

# Abschlussbericht

Vorhaben: Resonanzenanregungen in exotischen Kernen

Zuwendungs-  
empfänger: Technische Universität Dresden

Projektleiter: Professor Dr. J. Voigt

FKZ: **06DD139D**

Förderzeitraum: 01.07.2006–30.06.2009

Ziel des Projektes war es, die Systematik der Kernanregungsspektren im Energiebereich der Resonanzmoden (5–30 MeV) über die gesamte Nuklidkarte hinweg zu studieren. Besonderes Interesse galt hier dem Wirkungsquerschnitt für die Dipolanregung in exotischen Kernen, wie er an der GSI bzw. im FZ Dresden-Rossendorf gemessen wird. Weil nur die wenigsten Kerne wirklich sphärisch sind, muss die theoretische Beschreibung auch Anregungsspektren deformierter Kerne beherrschen.

Im vorangegangenen Projekt 06DD119 wurden die notwendigen Formeln für die separable RPA (SRPA) hergeleitet (eine ausführliche Darstellung ist in [1] zu finden) und eine erste Version eines Programmpaketes zu deren numerischer Umsetzung erstellt. Erste, damals begonnene Arbeiten wurden zu Beginn des neuen Förderzeitraumes fertiggestellt und in [2] und [3] veröffentlicht. In [2] wurden die Ergebnisse der Berechnung der Dipol- und Quadrupolmoden für 4 Skyrme-Kräfte mit einem breiten Spektrum für die effektive Masse (SkT6, SkM\*, SLy6 und SkI3) für  $^{154}\text{Sm}$ ,  $^{238}\text{U}$  und  $^{254}\text{No}$  vorgestellt und soweit vorhanden mit den experimentellen Daten verglichen. Des Weiteren wurde der Einfluss der t-ungeraden Terme für beide Moden am Beispiel von  $^{238}\text{U}$  für die 4 Skyrme-Parametrisierungen diskutiert.

In [3] werden ähnliche Untersuchungen für  $^{150}\text{Nd}$  und  $^{238}\text{U}$  durchgeführt und insbesondere auch die Abhängigkeit des Einflusses der t-ungeraden Terme von der effektiven Masse dargestellt.

In einem nächsten Schritt wurde der Programmcode um folgende Möglichkeiten erweitert:

- Routinen zur Berechnung des Coulombterms wurden eingefügt.
- Ergänzt wurde die Möglichkeit der Verwendung von Eingabeoperatoren, die Besselfunktionen enthalten.

Mit dem neuen Programmcode wurden die folgende Untersuchungen durchgeführt und veröffentlicht:

Als erstes wurde in [4] nach seiner Implementierung der Einfluss des Coulomb-terms sowie gleichfalls der Spin-Orbital-Dichte  $\vec{S}_s(\vec{r})$  (siehe [1]) dargestellt und diskutiert.

Fortgesetzt wurden die Untersuchungen zur Abhängigkeit des Einflusses der t-ungeraden Terme von der effektiven Masse. In [5] wurde dies ausführlich am Beispiel von  $^{150}\text{Nd}$  und den schon oben genannten Skyrme-Kräften SkT6, SkM\*, SLy6 und SkI3 dargestellt und zwar für E1(T=1), E2(T=0,1) und E3(T=0,1) Riesenresonanzen. Es zeigte sich, dass dieser Einfluss wesentlich ist für Skyrme-Kräfte mit einer effektiven Masse  $m^*/m < 1$ , dass er sich gleichfalls wesentlich unterscheidet für Isoskalar(T=0)- bzw. Iovektor(T=1)-Riesenresonanzen und dass er aber nicht abhängig ist von der Multipolarität der Resonanzen.

In [7] wurden diese Untersuchungen für den gleichen Kern  $^{150}\text{Nd}$  für E1(T=1) und E2(T=0) Riesenresonanzen auf weitere 4 Skyrme-Kräfte ausgedehnt, die gleichfalls in der Literatur häufig benutzt werden (SkO, SIII, SGII, SLy4). In der gleichen Arbeit werden auch die Ergebnisse zu den Dipolresonanzen für eine Kette von Isotopen von Nd (A=134-158) vorgestellt und diskutiert. Diese Rechnungen wurden mit der Skyrme-Kraft SLy6 ausgeführt, für die sich die beste Übereinstimmung mit den Experimenten ergeben hatte.

Erwähnt seien auch noch Untersuchungen zum Einfluss der Stromdichte j auf E1(T=1), E2(T=0) und E0(T=0) Riesenresonanzen (siehe [6]).

Eine systematische Untersuchung von Trends in den Riesenresonanzen von schweren und superschweren Kernen, die mit umfangreichen Rechnungen verbunden war, erfolgte in [8]. Hier werden die grundlegenden Charakteristika (energy centroid, width, deformation splitting) für die Skyrme-Kraft SLy6 für insgesamt 18 schwere Kerne ( $^{156,160}\text{Gd}$ ,  $^{166,168}\text{Er}$ ,  $^{170,172,174,176}\text{Yb}$ ,  $^{176,178,180}\text{Hf}$ ,  $^{182,184,186}\text{W}$ ,  $^{186,188,190,192}\text{Os}$ ,  $^{232}\text{Th}$  und  $^{234,236,238}\text{U}$ ) analysiert und mit den Daten aus den Experimenten verglichen. Am Beispiel von 3 superschweren Elementen (No (A = 242, 248, 254, 262, 270), 114 (A = 264, 274, 284, 294, 304) und 120 (A = 280, 288, 294, 304, 312)) werden schließlich isotopische Trends in den Dipolriesenresonanzen in Ketten, in denen man einen Übergang von einem sphärischen zu einem deformierten Grundzustand hat, studiert. Bei den superschweren Elementen finden wir für die Dipolresonanzenergie einen ausgeprägten isotopischen Trend, der bei weniger schweren Kernen so nicht vorkommt. Dies zu klären bedarf weiterer Untersuchungen.

