

機関番号：82110
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20540300
 研究課題名(和文) 磁気双極子遷移強度の測定によるニュートリノ非弾性散乱反応率の評価
 研究課題名(英文) Evaluation of neutrino inelastic reaction rates by measurements of magnetic dipole strengths
 研究代表者
 静岡 俊行 (SHIZUMA TOSHIYUKI)
 日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門 研究主幹
 研究者番号：50282299

研究成果の概要(和文)：魔法数28をもつ閉殻核やその近傍核の双極子遷移に関する原子核構造を明らかにするため、レーザー逆コンプトンガンマ線を用いた光核共鳴散乱実験を行った。散乱ガンマ線の強度及び角度分布の測定から、ニュートリノ非弾性散乱反応率の評価に必要な鉄領域核に対する磁気双極子遷移の強度分布を明らかにした。また、殻模型に基づく理論計算を行い、6MeV以上の磁気双極子遷移は核子スピンのフリップに起因するもので、主に、f5/2軌道からf7/2軌道への粒子空孔対励起が関与していることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Nuclear resonance fluorescence measurements by using laser Compton scattering gamma rays have been carried out to explore the magnetic dipole (M1) structure in closed-shell nuclei and their neighbors. We have obtained the M1 strength distribution of iron nuclei which is necessary for evaluation of inelastic neutrino reaction rates. Furthermore, we have performed shell model calculations and elucidated that the M1 transitions above the excitation energy of 6 MeV are mainly caused by particle-hole excitation between f5/2 and f7/2 orbitals.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：原子核物理学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：原子核構造、光核共鳴散乱、レーザー逆コンプトンガンマ線

1. 研究開始当初の背景

超新星爆発によって鉄よりも重い元素が合成されたと考えられているが、標準的な超新星爆発では、重力崩壊によって生成された原始中性子星から放出されたニュートリノが、 ^{56}Fe を主成分とする鉄コアの外層を透過してエネルギーを輸送する。この際、主にニュートリノ非弾性散乱反応が透過率や熱平衡に関与するが、反応率データの整備は進ん

でいない。これは、ニュートリノビームを用いた実験研究が困難であることが主な要因であるが、2004年に、Langankeらによって、非弾性電子散乱反応で得られた磁気双極子(M1)遷移強度をもとに、ラージスケール殻模型を用いた ^{50}Ti 、 ^{52}Cr 、 ^{54}Fe の非弾性反応率が計算された[1]。この計算結果では、ニュートリノ非弾性散乱反応率は、核種によって1桁程度の違いがあり、原子核構造に起因

する核種の個性による差が大きくなることが示されている。したがって、ニュートリノ非弾性散乱反応率の計算には、信頼できるM1遷移強度の実験データが必要不可欠となる。しかしながら、 ^{50}Ti 、 ^{52}Cr 、 ^{54}Fe などの鉄領域の重要な核に対するM1遷移強度の実験データには、これまで多くの矛盾があった。特に、M1遷移強度の測定では電気双極子(E1)遷移との識別が必要であり、これまで測定法では励起状態のパリティの測定が困難であった。

[1]K.Langanke, et al., Phys. Rev. Lett. 93, 202501 (2004).

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逆コンプトンガンマ線を用いて、鉄領域核の光核共鳴散乱反応によるM1遷移とE1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、ニュートリノ非弾性散乱反応率の評価のため、殻模型を用いた理論計算を用いて、M1遷移強度の微視的な分析を行い、鉄領域核の双極子遷移に関する核構造を明らかにする。

3. 研究の方法

レーザー逆コンプトンガンマ線は、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、レーザー逆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、M1遷移とE1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。図1に測定の原理を示している。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、M1遷移は偏光軸と平行な方向へ、また、E1遷移は偏

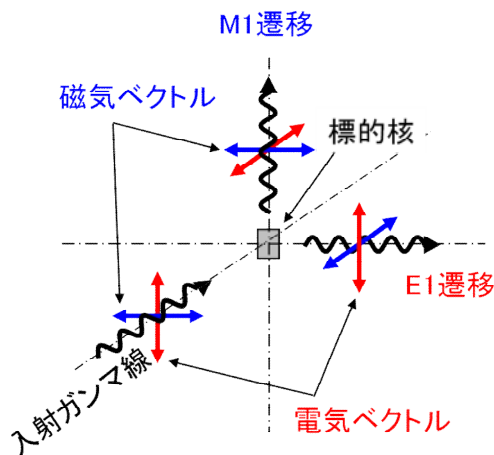


図1. M1遷移とE1遷移の分離測定の原理。

光軸と垂直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、M1遷移とE1遷移を明確に区別することができる。

