

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03665

研究課題名(和文)直線偏光ガンマ線で生成された中性子非対称性測定による新しいプローブ

研究課題名(英文)New probe for neutron anisotropy generated by linearly polarized gamma-rays

研究代表者

早川 岳人 (Hayakawa, Takehito)

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：70343944

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：1957年にAgodiが100%直線偏光した線(  $\gamma$ , n)反応で放出された中性子の角度分布はビーム軸に対して90度の角度で計測した場合、 $a + b \cos(2\theta)$ に従うことを理論的に予言した。しかし、半世紀以上検証されていなかった。我々はニュースバル放射光リングに蓄積された電子ビームとレーザーのレーザーコンプトン散乱で生成された直線偏光線を用いて、 $^{56}\text{Fe}(\gamma, n)^{55}\text{Fe}$ 反応実験の中性子の角度分布を計測した。結果は予言された関数 $a + b \cos(2\theta)$ で再現できた。さらに $^9\text{Be}$ に対する非等方性を計算して、非等方性は励起状態に依存することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In 1957, Agodi predicted that the neutron angular distribution in  $(\gamma, n)$  reactions with a 100% linearly polarized gamma-ray beam for dipole excitation should be anisotropic and universally described by the simple function of  $a + b \cos(2\theta)$  at the polar angle  $\theta = 90$  degree, where  $\theta$  is the azimuthal angle. However, this prediction has not been experimentally confirmed in over half a century. We have measured the azimuthal anisotropy of neutrons emitted from the  $^{56}\text{Fe}(\gamma, n)^{55}\text{Fe}$  reaction with a linearly polarized gamma-ray beam generated by laser Compton scattering with laser on a single bunch electron with an energy of 1 GeV stored the NewSUBARU synchrotron radiation ring. The azimuthal anisotropy of the neutrons has been well reproduced using a theoretically predicted function of  $a + b \cos(2\theta)$ . We have calculated the anisotropy on  $^9\text{Be}$  considering the nuclear structures. The result indicates that the anisotropy is sensitive to the excitation station.

研究分野：実験原子核物理学

キーワード：レーザーコンプトン散乱 線 光核反応

### 1. 研究開始当初の背景

重力崩壊型超新星爆発では、重力崩壊によって中心部に形成された原始中性星から膨大なエネルギーのニュートリノが放出され、そのエネルギーの約 1%が外層に落とされて、超新星爆発が引き起こされると考えられている。また、ニュートリノ放出過程において MSW 効果によるニュートリノ振動だけでなく、極めて高いニュートリノ密度環境のみで発生するニュートリノ集団運動によるニュートリノ振動の発生が予想される。さらに、外層のうち比較的深層部に位置する酸素/ネオン層ではニュートリノ原子核反応によって、 $^{138}\text{La}$  や  $^{180}\text{Ta}$  などの希少同位体が生成されていると考えられている。そのため、ニュートリノと原子核の相互作用の理解は、超新星爆発のメカニズム、ニュートリノ物理、ニュートリノ元素合成過程の理解に必要不可欠である。

ニュートリノ原子核反応断面積は非常に小さく、これまで  $^{12}\text{C}$ 、 $^{56}\text{Fe}$  等の少数の原子核標的に対して計測されただけであり、今後も広い質量領域に対する系統的な測定は期待できない。そのため、理論の果たす役割が大きい。長らく、ニュートリノ原子核相互作用では、ガモフ・テラー型遷移が中心的な役割を果たすと考えられていた。最近の理論計算では、原子核の角運動量変化が 2 以上の遷移も無視できない量であることが判ってきた。角運動量変化が 2~4 の遷移による寄与は 10~50% ぐらいを占め、原子核の種類及びエネルギーに依存する。すなわち、原子核の個性が強いのである。そのため、超新星爆発で重要な 10~100MeV のエネルギー領域のニュートリノ原子核反応断面積は理論計算で求める必要があり、原子核の  $1^+$  状態密度 (基底状態が  $0^+$  の場合) ないし磁気的双極子 (M1) 遷移強度の測定結果は理論計算の検証に重要である。

