

Egyetemi doktori (PhD) értekezés tézisei
Abstract of PhD Thesis

**ÁZ ATOMMAGOK KOLLEKTÍV DIPÓLUS
ÁLLAPOTAINAK KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA**

**EXPERIMENTAL STUDY OF COLLECTIVE
DIPOLE STRENGTHS OF NUCLEI**

Stuhl László

Témavezető / Supervisor
Dr. Krasznahorkay Attila



Debreceni Egyetem
Fizikai Tudományok Doktori Iskolája

University of Debrecen
PhD School in Physics

Debrecen, 2013

Készült
a Debreceni Egyetem
Fizikai Tudományok Doktori Iskolájának
Magfizikai programja keretében
a Magyar Tudományos Akadémia,
Atommagkutató Intézetben
(MTA-Atomki)

Prepared at
the University of Debrecen
PhD School in Physics and
the Institute for Nuclear Research,
Hungarian Academy of Sciences
(MTA-Atomki)

1. Bevezetés

Látható világunk anyagának nagyrésze atommagokban koncentrálódik, melyek jellemzően az erős kölcsönhatásnak köszönhetik stabilitásukat, így a természet megismeréséhez az atommagok tanulmányozása nélkülözhetetlen.

Korunk nukleáris tudománya célul tűzte ki az erősen kölcsönható anyag eredetének, fejlődésének és fázisainak megértését az atommagok és a nukleonok szintjén, beleértve a mag állapotegyenletének (EoS) a lehető legpontosabb felírását. A dolgozatomban vizsgált jelenségek nagy része kapcsolatban van az atommagot felépítő nukleonok kollektív állapotaival, kollektív mozgásaival, óriásrezonanciáival. A neutron-gazdag anyag tulajdonságainak pontos ismerete a magfizikai érdeklődésen túl fontos szerepet játszik a kései csillagfejlődés, a termonukleáris szupernóvák megértésében, valamint választ adhat az asztrofizikai jelenségek, a korai Univerzum és a neutroncsillagok szerkezetére is.

Munkámnak az egyik célkitűzése volt az egyik legalapvetőbb kollektív állapot, a dipólus óriásrezonancia vizsgálata a Ca izotóplánc esetén, mely tartalmaz egyrészt kétszer mágikus atommagokat, másrészt a stabil $A=40-48$ izotópláncban a neutronok száma közel másfélszeresére növekszik, így teremtve lehetőséget a neutrontöbblet okozta jelenségek kimérésére.

A neutron-gazdag atommagok felületén kialakuló neutronbőr vastagságának pontos mérése segít az állapotegyenlet szimmetriatagjának pontosításában. Az $N/Z > 1.5$ neutron-gazdag atommagok már nem stabilak, ezért az elmúlt évtizedekben a kutatók figyelme egyre inkább az inverz kinematikában végrehajtható, egzotikus radioaktív nyalábokkal történő kísérletek felé irányult. Napjainkban kétségtelenül a maganyag dinamikáját szondázó reakciókra összpontosítják a legtöbb szabad kapacitást. Ezért is fontos olyan detektorok, spektrométerek építése, amelyekkel ezen reakciókból kilépő részecskék detektálhatók. Így munkám másik célja egy olyan inverz kinematikában alkalmazható neutrondetektor tervezése volt, mely lehetőséget teremt a kilépő kisenergiás neutronok detektálására.

A dolgozatban bemutatott munkát azt Magyar Tudományos Akadémia Atommagkutató Intézet Kísérleti Magfizika Osztályán végeztem 2010 és 2013 között.