核共鳴散乱実験は、産業総合技術研究所のテラス電子蓄積リング施設において行った。エネルギー約650MeVから750MeVをもつ蓄積リング電子に、波長1064nmのレーザー光を照射し、最大エネルギー7.7MeVから10.2MeVのレーザー逆コンプトンガンマ線を生成した。直径4mmの鉛コリメーターを用いて、入射ガンマ線エネルギーの選別を行った。ガンマ線のエネルギー幅は約10%である。このような性質をもつガンマ線を、鉄やニッケルターゲットに照射し、散乱核90度に設置したゲルマニウム検出器を用いて、核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。入射ガンマ線強度は、毎秒最大 10^5 個であった。また、レーザーの下流側に、ロータリーソレノイドを設置し、1/2波長板を出し入れすることにより、レーザー逆コンプトンガンマ線の偏光面を縦方向と横方向に変換し、核共鳴散乱ガンマ線強度の放出方向と偏光方向との相関を調べた。

4. 研究成果

図2、3に最大エネルギー7.7MeVと8.7MeVをもつレーザー逆コンプトンガンマ線を鉄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。

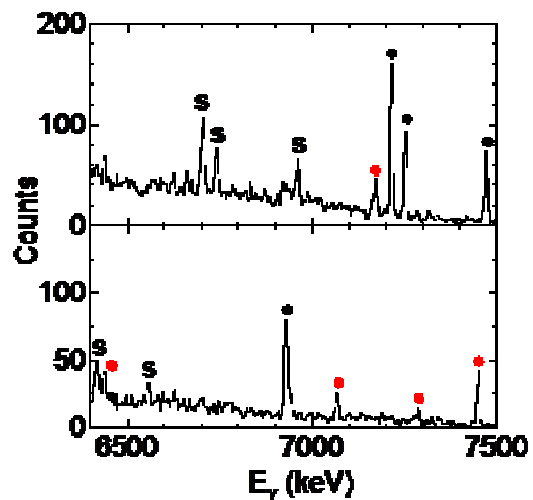


図2. 鉄56の核共鳴散乱ガンマ線のエネルギースペクトル。入射ガンマ線の最大エネルギーは7.7MeV。上図がM1遷移、下図がE1遷移を示している。

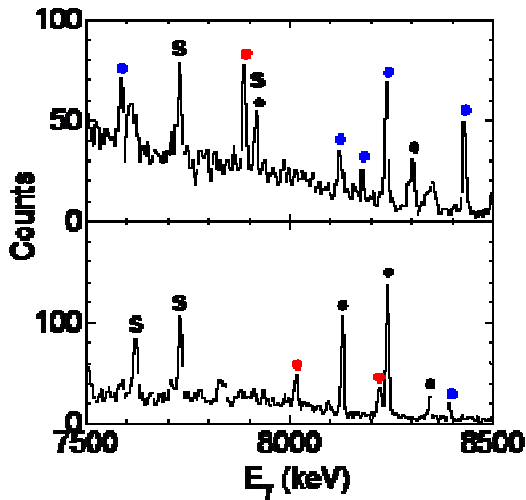


図3. 鉄 56 の核共鳴散乱ガンマ線のエネルギースペクトル。入射ガンマ線の最大エネルギーは 8.7MeV。上図が M1 遷移、下図が E1 遷移を示している。

図2、3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。特に、図に青丸で示した遷移は、本研究において初めて観測され、多重極度が決定された遷移である。また、赤丸で示した遷移は、既知の遷移であるが、本研究において多重極度が決定された遷移である。さらに、散乱ガンマ線の強度から、M1 遷移に対する換算遷移確率 $B(M1)$ を求めた。図4の上図に、換算遷移確率が $0.1\mu_N^2$ 以上で観測された遷移を示している。本測定から、鉄 56 では、6MeV から 10MeV のエネルギー領域において、30 本の M1 遷移が観測され、全遷移確率は $5.8\mu_N^2$ になることが分かった。また、この領域における M1 遷移強度の重心は約 8.5MeV、幅は約 0.9MeV であることが分かった。

本測定結果をもとに、殻模型を用いた理論計算を行い、M1 遷移強度の比較分析を行った。図4の下図に理論計算から得られた鉄 56 に対する M1 遷移強度を示している。エネルギー 6MeV から 10MeV 領域における M1 遷移強度の重心は約 8.8MeV、幅は約 1MeV で、実験値とほぼ一致する。一方、全 M1 遷移強度は、実験に比べ約 7 割と小さい値となり、 $0.1\mu_N^2$ 以上の強度をもつ遷移の数も実験値に比べ 6 割程度あり、理論計算では、遷移強度が $0.1\mu_N^2$ 以下の遷移が多数分布していることが分かった。

エネルギー 3.5MeV 近傍に観測された M1 遷移は、シザースモードと呼ばれる軌道スピンの寄与によるもので、パイ中間子の寄与によるものであることが分かった。また、6MeV 以上の M1 遷移は、核子スピンのフリップによるもので、主に f5/2 軌道から f7/2 軌道への