Gleichfalls im Dipolkanal wurden erste Untersuchungen des Photoanregungsquerschnittes unterhalb der Teilchenemissionsschwelle durchgeführt. Solche Untersuchungen sind besonders für astrophysikalische Anwendungen wichtig. Die Ergebnisse hierzu, die sich auf die Daten aus den Experimenten an ELBE im FZ Dresden-Rossendorf zu  $^{92-100}\text{Mo}$  stützen, wurden in [9] veröffentlicht.

Parallel zu den Arbeiten zu den elektrischen Moden wurden auch die notwendigen theoretischen Vorarbeiten geleistet, um ein analoges Programmpaket

für die Berechnung von magnetischen Moden und Scherschwingungen erstellen zu können. Danach wurde das vorhandene Programmpaket entsprechend erweitert bzw. geändert. So mußten zusätzliche t-ungerade Terme im Skyrme-Potenzial berücksichtigt werden und das Programm um die Möglichkeit der Verwendung von magnetischen Operatoren und t-ungeraden Eingabeoperatoren erweitert werden. Erste Ergebnisse zu den Spin-M1-Resonanzen liegen vor und wurden zur Veröffentlichung eingereicht [10].

## Literatur

- [1] V.O. Nesterenko, J. Kvasil, W. Kleinig, P.-G. Reinhard and D.S. Dolci, “Self-consistent separable RPA approach for Skyrme forces: axial nuclei”, 43 pp., *arXiv: nucl-th/0512045*
- [2] V.O. Nesterenko, W. Kleinig, J. Kvasil, P. Vesely, P.-G. Reinhard and D.S. Dolci, “Self-consistent separable RPA for Skyrme forces: giant resonances in axial nuclei”, *Phys. Rev. C* **74**, 064306 (2006); *arXiv: nucl-th/0609018*.
- [3] V.O. Nesterenko, W. Kleinig, J. Kvasil, P. Vesely, and P.-G. Reinhard, “Giant dipole resonance in deformed nuclei: dependence on Skyrme forces”, *Int. J. Mod. Phys.*, **E16**, n.2, 624 (2007); *arXiv: nucl-th/0610040*.
- [4] J. Kvasil, W. Kleinig, V. O. Nesterenko, P.-G. Reinhard, and P. Vesely, “Time-dependent density functional theory with Skyrme forces: description of giant resonances in deformed nuclei”, in the *Proceedings of 9th Intern. Spring Seminar on Nuclear Physics “Changing Facets of Nuclear Structure” (Vico Equense, Italy, May 20-24, 2007)* A. Covello (ed.), World Scientific, Singapore, 2008, pp. 437–444.
- [5] V.O. Nesterenko, W. Kleinig, J. Kvasil, P. Vesely, and P.-G. Reinhard, “TDDFT for Skyrme forces: role of current density in multipole giant resonances”, in *Proceedings of 26th International Workshop on Nuclear Theory, Rila, Bulgaria, 2007*, edited by S. Dimitrova (INRNE BAS, Sofia, 2007) p. 273.
- [6] V. O. Nesterenko, W. Kleinig, J. Kvasil, P. Vesely, P.-G. Reinhard, and A.N. Novikov, “Description of collective nuclear dynamics by density functional theory with Skyrme forces”, in *Proceed. of 2nd Intern. Conference “Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy”, Kyiv, Ukraine, 2008*, p. 108-114 (Kyiv, 2009).

- [7] V. O. Nesterenko, W. Kleinig, J. Kvasil, P. Vesely, P.-G. Reinhard,  
"TDDFT with Skyrme forces: Effect of time-odd densities on electric giant resonances",  
*Int. J. Mod. Phys. E* **17**, 89–99 (2008); *arXiv: nucl-th/0711.1090*.
- [8] W. Kleinig, V. O. Nesterenko, J. Kvasil, P.-G. Reinhard, and P. Vesely,  
"Description of the dipole giant resonance in heavy and superheavy nuclei within Skyrme random-phase approximation",  
*Phys. Rev. C* **78**, 044313 (2008); *arXiv: nucl-th/0805.4787*.
- [9] J. Kvasil, P. Vesely, V. O. Nesterenko, W. Kleinig, P.-G. Reinhard, and S. Frauendorf,  
"Skyrme-Random-Phase-Approximation description of E1 strength in  $^{92-100}\text{Mo}$ ",  
*Int. J. Mod. Phys. E* **18**, n.4, 975–985 (2009); *arXiv: nucl-th/0811.4741*.
- [10] P. Vesely, J. Kvasil, V.O. Nesterenko, W. Kleinig, P.-G. Reinhard, and V.Yu. Ponomarev,  
"Skyrme-RPA description of spin-flip M1 giant resonance",  
*submitted to Phys. Rev. C*; *arXiv: nucl-th/0907.0923*.