2. Új tudományos eredmények:

Munkámban az alábbi, pontokban foglalt új tudományos eredmények születtek:

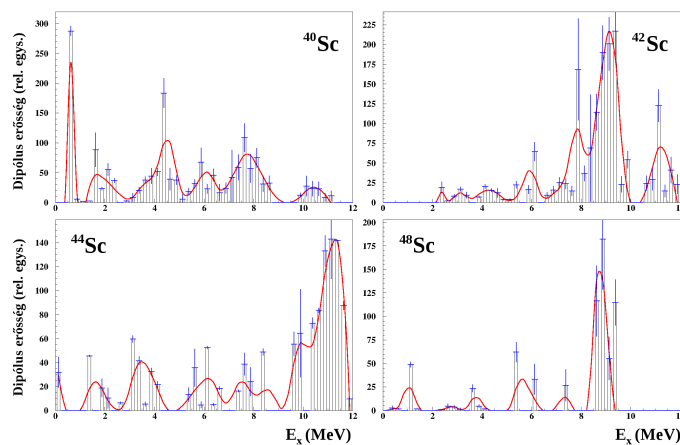
- **1.** A $^{40,42,44,48}\text{Sc}$ atommagok (^3He , t) reakcióban gerjesztett dipólus állapotait tanulmányoztam. A $^{40,42,48}\text{Sc}$ magok esetén összesen közel 300 új állapotot sikerült azonosítanom. Meghatároztam az energiájukat, és a szögeloszlás analízissel rendre 64, 48, 19 új $\Delta L = 1$ dipólus állapotot azonosítottam.[P6,E6]
- **2.** Meghatároztam a $^{40,42,44,48}\text{Sc}$ izotópok esetén a dipólus erősségeloszlást, ami a vizsgált magok esetén egy 8-10 MeV körüli éles csúcsot mutatott, ami egy lágy-dipólus rezonanciának tekinthető.[P4,P6]
- **3.** Jelentős szerepet játszottam a 15 plasztik szcintillációs detektor-százból álló, változtatható geometriai elrendezésű Európai Kisenergiás Neutron Spektrométer (ELENs) megtervezésében és megépítésében. [P1,P7,E1,E3]
- **4.** A neutrondetektálásra alkalmas plasztik szcintillátorokra egy új csomagolási eljárást dolgoztam ki, növelve a detektorban a fénybegyűjtést. A kísérleti adatok alapján 20%-kal nagyobb fénybegyűjtési hatásfokot mértem a korábban használt detektorokhoz képest.[P1,P8,E1,E3,E5]
- **5.** Meghatároztam a detektor idő- és helyfeloldását, hatásfokát, a fénylecsengést a szcintillátorokban. Az ELENs az 1 MeV neutronokat közel 40%-os hatásfokkal detektálja. A detektor paraméterei 1 m-es detektor-céltárgy távolság esetén a célul kitűzött 1° közeli szögfeloldást biztosítani tudják. A GSI-ben végrehajtott kísérletünkben bizonyítottuk, hogy a detektor alkalmas inverz kinematikában végrehajtott töltéscserélő-reakciókban a kisenergiás neutronok detektálásával az egzotikus atommagok vizsgálatára.[P1,P3,P5,E4,E5,E6]
- **6.** Az újdonságnak számító nagy térfogatú LaBr_3 detektorok tulajdonságait vizsgáltuk. Meghatároztuk az energiaspektrumának nonlinearitását és meghatároztam a teljes detektálási hatásfokot, ami 1 MeV-re érvényes 33.1 %-ról egészen a 17.6 MeV- hez tartozó 4.8 %-ra csökkent le. A kimért hatásfokot összevetettük a GEANT4 Monte-Carlo szimulációval kapott értékekkel, és jó egyezést találtunk.[P2,E3]

3. Az eredmények kifejtése:

1. Munkámban a $^{40-48}\text{Ca}(^3\text{He,t})^{40-48}\text{Sc}$ magreakciókban gerjesztett spin-izospin állapotokat vizsgáltam. A mérések az Osakai Egyetem Magfizikai Kutatóintézetében (RCNP) 420 MeV-es $^3\text{He}^{2+}$ nyalábot felhasználva történtek. A nagyon jó energia-feloldást eredményező diszperzió-összehangolással a Grand Raiden mágneses spektrométer egyedülálló lehetőséget biztosított a dipólus rezonancia fragmentációjának tanulmányozására. A gerjesztett állapotok energiáit 15–20 keV pontossággal határoztam meg, összesen a három izotópnál 338 darabot. Az állapotok intenzitásának változását felhasználva, a 0-3.5° szögterületben 8 intervallumra bontva vizsgáltam a szögeloszlásokat. A szögeloszlás mérések alapján az A=40, 42 és 48 tömegszámú Sc izotópokra vonatkozóan rendre 80, 92 és 75 új állapotot találtam, melyekből rendre 64, 48 és 19 az újonnan azonosított dipólus állapot.