励起が関与していることが分かった。

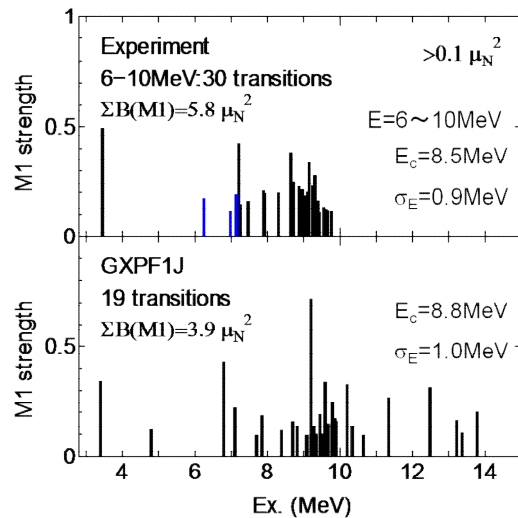


図4. 鉄 56 の核共鳴散乱実験から得られた M1 遷移強度 (上図)。殻模型を用いた理論計算から得られた M1 遷移強度 (下図)。

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 2 件)

- ① Toshiyuki Shizuma, Takehito Hayakawa, Hideaki Ohgaki, Hiroyuki Toyokawa, Tetsuro Komatsubara, Nobuhiro Kikuzawa, Atsushi Tamii, Hitoshi Nakada, Fine structure of the magnetic-dipole-strength distribution in ^{208}Pb , 査読有り, Physical Review C 78, 2008, 061303 1-4.
- ② 静間俊行, 光核共鳴散乱による核構造研究、第 10 回光量子科学シンポジウム論文集、JAEA-Conf 2010-002、103-106

[学会発表] (計 8 件)

- ① 静間俊行、早川岳人、菊澤信宏、大垣英明、豊川弘之、小松原哲郎、民井淳、中田仁、レーザー逆コンプトンガンマ線による ^{208}Pb の E1, M1, E2 遷移強度の測定、日本物理学会、山形大学、2008 年 9 月.
- ② 静間俊行、ニュートリノ相互作用研究のための核共鳴散乱による M1 遷移測定、同位体組成と元素の起源の研究会、国立天文台、2009 年 2 月.
- ③ 静間俊行、早川岳人、菊澤信宏、大垣英明、豊川弘之、小松原哲郎、レーザー逆コンプトン散乱ガンマ線による鉄領域核の核共鳴散乱実験、日本物理学会、立教大学、2009 年 3 月.
- ④ Toshiyuki Shizuma, Takehito Hayakawa, Hideaki Ohgaki, Hiroyuki Toyokawa, Tetsuro Komatsubara,

Nobuhiro Kikuzawa, Atsushi Tamii, Hitoshi Nakada, Nuclear photon scattering experiments by quasi-monochromatic, linearly polarized light sources, The 3rd Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS, Hawaii, Sep. 2009.

- ⑤ 静間俊行、早川岳人、菊澤信宏、大垣英明、豊川弘之、小松原哲郎、レーザー逆コンプトンガンマ線を用いた⁵⁶Feの核共鳴散乱実験、日本物理学会、岡山大学、2010年3月。
- ⑥ Toshiyuki Shizuma, Takehito Hayakawa, Hideaki Ohgaki, Hiroyuki Toyokawa, Tetsuro Komatsubara, Nobuhiro Kikuzawa, Atsushi Tamii, Hitoshi Nakada, Nuclear Resonance Fluorescence Measurements by Quasi-monochromatic, Linearly Polarized Photon Beams, International Nuclear Physics Conference, Vancouver, Canada, July 2010.
- ⑦ 静間俊行、レーザー逆コンプトンガンマ線を用いた光核物理研究、第3回研究戦略ワークショップ「J-PARC ビームラインでの宇宙核物理研究および関連する研究」、東京都上野、2010年11月
- ⑧ Toshiyuki Shizuma, Photo-Nuclear Physics Experiments by using an Intense Photon Beam, Extreme Light Infrastructure Nuclear Physics International Workshop, Bucharest, Romania, March 2011.

〔産業財産権〕

○出願状況（計1件）

名称：核種分析方法、核種分析装置

発明者：静間俊行、羽島良一、早川岳人、大垣英明、豊川弘之

権利者：日本原子力研究開発機構

種類：特許

番号：特願2010-170643

出願年月日：2010年7月29日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

静間 俊行 (SHIZUMA Toshiyuki)

日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用
研究部門・研究主幹

研究者番号：50282299

(2) 研究分担者

豊川 弘之 (TOYOKAWA Hiroyuki)

産業技術総合研究所・計測フロンティア研
究部門・研究員

研究者番号：80357582

大垣 英明 (OHGAKI Hideaki)

京都大学・エネルギー理工学研究所・教授

研究者番号：10335226

中田 仁 (NAKADA Hitoshi)

千葉大学・理学研究科・教授

研究者番号：80221448

(3) 連携研究者

早川 岳人 (HAYAKAWA Takehito)

日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用
研究部門・研究主幹

研究者番号：70343944