

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25400303

研究課題名(和文) 直線偏光線による低エネルギー電気双極子遷移の発現メカニズムの研究

研究課題名(英文) Study of low-energy electric dipole transitions by linearly polarized photons

研究代表者

静岡 俊行 (Shizuma, Toshiyuki)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 東海量子ビーム応用研究センター・上席研究員(定常)

研究者番号：50282299

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：兵庫県立大学・高輝度産業科学研究所のニュースバル電子蓄積リング施設で稼働中のレーザーコンプトンガンマ線ビームを用いた核共鳴蛍光散乱実験を行った。散乱ガンマ線の強度及び角度分布の測定から、クロム52及び鉛207に対する双極子遷移の強度分布を明らかにした。また、乱雑位相近似モデルに基づく理論計算を行い、残留相互作用として、2粒子2空孔励起による配位混合やテンソル力が重要であることがわかった。また、電気双極子遷移強度の比較から、鉛領域核では、電気双極子遷移強度の増加と中性子スキンの厚みに相関があり、主に、中性子最外殻の3p1/2軌道の寄与によることがわかった。

研究成果の概要(英文)：Nuclear resonance fluorescence measurements using laser Compton scattering gamma rays have been carried out at the NewSUBARU synchrotron radiation facility at University of Hyogo. We have obtained the dipole strength distribution of Cr-52 and Pb-207 nuclei from the measurements of intensities of scattering gamma rays and angular distribution relative to the polarization of the incident gamma rays. Furthermore, random phase approximation model calculations were carried out. As a result, we found that the configuration mixing due to the 2 particle 2 hole excitation and the tensor force are important for the residual interaction to reproduce the dipole strength distribution in Cr-52. We also found that the increase of the electric dipole strength correlates with the thickness of the neutron skin induced by the peripheral nucleon orbital of 3p1/2 in Pb-207.

研究分野：原子核物理

キーワード：原子核構造 電気双極子遷移強度 核共鳴蛍光散乱 レーザーコンプトンガンマ線

1. 研究開始当初の背景

原子核の対称エネルギーは束縛エネルギーや密度分布などを決める重要な物理量であるが、飽和密度以外の核物質では良く理解されていない[1]。一方、中性子過剰核の核表面に現れる余剰な中性子の層(中性子スキン)の厚みから対称エネルギーの評価が可能である。

中性子スキンの厚みは、電子散乱や陽子散乱などを用いた複数の異なる手法で評価されてきたが、最近、電気双極子(E1)遷移強度データから得られる双極分極度を用いて高精度で中性子スキンの厚みを評価できることが示された[2]。双極分極度は、E1 遷移強度を励起エネルギーで除した値の積分値に比例するため、低エネルギーの E1 遷移の寄与が大きくなり、低エネルギー領域での精密な E1 遷移強度データが必要である。しかしながら、E1 遷移の測定では、同時に放出される磁気双極子(M1)遷移との識別が必要であり、これまで、励起エネルギー10MeV 以下の E1 遷移強度の測定は困難であった。

[1]W. Satula et al., Phys. Rev. C74, 011301 (2006).
 [2]A. Tamii et al., Phys. Rev. C107, 062502 (2011).

2. 研究の目的

本研究では、ほぼ100%の直線偏光度をもつレーザーコンプトンガンマ線を用いて、クロム、鉛核の核共鳴蛍光散乱による E1 遷移と M1 遷移の分離計測を行い、中性子放出のしきい値エネルギー以下の E1 及び M1 遷移の強度分布を求める。また、乱雑位相近似模型を用いた理論計算を用いて、E1 及び M1 遷移強度の微視的な分析を行い、クロム、鉛領域核の双極子遷移に関する核構造を明らかにし、E1 遷移強度と中性子スキンの関係を調べる。

3. 研究の方法

高エネルギー加速電子とレーザー光とのコンプトン散乱によって得られるレーザーコンプトンガンマ線を用いて核共鳴蛍光散乱実験を行う。レーザーコンプトンガンマ線は、単色性、偏光性、エネルギー可変性において極めて優れた特徴をもつガンマ線ビームである。そこで、レーザーコンプトンガンマ線のもつ優れた直線偏光性を利用して、E1 遷移と M1 遷移の分離計測を行い、励起状態のパリティの決定を行う。たとえば、垂直方向に直線偏光したガンマ線ビームを標的核に照射すると、散乱角90度では、E1 遷移は、入射ガンマ線の偏光面に対して、垂直な方向へ、また、M1 遷移は平行な方向へ散乱される。したがって、検出器の設置角度によって、E1 遷移と M1 遷移を明確に区別することができる[3]。