Az analízis során 14 esetben nem sikerült megállapítanom a gerjesztett állapotokra jellemző multipolaritás és spin értékeket.

2. Meghatároztam a $^{40-48}\text{Sc}$ izotópok dipólus erősség-eloszlását. A kapott eredményeket az alábbi ábra mutatja:



Mind a négy dipólus erősség-eloszlásban egy periódikus szerkezet figyelhető meg, és ez a jelenség a ^{40}Sc esetén a legdominánsabb, illetve az eloszlásokban 8-10 MeV körül egy viszonylag nagy csúcs látható.

3. Napjaink magfizikájában a magszerkezeti vizsgálatok egyértelműen a stabilitási sávtól távolabb eső izotópok felé tolnak el. A korábbi kutatásokban már bebizonyosodott, hogy a (p, n) töltéscserélő reakciók nagyon hasznos eszközök lehetnek a magszerkezet tanulmányozására. Ezen motiváció alapján született meg a detektorunk terve, hogy eleget lehessen tenni a kísérleti kihívásoknak. Az Európai Kisenergiás Neutron Spektrométert (ELENIS) az egzotikus atommagok vizsgálatára terveztük.

Az ELENs rendszer 16 különálló szcintillációs detektor-szálból épül fel. Minden egyes detektor-szál egy $10 \times 45 \times 1000$ mm³. plastik szcintillátor hasáb. A rendszer repülésiidő-módszerrel képes meghatározni a neutronok energiáját, míg a neutrontektálás pozícióját a szcintillátorok két-két végére illeszkedő foto-elektronsokszorozók időkülömbsege adja. A változtatható geometriai elrendezést három modul teszi lehetővé, teljes szabadsági fokot biztosítva a méréseknek legjobban megfelelő elrendezésre.

4. A detektor-szálakat egy újfajta csomagolási eljárással egy magas reflexiós együtthatóval rendelkező, többrétegű fóliába csomagoltuk be. A fóliát, az irodalomban egyedülálló módon, speciálisan hőkezeltük, hogy egyenként a plasztikok tökéletes geometriai formáját felvegyék, és így biztosítsák a jó fénybegyűjtést a szcintillátorok két végén lévő fotoelektron-sokszorozóban. Az elért, megközelítőleg 20%-os fénybegyűjtési hatásfok-növekedés (mely a részecske detektálási hatásfokkal arányos) jelentős, továbbá jelentősen csökkent a fénylecsengés a detektor-szálakban ezen új eljárásnak köszönhetően.

5. A detektor-szálak közötti átszóródásra 5–10 % alatti értéket kaptam, mely jól egyezik a szimulációinkkal nyert értékekkel. A kísérleti úton meghatározott helyfeloldás 7.2–8.3 cm közötti. Ezek az értékek 1 m-es detektor-céltárgy távolság esetén 1°-os szögfeloldást biztosítanak, mely az 1 MeV körüli gerjesztési energia-feloldáshoz szükséges. A detektor időfeloldására általában 640 ps értéket kaptam. A detektor hatásfok hitelesítését 0.2–5 MeV-es tartományban végeztem el, az ELENs detektor az 1 MeV-es kinetikus energiával rendelkező neutronokat közel 40%-os hatásfokkal tudja detektálni. A kapott eredményeket összevettem az általunk végzett szimulációkkal, az értékek között jó egyezést találtam.

