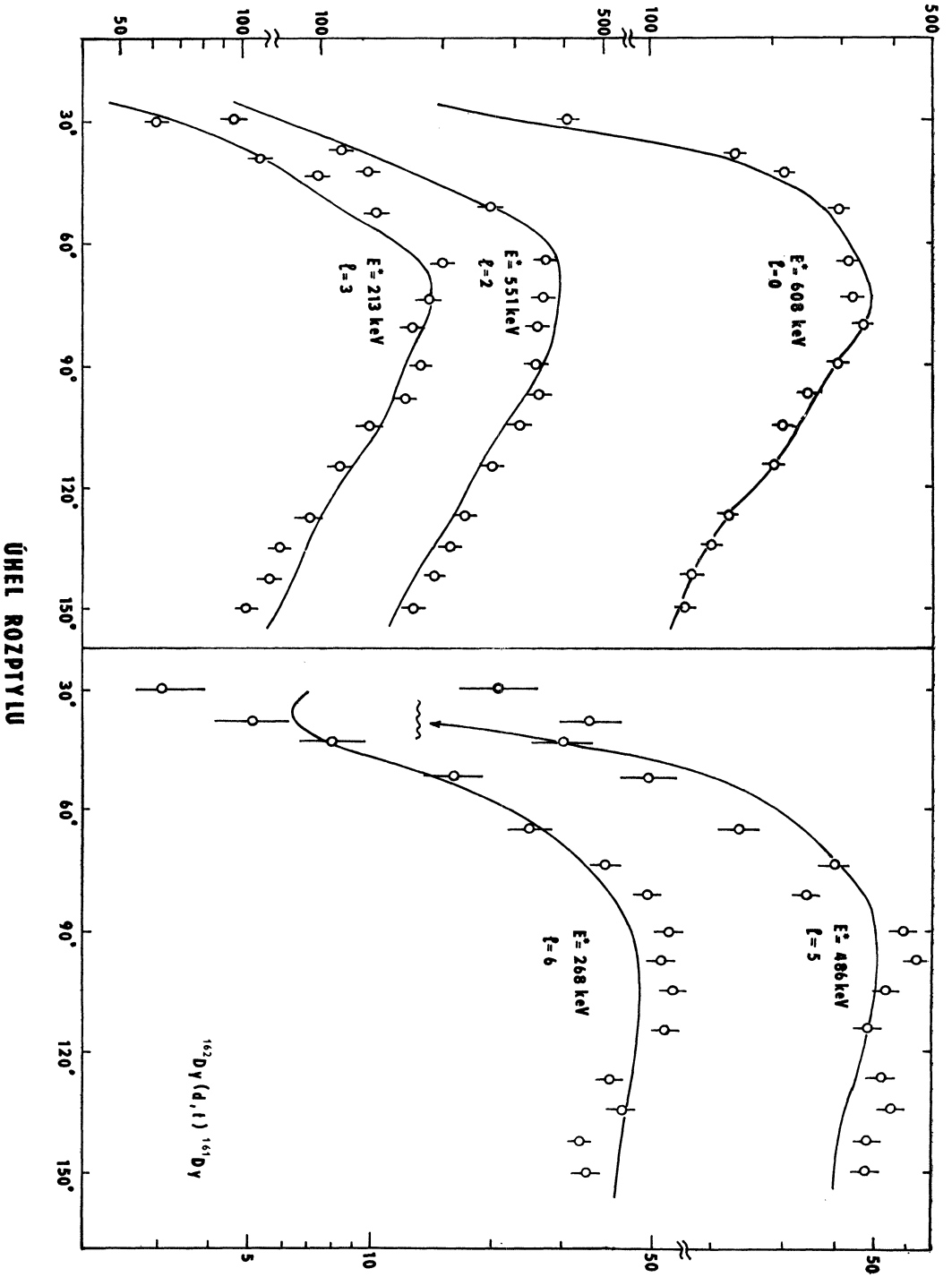
Získané závislosti úhlových rozdělení byly použity pro upřesnění charakteristik dalších stavů. Podstatně byly upřesněny informace o částicových stavech v izotopech ^{161}Dy [11] a ^{163}Dy [12].

