





**Commissioning on  $^{32}\text{S}$  and First Results for  
 $^{112}\text{Sn}$  from the Low Energy Photon Tagger  
NEPTUN**

**Inbetriebnahme anhand von  $^{32}\text{S}$  und erste  
Ergebnisse über  $^{112}\text{Sn}$  des Niederenergie  
Photonentaggers NEPTUN**

Vom Fachbereich Physik  
der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung des Grades  
eines Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)  
genehmigte Dissertation von

M. Sc. Diego Semmler  
geboren in Lich

Referent: Privatdozent Dr. Heiko Scheit  
Korreferent: Prof. Dr. Dr. h.c. Norbert Pietralla

Tag der Einreichung: 11.04.2017  
Tag der Prüfung: 03.05.2017

Darmstadt 2017  
D 17

June 21, 2017

# Erklärung des Verfassers

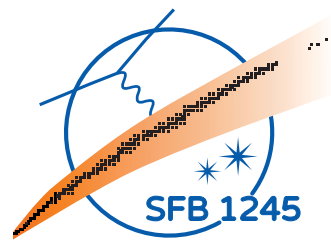
Ich versichere, dass ich diese Dissertation abgesehen von den ausdrücklich angegebenen Hilfsmitteln selbstständig verfasst habe und dass sie noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen hat.

I assure that I wrote this dissertation by myself except for explicitly specified resources and that it never before was presented to any authority of examination.

Laubach, June 21, 2017

*Diego Semmler*  
Diego Semmler

Die vorliegende Arbeit wurde gefördert durch Mittel der deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen der Sonderforschungsbereiche 634 und 1245.



Berichte aus der Physik

**Diego Semmler**

**Commissioning on  $^{32}\text{S}$  and First Results for  $^{112}\text{Sn}$   
from the Low Energy Photon Tagger NEPTUN**

Inbetriebnahme anhand von  $^{32}\text{S}$  und erste Ergebnisse über  $^{112}\text{Sn}$   
des Niederenergie Photonentaggers NEPTUN

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek**

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5382-1

ISSN 0945-0963

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • e-mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Zusammenfassung

Die Entstehung der Elemente ist nach wie vor ein aktives Forschungsfeld. Insbesondere bei Elementen schwerer als Nickel spielt die explosive Nukleogenese eine entscheidende Rolle. Um diesen Prozess beschreiben zu können, ist eine zuverlässige Kenntnis der Zustandsgleichung nuklearer Materie nötig. Während diese Zustandsgleichung für symmetrische Materie bereits gut bekannt ist, trifft das auf asymmetrische Materie, d.h. auf die Symmetrieenergie, nicht zu. Erst kürzlich wurde gezeigt, dass die Symmetrieenergie mit der Neutronenhautdicke korreliert. Die Neutronenhautdicke korreliert wiederum mit der Polarisierbarkeit. Diese kann mithilfe einer vollständigen Messung der Dipolantwort berechnet werden.

Die vorliegende Arbeit beschreibt den aktuellen Aufbau und Funktionstests des Niederenergie Photonentaggers NEPTUN, der sich am Elektronenbeschleuniger S-DALINAC befindet und einen Strahl von getaggtten Photonen zwischen  $\approx 1$  MeV und 20 MeV liefert. Dieser quasi-monoenergetische Photonenstrahl mit einer Auflösung von  $\approx 25$  keV wird benutzt, um die Dipolantwort von Atomkernen zu bestimmen. Das hocheffiziente LaBr<sub>3</sub>:Ce-basierte  $\gamma$ -Spektrometer GALATEA kann nicht nur Zerfälle zurück zum Grundzustand, sondern auch Kaskaden mit annehmbarer Effizienz messen. Ein Kalibrationstarget zum Messen des Photonenflusses ist im Gegensatz zu ähnlichen Experimenten nicht notwendig.

Zur Überprüfung der Funktionen von NEPTUN wurde die gut bekannte 8215.4 keV Resonanz von <sup>32</sup>S vermessen. Der integrierte Wirkungsquerschnitt zum Grundzustand und über den ersten angeregten Zustand stimmen mit den Literaturwerten überein. Die Kaskade über den ersten angeregten Zustand konnte ebenfalls mit zwei koinzidenten Photonen in GALATEA gesehen werden. Ebenso konnte ein qualitativer Beweis der Protonenverdampfung erbracht und 9 Zustände in <sup>31</sup>P beobachtet werden. Obwohl der eigentliche Zweck von NEPTUN vielmehr die Beobachtung eines Kontinuums und nicht einzelner Zustände ist, zeigen diese Ergebnisse, dass das Experiment gut verstanden ist.