A válaszfüggvényei és tulajdonságai alapján az ELENs spektrométer alkalmas inverz kinematikában végrehajtott töltéscserélő reakciókban a neutronok detektálásával új, pontos információt adni az óriásrezonanciák gerjesztési energiáiról. Így tanulmányozható a vizsgált atommagok neutronbőrvastagsága és egyéb, akár a neutroncsillagok paramétereivel összefüggő jelenség is.

6. Nagy térfogatú LaBr₃ detektorok tulajdonságait, kiváltképpen az energiaspektrumának linearitását és detektálási hatásfokát vizsgáltuk. Kisenergián a teljes detektálási hatásfokot γ -forrásokkal tanulmányoztuk, míg nagyenergián már nem volt lehetőségünk γ -források használatára, így egy másik módszert választottunk, (p, γ) reakciókban keletkező γ -sugárzást alkalmaztunk. Ahhoz, hogy pontosan megtudjam határozni a hatásfokot a nagyenergiák esetén, egy korábban már az irodalomban ismert eljárást használtam, a "pont-pár" módszert. Megállapítottam, hogy 1 MeV től 17.6 MeV-ig a hatásfok nagyjából 1 nagyságrendet csökken.

4 Introduction

The largest part of the visible matter of our world is concentrated in atomic nuclei, that typically owing their stability to the strong interaction. Thus, to understand the nature is essential to study the properties of the nuclei.

Nowadays, one of the main goal of nuclear science is to investigate the origin, evolution and phases of strongly interacting matter on the nuclear and hadronic levels, including, the description of the equations of states (EoS) of the nuclear matter as accurate as possible. The phenomena studied in my work are closely related to the results of the investigation of collective states, collective motions and giant resonances of nuclei.

The investigation of giant resonances is important also to gain deeper understanding of the properties of neutron-rich nuclei, the nature of stellar evolution and supernovae and neutron-stars.

One of the main goals of my work was the investigation of the spin-dipole giant resonance across the Ca isotopic chain in which the difference between neutron number the first available stable isotope and the last one is almost 50%. So the study of these isotopes provides a good tool for the study of effects of the neutron excess.

The study of the neutron-skin thickness of the neutron-rich nuclei helps to clarify the symmetry energy term of the EoS. The $N/Z > 1.5$ neutron-rich nuclei are not stable, so they can not be investigated by the well known experimental methods. In earlier nuclear-physics studies, the nuclear reactions induced by light charged particles turned out to be very useful for studying nuclear structure. Nowadays, such reactions are used in inverse kinematics for studying exotic nuclei. The detection of slow neutrons produced in these reactions with good efficiency and the measurement of their energy and angular distribution requires special detectors, so the other goal of my work was to design and construct a low-energy neutron detector.

I have performed the work presented in this thesis at the Section of Experimental Nuclear Physics of the Institute for Nuclear Research, Hungarian Academy of Sciences in the period from 2010 to 2013.

5 New scientific results:

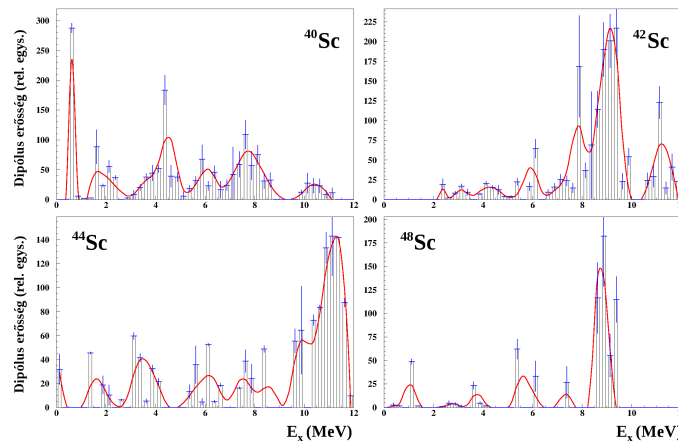
The new scientific results of my work are the following:

- **1.** The excited dipole states of the $^{40,42,44,48}\text{Sc}$ nuclei were studied in the $(^3\text{He},t)$ reaction. In the case of $^{40,42,48}\text{Sc}$ nuclei I processed 338 excited states I determined the energies and angular distributions of the new states and found 64, 48, 19 new $\Delta L=1$ dipole states for $^{40,42,48}\text{Sc}$ nuclei.[P6,E6]
- **2.** I determined the dipole strength distribution of the $^{40,42,44,48}\text{Sc}$ isotopes. In all four nuclei a sharp peak was observed at around 8-10 MeV, which is considered as a soft-dipole resonance.[P4,P6]
- **3.** I played a significant role in the design and construction of the European Low- Energy Neutron Spectrometer system (ELENs). The array consists of 16 plastic scintillator bars and it has a variable geometry. The detector was developed for the detection of low-energy neutrons from charge-exchange reactions in inverse kinematics.
[P1,P7,E1,E3]
- **4.** I used a new wrapping method for the plastic scintillators, which increased the light collection efficiency of the detector. 20% increase of light collection efficiency was obtained.[P1,P8,E1,E3,E5]
- **5.** I determined the time and position resolution and the efficiency of the detector. I investigated also the light attenuation of the detector bars. The spectrometer is capable of measuring low-energy neutrons with approximately 40% efficiency. The spectrometer has an angular resolution of 1° . In our GSI experiment it was shown, that the array is suitable for detecting low-energy neutrons in inverse kinematics.[P1,P3,P5,E4,E5,E6]
- **6.** The properties of large volume LaBr_3 detectors were investigated. The nonlinearity of their energy spectrum was determined. I measured the relative full energy peak efficiency of the detectors, which decreases with the γ -ray energy from 33.1% at 1 MeV to 4.8% at 17.6 MeV. The measured efficiencies were also compared with the calculated ones obtained by a GEANT4 Monte-Carlo simulation, the results are in good agreement.[P2,E3]

6 Discussion of the results:

1. The spin-isospin excited states were studied in the $^{40-48}\text{Ca}(^3\text{He,t})^{40-48}\text{Sc}$ nuclear reactions with $^3\text{He}^{2+}$ beam at 420 MeV. The experiments were performed at the Research Center for Nuclear Physics (RCNP) at Osaka University. The energy of the tritons was measured with the Grand Raiden magnetic spectrometer using dispersion matching technique which provided an unique energy resolution of about 15–20 keV. The analysis of the high resolution spectra resulted identification of many individual levels. I analysed altogether 338 states. The angular distributions were determined for each peaks in the $0^\circ - 3.5^\circ$ angular region. Based on the angular distribution measurements I found 64, 48 and 19 new dipole states in the ^{40}Sc , ^{42}Sc and ^{48}Sc isotopes respectively. In the case of 9 excited states I could not identify the multipolarity and spin values.

2. I determined the the dipole strength distribution for the $^{40-48}\text{Sc}$ isotopes. The results are shown in the following figure:



For all four distributions two observation can be made: there is a relatively strong peak at about 8–10 MeV in each distributions and some periodic structure of the distribution is showing up, especially for ^{40}Ca .

3. Nuclear-structure studies are clearly shifting towards the isotopes that are far from the valley of stability. In earlier nuclear-physics studies, the (p,n) charge exchange reactions turned out to be very useful for studying nuclear structure. Recently, these reactions are started to be used in radioactive beams in inverse kinematics. The use of radioactive beams and inverse kinematics often requires very special targets. The European Low-Energy Neutron Spectrometer (ELENs) was developed for the detection of low-energy neutrons from charge-exchange reactions in inverse kinematics. The spectrometer, which consists of 16 pieces of $10 \times 45 \times 1000 \text{ mm}^3$ plastic scintillator

bars, can be operated in the neutron energy range of 100 keV–10 MeV. The neutron energy is determined using the time-of-flight technique, while the position of the neutron detection is deduced from the time-difference information from photomultipliers attached to both ends of each bar.