核共鳴蛍光散乱実験は、兵庫県立大学のニュースバル電子蓄積リング施設において行った。蓄積リング電子と波長1064nmのレーザー

光を衝突させ、レーザーコンプトンガンマ線を生成した。直径3mmから6mmの鉛コリメーターを用いて、入射ガンマ線のエネルギー選別を行った。ガンマ線のエネルギー幅は、約10%であった。このような性質をもつガンマ線を、クロムや鉛207ターゲットに照射し、散乱角90度に設置した高純度ゲルマニウム検出器を用いて、共鳴散乱ガンマ線の測定を行った。この際、最下流に設置したNaIシンチレーション検出器を用いて、入射ガンマ線の強度測定を行った。

[3]T. Shizuma et al., Phys. Rev. C78, 061303(2008).

4. 研究成果

図1, 2に最大エネルギー9.4MeVと10MeVをもつレーザーコンプトンガンマ線をクロムターゲットに照射した際に得られた散乱ガンマ線のエネルギースペクトルを示している。それぞれ、上図が偏光面と散乱方向が並行の場合、下図が偏光面と散乱方向が垂直な場合のスペクトルである。

図1, 2に示している散乱ガンマ線の偏光面に対する放出角の非対称性の測定結果から、遷移の多重極度の決定を行った。また、散乱ガンマ線の強度から、E1 遷移と M1 遷移に対する換算遷移確率 $B(E1)$ と $B(M1)$ を、それぞれ、 $\Sigma B(E1) = 73.7 \times 10^{-3} e^2 fm^2$ 、 $\Sigma B(M1) = 5.64 \mu_N^2$ と求めた。測定された全 E1 遷移確率は、E1 総和側の約4%で、近傍の Fe-56 や Ni-58 のものと矛盾しないことがわかった。

図3に、E1 換算遷移確率の累積和の測定値と乱雑位相近似(RPA)模型を用いた計算値の比較を示している。これらの比較の結果、残留相互作用として、2粒子2空孔(2p2h)励起による配位混合とテンソル力を入れることにより、E1 遷移強度の測定値をより良く再現できることがわかった。