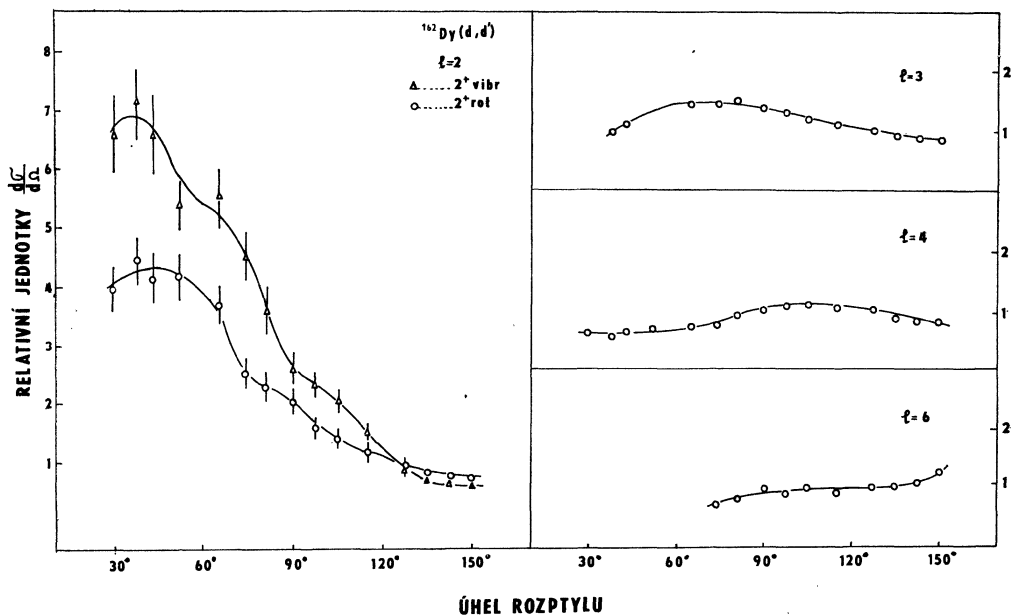
Protože se metoda DWBA ukazuje pro nepružný rozptyl jako málo přesná [13], byla v případě reakce ^{162}Dy (d, d') studována pouze souvislost tvaru experimentálního úhlového rozdělení s předávaným momentem hybnosti l . Jak je vidět z obr. 2, liší se tvar úhlového rozdělení pro přechody s $l = 2$, budící 2^+ stavy v sudo-sudém jádře, výrazně od tvaru rozdělení pro přechody s vyšší multipolaritou. Úhlová rozdělení pro ostatní přechody ($l = 3, 4$ a 6) se liší navzájem především na předních úhlech. Na zadních úhlech je tvar jednotlivých rozdělení dosti blízký a lze je odlišit jen v případě intenzivních přechodů (malé experimentální chyby).

Z obr. 2 je též patrná výrazná závislost tvaru úhlového rozdělení pro $l = 2$ přechody na typu buzeného stavu (rotační nebo vibrační 2^+ stav); je mnohem výraznější, než v rámci DWBA teorie odpovídá různé excitační energii obou stavů.

Obr. 1. Úhlové rozdělení tritonů z reakce ^{162}Dy (d, t) ^{161}Dy ►

DIFERENCIÁLNÍ PRŮŘEZ [$\mu\text{b}/\text{Sr}$]