4. The number of photons generated in the neutron detection process in the scintillator is rather small, in the order of few tens and, therefore, the loss of photons must be minimized. For this purpose I developed and applied a novel wrapping technology using heat treated VM2000 multi-layer reflector foils. In order to ensure a proper fitting of the reflective wrapping foils to the scintillator bars, the foils were formed by special heat treating prior to the actual wrapping process. A special baking set was made and a heating and cooling cycle was performed, while the foil was placed into the form. I have concluded that using the specially treated foil, we can gain about 20% in relative neutron detection efficiency compared to the previously used wrappings (the differently wrapped detectors).

5. I observed insignificant cross-scattering probabilities (<5–10%) between the detector bars for the scattered neutrons. These results are in good agreement with the results of the simulations. I determined a time resolution of 840 ps (averaged over the 16 bars) and a position resolution of 7.2–8.3 cm. The spectrometer has an angular resolution of 1° , which plays an important role. In inverse kinematics, the neutron energy depends strongly on the laboratory angle: $\delta\theta = 1^\circ$ approximately implies $\delta E^* = 1$ MeV. We investigated the efficiency of the ELENs detector in the 0.2–5 MeV neutron energy region. The array is capable of measuring neutrons with a kinetic energy of 1 MeV with relatively high efficiency, approximately 40%. The efficiency of ELENs was simulated using the GEANT4 Monte-Carlo (MC) code. The simulated and experimental results are in a reasonably good agreement.

Based on the above characteristics and the feasibility studies performed at GSI in the $p(^{124}\text{Sn},n)^{124}\text{Sb}$ reaction at $E = 600$ MeV/nucleon it has been demonstrated that the ELENs system is well suited for experiments performed in inverse-kinematics, and can also be used in exotic radioactive beams.

6. We investigated the properties of large volume ($3.5'' \times 8''$) LaBr_3 scintillation detectors. We studied the nonlinearity of the energy spectra and deduced the relative full energy peak efficiency of the detectors. At low energies the relative full energy peak efficiency was measured using γ -ray emitters. To measure the efficiencies at higher energies a version of the point-pair or two-line method was used. The relative full energy peak efficiency decreases with the γ -ray energy. The measured efficiencies are in good agreement with the simulated ones obtained by a GEANT4 Monte-Carlo simulation code.

7 Közlemények / Publications

**A dolgozat alapjául szolgáló publikációk /
The thesis is based on the following publications**

P1 L. Stuhl, A. Krasznahorkay, M. Csatlós, A. Algora, J. Gulyás, G. Kalinka, J. Timár, N. Kalantar-Nayestanaki, C. Rigollet, S. Bagchi and M.A. Najafi,

A neutron spectrometer for studying giant resonances with (p, n) reactions in inverse kinematics,

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 736 (2014), 1–9

P2 A. Giaz, L. Pellegrini, S. Riboldi, F. Camera, N. Blasi, C. Boiano, A. Bracco, S. Brambilla, S. Ceruti, S. Coelli, F.C.L. Crespi, M. Csatlós, A. Krasznahorkay, J. Gulyás, S. Lodetti, S. Frega, B. Million, A. Owens, F. Quarati, L. Stuhl, O. Wieland,

Characterization of large volume $(3.5'' \times 8'')$ $LaBr_3:Ce$ detectors,

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 729 (2013), 910–921

P3 A. Krasznahorkay, M. Csatlós, L. Stuhl, A. Algora, J. Gulyás, J. Timár, N. Paar, D. Vretenar, M.N. Harakeh,

A new method for measuring neutron-skin thickness in rare isotope beams,

Acta Physica Polonica B, 44 (2013), 559

P4 L. Stuhl, A. Krasznahorkay, M. Csatlós, T. Marketin, E. Litvinova, T. Adachi, A. Algora, J. Daeven, E. Estevez, H. Fujita, Y. Fujita, C. Guess, J. Gulyás, K. Hatanaka, K. Hirota, H.J. Ong, D. Ishikawa, H. Matsubara, R. Meharchand, F. Molina, H. Okamura, G. Perdikakis, B. Rubio, C. Scholl, T. Suzuki, G. Susoy, A. Tamii, J. Thies, R. Zegers, J. Zenihiro,