Das eigentliche Ziel von NEPTUN ist, die vollständige Dipolantwort der stabilen Sn Isotope zu messen und einen verlässlichen Wert für die Polarisierbarkeit anzugeben. Die erste Messung wurde mit Photonen im Bereich von 7.6 MeV bis 9.6 MeV an <sup>112</sup>Sn durchgeführt. Innerhalb dieses Bereichs wurden der integrierte Wirkungsquerschnitt und die  $B(E1)$ -Stärke bestimmt. Diese stimmen sowohl mit aktuellen (p, p') Experimenten als auch mit der Extrapolation der Dipol-Riesenresonanz, gemessen in ( $\gamma$ , n) Experimenten, überein. Sie weichen jedoch um mehr als eine Größenordnung von vorherigen ( $\gamma$ ,  $\gamma'$ )-Experimenten ab.

Das bedeutet, dass sich ein großer Teil der Dipolstärke in kleinen Zuständen befindet und nur in Experimenten mit bekannter Photonenenergie, wie z.B. NEPTUN, gemessen werden kann.

Um die Messungen in vertretbarer Strahlzeit abzuschließen, bekommt NEPTUN gerade ein größeres Upgrade, das die Messzeit um mehr als zwei Größenordnungen verringern wird. Design, Zweck und die erwartete Leistung der neuen Teile werden beschrieben und neue Ideen für zukünftige Messungen gegeben.





# Abstract

The origin of the elements is a question which is still a field of active research. Especially for elements heavier than nickel, the explosive nucleosynthesis plays a key role. In order to describe this process, a reliable knowledge of the equation of state for nuclear matter is necessary. While the equation of state for symmetric matter is well known, this is not the case for asymmetric matter i.e. for the symmetry energy. Recently it has been shown that constraints on the symmetry energy can be drawn from the neutron skin thickness of nuclei which itself can be constrained from the dipole polarizability. This quantity can be extracted from a measurement of the complete dipole response.

This work describes the current setup and the commissioning of the low energy photon tagger NEPTUN which is located at the  $e^-$ -accelerator S-DALINAC and delivers a beam of tagged bremsstrahlung photons between  $\approx 1$  MeV and 20 MeV. This quasi-monoenergetic photon beam with an energy resolution of approximately 25 keV is used to study the dipole response of nuclei. The highly efficient LaBr<sub>3</sub>:Ce-based  $\gamma$ -spectrometer GALATEA detects not only the direct decays back to the ground state but also cascading decays with suitable efficiency. In contrast to similar experiments no calibration target for the photon flux is required.

For commissioning of NEPTUN the well known 8215.4 keV resonance of  $^{32}\text{S}$  is studied. The integrated cross section to the ground state and to the first excited state was measured and is consistent with literature values. It was possible to confirm the cascade decay via the first excited state by detecting the two coincident decay photons in GALATEA. Qualitative evidence of proton evaporation was also seen and nine levels in  $^{31}\text{P}$  were observed. While designed to measure a continuum and not single states, these results demonstrate that the NEPTUN experiment is well understood.

The key goal of NEPTUN in the near future is to measure the complete dipole response of the stable Sn isotopic chain and to provide a reliable value of the dipole polarizability. The first measurement was performed with photons in an energy range from 7.6 MeV to 9.6 MeV on a  $^{112}\text{Sn}$ -target. Within this range the integrated cross section and the  $B(E1)$  value have been measured. The values match recent  $(p, p')$  scattering experiments and the extrapolation from the giant dipole resonance measured in  $(\gamma, n)$  experiments but deviate from previous  $(\gamma, \gamma')$  experiments by more than an order of magnitude.

This indicates that most of the strength is hidden in small states which can only be measured in experiments like NEPTUN in which the incident photon energy is known.

To complete the measurements within a reasonable beam time, NEPTUN is currently undergoing a major upgrade which is supposed to speed up the measurements by more than two orders of magnitude. The design, purpose and expected performance of the new parts are described and new ideas for prospective measurements are provided.



# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	The Origin of the Elements . . . . .	1
1.1.1	Primordial Nucleosynthesis . . . . .	1
1.1.2	Stellar Nucleosynthesis . . . . .	2
1.1.3	Explosive Nucleosynthesis . . . . .	3
1.2	The Equation of State and Symmetry Energy . . . . .	4
1.3	Liquid Drop Model . . . . .	4
1.4	Neutron Skin Thickness . . . . .	6
1.5	Dipole Polarizability and E1 Response . . . . .	6
1.5.1	The Giant Dipole Resonance . . . . .	7
1.5.2	The Pygmy Dipole Resonance . . . . .	8
1.6	Outline of this Work . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Experimental Techniques</b>	<b>11</b>
2.1	Scattering of Real Photons . . . . .	11
2.1.1	Radioactive Sources . . . . .	11
2.1.2	Bremsstrahlung . . . . .	12
2.1.3	Tagged Bremsstrahlung . . . . .	14
2.1.4	Positron In-Flight Annihilation . . . . .	14
2.1.5	Laser Compton Backscattering . . . . .	14
2.1.6	Free Electron Laser . . . . .	15
2.2	Scattering of Virtual Photons . . . . .	15
2.3	Calculation of B(p1) Strength . . . . .	15

<b>3</b>	<b>Setup of the NEPTUN Tagger</b>	<b>19</b>
3.1	A Brief History of NEPTUN . . . . .	19
3.2	S-DALINAC Accelerator . . . . .	20
3.3	NEPTUN Setup . . . . .	21
3.3.1	Vacuum System . . . . .	21
3.3.2	Radiator . . . . .	22
3.3.3	NEPTUN Magnet . . . . .	23
3.3.4	Focal Plane . . . . .	23
3.3.5	Electron Beam Dump . . . . .	24
3.3.6	Collimator . . . . .	24
3.3.7	Gamma Target Setup . . . . .	25
3.3.8	GALATEA Detector Array . . . . .	26
3.3.9	Gamma Beam Imager . . . . .	26
3.3.10	Gamma Beam Dump . . . . .	27
3.4	Data Acquisition . . . . .	27
3.4.1	Digitizer . . . . .	27
3.4.2	Trigger . . . . .	28
3.4.3	RIO . . . . .	28
3.4.4	Data Storage and Unpacking . . . . .	28
3.5	NEPTUN Control . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Description of the Analysis Method</b>	<b>31</b>
4.1	Event Construction . . . . .	31
4.2	Calibration of the Detectors . . . . .	32
4.2.1	Energy Calibration of HPGe and GALATEA . . . . .	32
4.2.2	Photon Energy Spectrum . . . . .	33
4.2.3	Time calibration of the Fibers and GALATEA . . . . .	34
4.2.4	Energy calibration of the Fibers . . . . .	36
4.2.5	Tagging Ratio . . . . .	38
4.2.6	Fiber Efficiency . . . . .	39
4.3	Discussion of Background Sources . . . . .	40
4.4	Fitting Histograms to Histograms . . . . .	41
4.5	Integrated Cross Section Measurements . . . . .	44
4.5.1	Beam Intensity Correction . . . . .	45
4.5.2	Atomic Self Absorption . . . . .	46

4.5.3	Nuclear Self Absorption and Thermal Broadening . . . . .	46
4.5.4	Energy . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Results for <math>^{32}\text{S}</math></b>	<b>51</b>
5.1	Nuclear Resonance Florescence (NRF) . . . . .	51
5.2	Coincidence Measurements with Fibers . . . . .	56
5.3	Calculation of Energy and Significance . . . . .	61
5.4	Systematic Uncertainties . . . . .	62
5.5	Conclusions . . . . .	64
<b>6</b>	<b>Results for <math>^{112}\text{Sn}</math></b>	<b>67</b>
6.1	Differences to the Analysis of $^{32}\text{S}$ . . . . .	67
6.2	NRF Spectra . . . . .	68
6.3	Coincidence Measurements . . . . .	71
6.4	Systematic Uncertainties . . . . .	76
6.5	Conclusions . . . . .	78
<b>7</b>	<b>Outlook</b>	<b>81</b>
7.1	Motivation of the Upgrade of NEPTUN within CRC 1245 . . . . .	81
7.2	Main Parts of the Upgrade . . . . .	82
7.2.1	Upgrade of the Magnet . . . . .	82
7.2.2	New Electron Beam Dump . . . . .	84
7.2.3	New Focal Plane . . . . .	84
7.2.4	New Vacuum Chamber . . . . .	85
7.3	Prospective Measurements . . . . .	86
<b>8</b>	<b>Acknowledgements</b>	<b>87</b>
<b>A</b>	<b>Derivation of the Cauchy-Lorentz Distribution</b>	<b>89</b>
A.1	Derivation from the Breit-Wigner Distribution . . . . .	89
A.2	Derivation from Time Invariance . . . . .	90
<b>B</b>	<b>Fiber Matrix Scheme</b>	<b>93</b>
<b>C</b>	<b>Drawings Target Holder</b>	<b>95</b>
<b>D</b>	<b>Measured Tagging Ratios</b>	<b>103</b>
<b>E</b>	<b>Calibration Parameters</b>	<b>107</b>