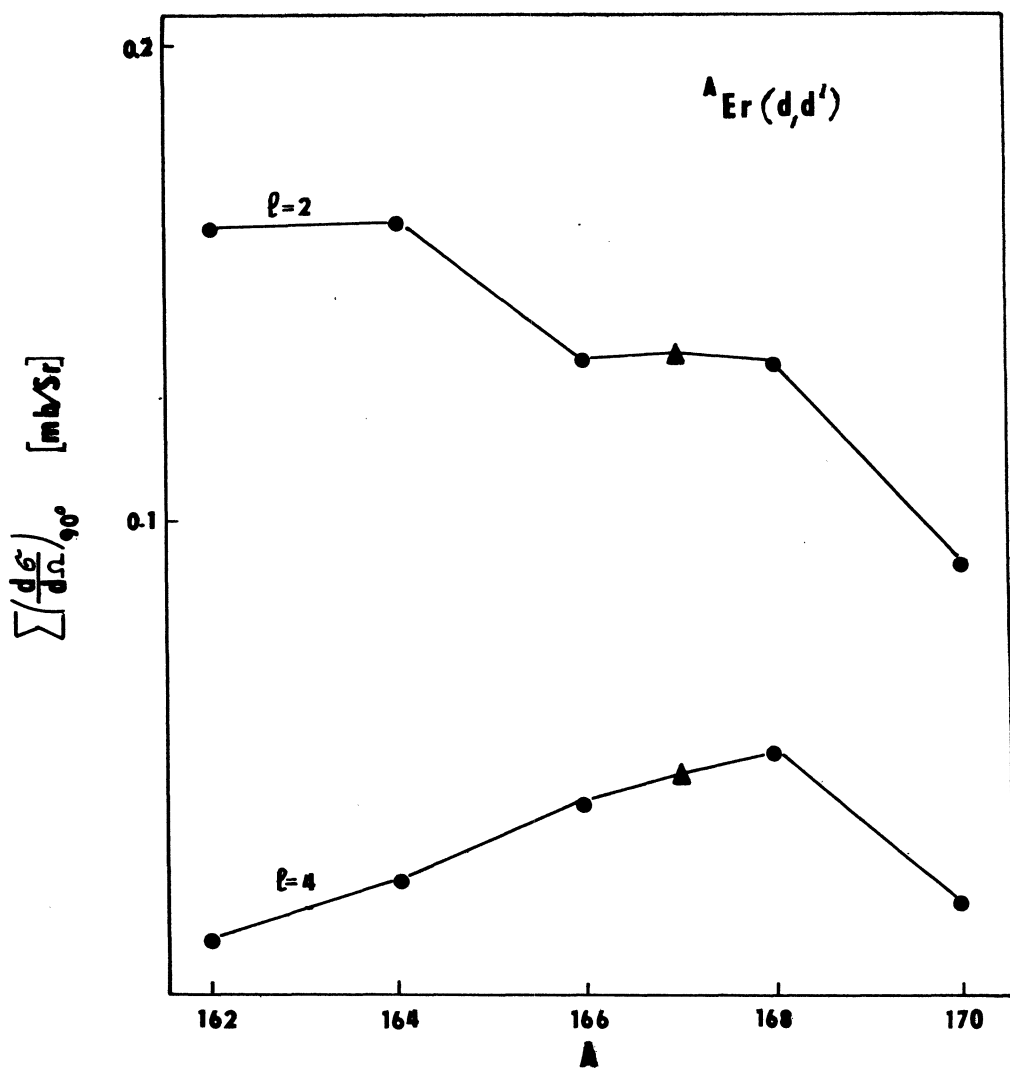
Obr. 2. Úhlové rozdělení deuterónů z reakce $^{162}\text{Dy}(d, d')^{162}\text{Dy}$

2.2. Studium lichých deformovaných jader

Je známo, že nepružný rozptyl deuterónů budí intenzivně v sudo-sudých deformovaných jádrech kolektivní stavy, především rotační a vibrační $K^\pi = 2^+$ stavy [15]. Třebaže na základě povahy těchto stavů je možno očekávat obdobnou situaci i pro reakci (d, d') na lichých jádrech, není pro to z teoretického hlediska dostatečné zdůvodnění. Proto byl tento problém na KJF systematicky studován.

V období 1966 až 1975 byl získán rozsáhlý experimentální materiál o nepružném rozptylu 12 MeV deuterónů na jádrech ^{155}Gd , ^{157}Gd a ^{167}Er a 13 MeV deuterónů na jádrech ^{233}U a ^{235}U . V podstatě byla potvrzena souvislost kolektivních stavů v sudo-sudých a lichých jádrech, avšak z hlediska exitace těchto stavů reakcí (d, d') se v lichých jádrech výrazně projevují strukturální efekty. Značné rozdíly byly zjištěny také při přechodu od izotopu k izotopu (např. zatímco v jádře ^{155}Gd jsou intenzivně buzeny všechny kvadrupolové vibrační stavy, je v jádře ^{157}Gd jejich interpretace velmi obtížná vzhledem k malé intenzitě buzení [16]). Na druhé straně dochází v lichých jádrech k velmi intenzivním přechodům do jednočásticových stavů, pokud jsou výrazně vázány se základním stavem (např. Coriolosovou interakcí).