Soft spin-dipole resonances in ^{40}Ca ,

Journal of Physics - Conference Series, 381 (2012), 012096

P5 A. Krasznahorkay, L. Stuhl, M. Csatlós, A. Algora, J. Gulyás, J. Timár, N. Paar, D. Vretenar, M.N. Harakeh, K. Boretzky, M. Heil, Yu.A. Litvinov, D. Rossi, C. Scheidenberger, H. Simon, H. Weick, A. Bracco, S. Brambilla, N. Blasi, F. Camera, A. Giaz, B. Million, L. Pellegrini, S. Riboldi, O. Wieland, S. Altstadt, M. Fonesca, J. Glorius, K. Göbel, T. Heftrich, A. Koloczek,

S. Kräckmann, C. Langer, R. Plag, M. Pohl, G. Rastrepina, R. Reifarth, S. Schmidt, K. Sonnabend, M. Weigand, N. Kalantar-Nayestanaki, C. Rigollet, S. Bagchi, M.A. Najafi, T. Aumann, L. Atar, M. Heine, M. Holl, A. Movsesyan, P. Schrock, V. Volkov, F. Wamers, E. Fiori, B. Löher, J. Marganec, D. Savran, H.T. Johansson, P. Diaz Fernández, U. Garg, D.L. Balabanski, *Neutron-skin thickness from the study of the anti-analog giant dipole resonance*,
Nuclear structure and dynamics 2012, Melville: American Institute of Physics, AIP conference proceedings, 1491 (2012), 190–197

P6 L. Stuhl, A. Krasznahorkay, M. Csatlós, T. Adachi, A. Algora, J. Deaven, E. Estevez, H. Fujita, Y. Fujita, C. Guess, J. Gulyás, K. Hatanaka, K. Hirota, H.J. Ong, D. Ishikawa, H. Matsubara, R. Meharchand, F. Molina, H. Okamura, G. Perdikakis, B. Rubio, C. Scholl, T. Suzuki, G. Susoy, A. Tamii, J. Thies, R. Zegers, J. Zenihiro, *High resolution study of the relative dipole strength distribution in Sc isotopes*,
Acta Physica Polonica B, 42 (2011), 667–670

P7 C. Langer, A. Algora, A. Couture, M. Csatlós, J. Gulyás, M. Heil, A. Krasznahorkay, J.M. Odonell, R. Plag, R. Reifarth, **L. Stuhl**, K. Sonnabend, T. Torny, F. Tovesson, *Simulations and developments of the Low Energy Neutron detector Array LENA*,
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 659 (2011), 411–418

P8 L. Stuhl, A. Krasznahorkay, M. Csatlós, A. Algora, J. Gulyás, G. Kalinka, Zs.I. Kertész, J. Timár, *A newly developed wrapping method for scintillator detectors*,
Journal of Physics - Conference Series, közlésre elfogadva

Egyéb közlemények / Other publications

P9 A. Krasznahorkay, M. Csatlós, L. Csige, T.K. Eriksen, F. Giacoppo, A. Görgen, T.W. Hagen, M.N. Harakeh, R. Julin, P. Koehler, N. Paar, S. Siem, **L. Stuhl**, T. Tornyai, and D. Vretenar,

Neutron-skin thickness of ^{208}Pb from the study of the anti-analog giant dipole resonance,

Nuclear Theory, 32 (2013), 12–21

eds. A.I. Georgieva, N. Minkov, Heron Press, Sofia

P10 A. Krasznahorkay, J. Gulyás, M. Csatlós, A.Cs. Vitéz, T.G. Tornyai, **L. Stuhl**, L. Csige, Z. Gácsi, A. Krasznahorkay Jr., M. Hunyadi, T.J. Ketel, *Searching for a light neutral axial-vector boson in isoscalar nuclear transitions,*