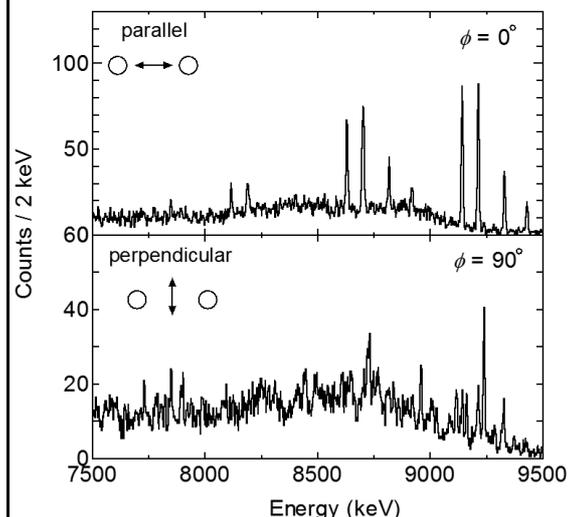


図1. クロム52の核共鳴蛍光散乱ガンマ線のエネルギースペクトル。入射ガンマ線の最大エネルギーは9.4MeV。上図にM1遷移、下図にE1遷移が観測される。

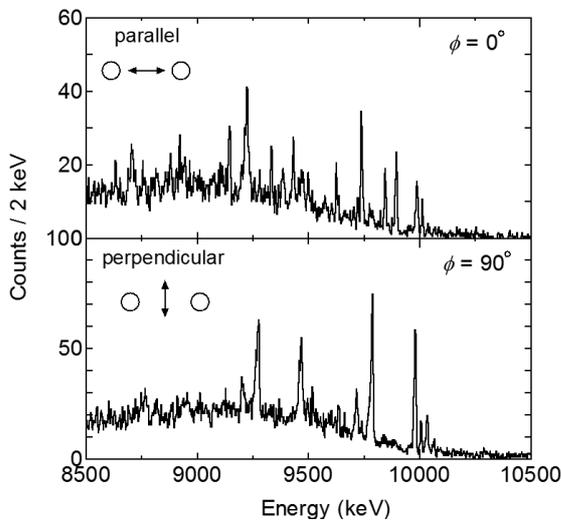


図2. クロム52の核共鳴蛍光散乱ガンマ線のエネルギースペクトル。入射ガンマ線の最大エネルギーは10MeV。上図にM1遷移、下図にE1遷移が観測される。

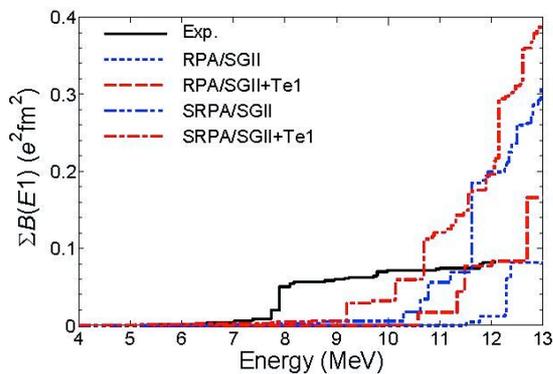


図3. クロム52のE1換算遷移確率の累積和。測定値：黒線、残留相互作用なし：青点線、テンソル力のみ：赤破線、2p2hのみ：青2点破線、2p2h+テンソル力：赤1点破線。

次に、図4に最大エネルギー5.8MeVをもつレーザーコンプトンガンマ線を鉛207ターゲットに照射した際に得られた散乱ガンマ線のエネルギースペクトルを示している。図4に示している散乱ガンマ線の偏光面に対する放出角の非対称性の測定結果から、遷移のスピんと多重極度の決定を行った。

また、散乱ガンマ線の強度から、双極子遷移強度を求めた。本測定結果と近傍の原子核におけるE1遷移強度から、鉛207の励起エネルギー8.32MeVまでの全E1遷移強度として、 $\Sigma B(E1) = 1.27 \text{ e}^2 \text{ fm}^2$ を得た。

さらに、RPAモデルを用いた理論計算との比較から、鉛領域核(Pb-206、Pb-207、Pb-208)では、E1遷移強度の増加と中性子スキンの厚みに相関があり、主に、中性子最外殻の $3p_{1/2}$ 軌道の寄与によることがわかった。

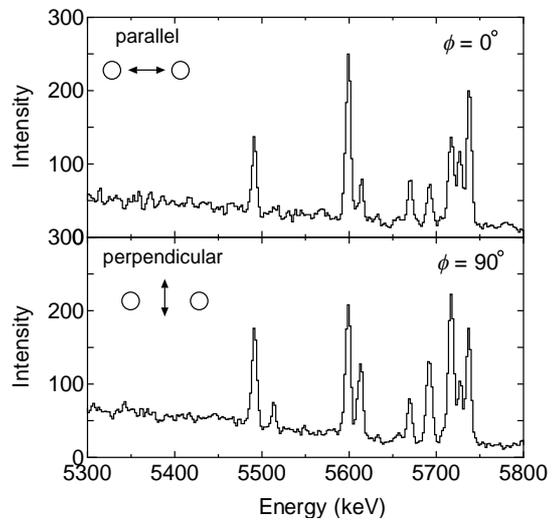


図4. 鉛207の核共鳴蛍光散乱ガンマ線のエネルギースペクトル。入射ガンマ線の最大エネルギーは5.8MeV。上図にM1遷移、下図にE1遷移が観測される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計6件)

宮本修治、レーザーコンプトン散乱ガンマ線ビーム技術開発と応用、レーザー研究、41, 11, 917-921 (2013).

F.Minato and O.Iwamoto, Analysis of β -delayed neutron emission of even-even neutron-rich nuclei with proton-neutron QRPA, Progress in Nuclear Energy, 1, 1-16 (2014).

S.Miyamoto et al., Laser Compton Scattering Gamma-Ray Beam Source at NewSUBARU Storage Ring, Proceedings of the International Symposium "Nuclear Physics and Gamma-Ray Sources for Nuclear Security and Nonproliferation", 1, 143-150 (2104).

F.Minato et al., Study of β delayed neutron with proton-neutron QRPA plus statistical model, JPS Conf. Proceedings, 6, 1-6 (2015).

H. Utsunomiya, S. Hashimoto, S. Miyamoto, The γ -ray Beam Line at NewSUBARU, Nuclear Physics News, 25, 25-29 (2015).

F.Minato, Estimation of a 2p2h effect on Gamow-Teller transitions within the second Tamm-Dancoff approximation, Phys. Rev. C 93, 044319 (2016).