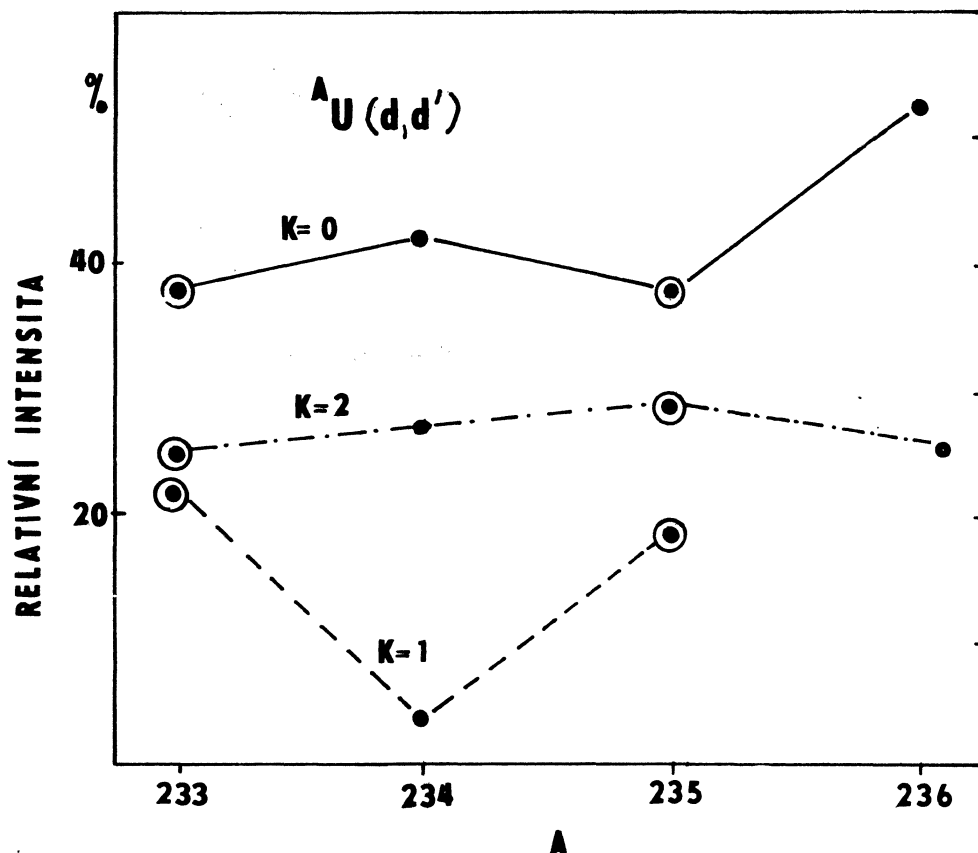
Pro intenzivní přechody do kolektivních stavů zachovává tvar úhlového rozdělení základní charakteristiky, pozorované v sudo-sudých jádrech a odpovídající v podstatě DWBA teorii (výrazná závislost na l i na typu buzeného stavu) [17]. Ne zcela jednoznačná souvislost mezi tvarem úhlového rozdělení a l byla však pozorována pro stavy, buzené v důsledku Coriolisovy interakce [16, 17].



Obr. 3. Buzení γ -vibračních stavů v izotopech erbia nepružným rozptylem 12 MeV deutronů

Důležitou informací o souvislosti kolektivních stavů v sudo-sudých a lichých jádrech je celková intenzita přechodů do těchto stavů, která by měla být nezávislá na typu jádra.

Závislost celkového diferenciálního účinného průřezu pro přechody do γ -vibračních stavů v jádrech Gd a Er na hmotnostním čísle A potvrzuje vysoce kolektivní charakter těchto stavů i v lichých izotopech ^{155}Gd a ^{167}Er . Závislost pro přechody do 2^+ a 4^+ γ -vibračních stavů v sudo-sudých jádrech erbia a do odpovídajících stavů v ^{167}Er je na obr. 3.



Obr. 4. Buzení oktupolových stavů v izotopech uranu nepružným rozptylem 13 MeV deuterónů

Za velmi úspěšné je nutno považovat studium jader ^{233}U a ^{235}U . V obou izotopech byla zjištěna řada intenzivně buzených stavů, jejichž chování neodpovídá ani částicovým, ani kvadrupolovým vibračním stavům. Podrobné srovnání s výsledky získanými jinými autory pro sudo-sudé izotopy uranu [18] ukázalo, že tyto stavy představují oktupolové vibrace v lichých izotopech uranu. V každém izotopu byly interpretovány tři rotační pásy, odpovídající oktupolovým vibracím s různou projekcí K momentu hybnosti na osu symetrie jádra. Závislost celkové intenzity přechodů na A (obr. 4) plně potvrzuje tuto interpretaci pro stav s $K = 0$ a $K = 2$ a ukazuje na rozdíl od sousedních sudo-sudých izotopů uranu kolektivní charakter také pro stavy s $K = 1$. Z hlediska samotné reakce je podstatné zjištění, že v obou izotopech poměr účinných průřezů na 90° a 125° odpovídá hodnotě pro sudo-sudá jádra [15] a je ve shodě s ne zcela adekvátní DWBA teorií [19, 20, 21],