Dark Forces at Accelerators. DARK 2012, Frascati (Rome) Italy, Laboratory Nazionali di Frascati, INFN, 16–19 Oct., 2012. Proceedings Frascati Physics Series, 56 1 (2013), 86–97

P11 **L. Stuhl**, A. Krasznahorkay, M. Csatlós, T. Adachi, H. Fujita, Y. Fujita, A. Algora, J. Gulyás, J. Daeven, E. Estevez-Aguado, C. Guess, K. Hatanaka, K. Hirota, D. Ishikawa, E. Litvinova, T. Marketin, H. Matsubara, R. Meharchand, F. Molina, H. Okamura, H.J. Ong, G. Perdikakis, B. Rubio, C. Scholl, T. Suzuki, G. Susoy, A. Tamii, J. Thies, R. Zegers, J. Zenihiro, *($^3\text{He}, t$) reactions on ^{40}Ca nucleus, investigation of soft SDR resonances,* Acta Physica Debrecina, 47 (2013) 185

P12 **L. Stuhl**, A. Krasznahorkay, M. Csatlós, T. Adachi, A. Algora, J. Daeven, E. Estevez, H. Fujita, Y. Fujita, C. Guess, J. Gulyás, K. Hatanaka, K. Hirota, H.J. Ong, D. Ishikawa, E. Litvinova, T. Marketin, H. Mathubara, R. Meharchand, F. Molina, H. Okamura, G. Perdikakis, B. Rubio, C. Scholl, T. Suzuki, G. Susoy, A. Tamii, J. Thies, R. Zegers, J. Zenihiro, *High resolution study of the relative dipole strength distribution in ^{42}Sc ,* Acta Physica Debrecina, 45 (2011), 197–206

**Az értekezés témakörében tartott előadások, poszterek /
Talks, posters related to the subject of the thesis**

E1 *ELENS – European Low-Energy Neutron Spectrometer – a new AGDR method,*
NPA VI – Nuclear Physics in Astrophysics VI, Lisbon, Portugal, (2013)

E2 *Construction and test of a low energy neutron spektrometer,*
Zakopane Conference on Nuclear Physics, Extremes of the Nuclear Landscape. The 47th in the series of Zakopane Schools of Physics, Zakopane, Poland, (2012)

E3 *Neutron detektálás,*
XV. Magyar Magfizikus Találkozó, Jávorkút, Magyarország, (2012)

E4 *Neutron detektálás, ELENS,*
Fizikus Doktorandusz Hallgatók Konferenciája, Balatonfenyves, Magyarország, (2012)

E5 *Study of the neutron skin and giant resonances with low energy neutron detector,*
1st Topical Workshop on Modern Aspects in Nuclear Structure. Advances in Nuclear Structure with arrays including new scintillator detectors, Bormio, Italy, (2012)

E6 *High resolution study of the Gamow–Teller strength distribution in Sc isotopes,*
Zakopane Conference on Nuclear Physics, Extremes of the Nuclear Landscape. The 45th in the series of Zakopane Schools of Physics, Zakopane, Poland, (2010)

**Az értekezéshez szorosan nem kapcsolódó előadások, poszterek /
Talks, posters not related to the subject of the thesis**

E7 *Napjaink magfizikája, óriásrezonanciák,*
Tóth Árpád Gimnázium, Debrecen, (2013)

E8 *A standard modell,*
A fizika, matematika és művészet találkozása az oktatásban, kutatásban,
Marosvásárhely, Románia, (2012)

E9 *Utazás az atomok világába,*
Kutatók éjszakája – Árpád Vezér Gimnázium, Sárospatak, Magyarország,
(2012)

E10 *Utazás az anyag szívébe: napjaink magfizikája,*
XXXII. Fizikusnapok, MTA–Atomki, Debrecen, Magyarország, (2011)

E11 *Egy új részecske keresése az atommag femto laboratóriumában, XIV.*
Magyar Magfizikus Találkozó, Jávorkút, Magyarország, (2009)