〔学会発表〕(計14件)

宮本修治、レーザーコンプトン散乱ガンマ線ビームによる遮蔽評価法、加速器学会、SAP029、名古屋大学 東山キャンパス 2013年8月

宮本修治、ニューサブールのレーザーコン

プトン散乱ガンマ線源利用と将来への展望、日本物理学会 2013 年秋季大会、高知大学、シンポジウム「次世代高輝度低エネルギーレーザーコンプトン散乱ガンマ線が切り開く展望」2013 年 9 月

静間俊行、C.T.Angell、早川岳人、湊太志、大東出、大垣英明、宮本修治、ニューズバル放射光施設におけるレーザーコンプトンガンマ線を用いた核共鳴散乱実験、日本原子力学会、東京都市大学、2014 年 3 月

宮本修治、蓄積リングを用いたレーザー Compton 散乱偏光ガンマ線による光核反応、第 20 回 FEL と High-Power Radiation 研究会、日本大学理工学部、2014 年 3 月
宮本修治、天野壯、橋本智、井上智章、小泉昭久、関岡嗣久、坂井信彦、宇都宮弘章、秋宗秀俊、山県民穂、嶋達志、早川岳人、静間俊行、D. Bernard、浅野芳裕、伊達伸、大橋裕二、鈴木伸介、大熊春夫、レーザー・コンプトン散乱ガンマ線源による偏極ガンマ線利用研究 2、日本物理学会 第 69 回年次大会、東海大学湘南キャンパス、2014 年 3 月

静間俊行、早川岳人、湊太志、大東出、ハニネグム、大垣英明、宮本修治、核共鳴蛍光散乱を用いた Cr-52 の E1、M1 多重極度測定、日本原子力学会、京都大学、2014 年 9 月

静間俊行、Nuclear Resonance Fluorescence Measurements by Linearly Polarized Photon Beam, 第 15 回光量子科学研究シンポジウム、日本原子力研究開発機構関西光科学研究研究所、2014 年 11 月

宮本修治、山口将志、武元亮頼、小高拓也、南山康人、天野壯、橋本智、小泉昭久、坂井信彦、早川岳人、伊達伸、大熊春夫、D. Bernard、P. Gros、S. Wang、M. Frotin、Y. Geerebaer、A. Delbart、D. Atti、P. Colas、P. Sizun、レーザー・コンプトン散乱ガンマ線源による偏極ガンマ線利用研究 3、日本物理学会 第 70 回年次大会、早稲田大学 湘南キャンパス、2015 年 3 月

静間俊行、モハマドオマル、早川岳人、湊太志、大垣英明、山口将志、武元亮頼、宮本修治、レーザーコンプトンガンマ線を用いた Pb-207 の核共鳴蛍光散乱実験、日本原子力学会、東北大学、2016 年 3 月
静間俊行、早川岳人、湊太志、大東出、ハニネグム、大垣英明、宮本修治、核共鳴蛍光散乱における Cr-52 の E1 及び M1 遷移強度、日本原子力学会、久留米シティプラザ、2016 年 9 月

T. Shizuma、T. Hayakawa、M. Futoshi、I. Daito、H. Ohgaki、S. Miyamoto、Photon Scattering Measurement on ^{52}Cr with Linearly Polarized Photon Beam at NewSUBARU, International Nuclear Physics Conference 2016, Adelaide, Sep. 2016.

S. Miyamoto、Laser Compton Scattering Gamma-ray Beam Generation and Application, International Conference on Nuclear Photonics, Monterey, California, Oct. 16-21 (2016).

S. Miyamoto、NewSUBARU Gamma Beam Source - Status and Activities, Carpathian Summer School of Physics 2016, "Exotic Nuclei & Nuclear / Particle Astrophysics (VI). Physics with small accelerators", Sinaia, Romania, June 26-July 9 (2016).

T. Shizuma Nuclear Resonance Fluorescence Measurements with Mono-Energetic Linearly Polarized Photons, 40th ARSC International Workshop, Japan Atomic Energy Agency, Dec. 2016.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

静間 俊行 (SHIZUMA Toshiyuki)
量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所・東海量子ビーム応用研究センター・上席研究員
研究者番号：50282299

(2) 研究分担者

湊 太志 (MINATO Futoshi)
日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・原子力基礎工学研究センター・研究員
研究者番号：00554065

(3) 研究分担者

宮本 修治 (MIYAMOTO Shuji)
兵庫県立大学・高度産業科学研究所・教授
研究者番号：90135757

(4) 連携研究者

早川 岳人 (HAYAKAWA Takehito)
量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所・東海量子ビーム応用研究センター・上席研究員
研究者番号：70343944