3. Perspektivy další práce

Experimentální materiál, získaný při studiu jaderných reakcí na těžkých deformovaných jádrech, tvoří rozsáhlý základ jak pro teoretické interpretace průběhu reakcí a metody výpočtu, tak zejména pro studium struktury deformovaných jader. Proto se v minulé pětiletce těžiště práce stále více přesouvalo do této oblasti a v současné pětiletce tvoří hlavní náplň dílčího úkolu státního plánu základního výzkumu. Mimořádná pozornost byla věnována vlivu Coriolisovy interakce na buzení částicových stavů jadernými reakcemi i jejího vlivu na strukturu deformovaných jader vůbec. V současné době probíhá také analýza dalších typů zbytkové interakce v jádrech. Práce budou v podstatě v této pětiletce ukončeny a pro další období přejde těžiště práce na Van de Graaffův urychlovač, který bude instalován v nových objektech MFF UK v Troji. Vzhledem k možnostem urychlovače se počítá se studiem předrovnovážných stavů v jádrech a podbariérových efektů při některých reakcích s nabitými částicemi. Konečné upřesnění práce bude provedeno až po uvedení urychlovače do provozu, kdy budou známy jeho skutečné parametry.

Literatura

- [1] DRŠKA L., CHUDÁČEK I., ŠTĚRBA F., Czech. J. Phys. 8 (1958), 648.
- [2] DLOUHÝ Z., PETRŽÍLKA V., ROZKOŠ M., Czech. J. Phys. 5 (1955), 193.
- [3] ROZKOŠ M., Čs. Čas. Fyz. 7 (1957), 9.
- [4] ROZKOŠ M., Czech. J. Phys. 7 (1957), 593.
- [5] ROZKOŠ M., VINTR Z., Czech. J. Phys. B12 (1962), 807.
- [6] ROZKOŠ M., ŠTĚRBA F., ŠTĚRBOVÁ J., Czech. J. Phys. B15 (1965), 153.
- [7] POSPÍŠIL S., ROZKOŠ M., ŠTĚRBA F., WILHELM I., Czech. J. Phys. B17 (1967), 707.
- [8] ROZKOŠ M., ŠTĚRBA F., Czech. J. Phys. B20 (1970), 492.
- [9] CHRISTENSEN P. R., BERINDE A., NEAMU I., SCIENTEI N., Nucl. Phys. 1A29 (1969), 337.
- [10] HOLAN P., ŠTĚRBA F., CEJPEK J., AUC 17, No. 1., (1976), 55.
- [11] HOLAN P., ROZKOŠ M., ŠTĚRBA F., Czech. J. Phys. B25 (1975), 963.
- [12] HOLAN P., ROZKOŠ M., ŠTĚRBA F., CEJPEK J., Czech. J. Phys. B24 (1974), 395.
- [13] BANG J. M., SAETHRE O., Phys. Lett. 28B (1968), 99.
- [14] ŠTĚRBA F., ŠTĚRBOVÁ J., ROZKOŠ M., Czech. J. Phys. B23 (1973), 25.
- [15] ELBEK B., GROTDAL T., NYBØ K., TJØM P. O., VEJE E., Proc. Int. Conf. on Nucl. Structure. Tokyo, 1967.
- [16] ŠTĚRBA F., TJØM P. O., ELBEK B., Nucl. Phys. A162 (1971), 353.
- [17] ŠTĚRBA F., ŠTĚRBOVÁ J., ROZKOŠ M., Czech. J. Phys. B23 (1973), 601.
- [18] BOYNO J. S., HUIZENGA J. R., ELZE TH. W., BEMIS C. E., Nucl. Phys. A209 (1973), 125.
- [19] ŠTĚRBA F., Czech. J. Phys. B18 (1968), 900.
- [20] ŠTĚRBOVÁ J., ŠTĚRBA F., Czech. J. Phys. B27 (1977), 531.
- [21] ŠTĚRBA F., ŠTĚRBOVÁ J., KVASIL J., Czech. J. Phys. B28 (1978), 31.