しかし、これまで理論予測に対して測定された M1 強度は大幅に小さく、長年の問題となっている。中性子離別エネルギー以上 (だいたい 10MeV 以上) の領域では、E1 遷移による巨大双極子共鳴 (GDR) が強く出現するため (図 1 参照)、この領域の M1 強度を計測する有効な手段は未だにない。

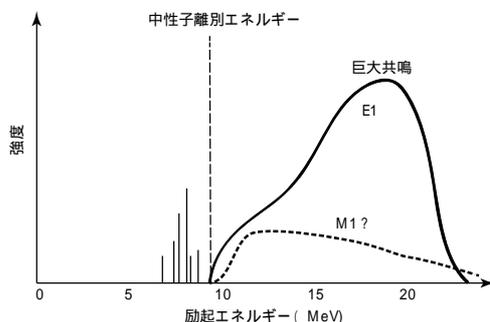


図 1 M1 遷移強度の模式図

直線偏光した 線を原子核に照射し、核

共鳴蛍光散乱で放出された 線の直線偏光面に対する方位角を計測すると、M1 遷移強度及び、電子的双極子 (E1) 遷移強度を明確に識別できることは知られており、実際に原子核の励起状態のスピンとパリティの決定に用いられている。そこで、研究代表者は直線偏光した 線の ( $\gamma, n$ ) 反応で放出される中性子の直線偏光面に対する角度分布から、E1 遷移強度と M1 遷移強度を、核共鳴蛍光散乱実験と同様に分離できるのではないかとこの着想を得た。

文献調査によると、現在は忘れ去られた論文 (1970 年代以降に引用された形跡がない) によって理論的な研究がされていたことが判明した。1957 年に Agodi は、直線偏光した 線の ( $\gamma, n$ ) 反応による中性子の角度分布について、角運動量とパリティの保存則から、ビーム軸に対して  $\theta = 90^\circ$  における方位角 (直線偏光面からの角度) の角度分布は、 $a + b \cdot \sin^2(\theta)$  になることを予言した (A. Agodi, *Il Nuovo Cimento*, 1, 21(1957))。しかし、近年まで 100% 直線偏光した 線源が存在しなかったため、この論文は忘れさられ実験的に検証されていなかった。

そこで、我々の先行研究では、直線偏光した 線の ( $\gamma, n$ ) 反応の中性子の角度分布を 3 核種 (Au, I, Cu) において測定し、中性子の角度分布が 1957 年に Agodi によって予言された関数で記述できることを半世紀ぶりに実証した (K. Horikawa et al., *Phys. Lett. B*, 737, 109 (2014))。しかし、M1 遷移強度と E1 遷移強度を取り出す手法については未解明であった。

### 2. 研究の目的

我々の先行する上記の研究では、直線偏光面に対する方位角  $\theta$  に対する角度分布は、30 度単位で 0 度から 360 度の範囲で計測している。しかし、関数  $a + b \cdot \sin^2(\theta)$  を考慮すると、対称性が高く実質的に 4 点の計測に等しい。そこで、Agodi の理論的予測をより確実に検証するために 0 度から 90 度の範囲でより細かく角度分布を計測する。そのため、 $^{56}\text{Fe}$  などの偶偶核をターゲットにして直線偏光したレーザーコンプトン (Laser Compton scattering; LCS) 線による ( $\gamma, n$ ) 反応の中性子の非等方性を測定する。放射線は飛行時間 (Time of Flight: TOF) 法で測定し、線と中性子を識別する。Agodi の理論では、M1 と E1 では非等方性の符号が逆になる。この点を元に、直線偏光 線の ( $\gamma, n$ ) 反応から、E1 遷移強度と M1 遷移強度を識別する手法を求めることを目的とする。そのため、理論研究をすすめる、最適な実験値の角度及び実験方法を確立させる。また、原子核構造を取り入れた核反応モデルを完成させ、実験値との比較を行い検証する。

### 3. 研究の方法

レーザーコンプトン散乱(LCS) 線は、図2のように電子蓄積リング等に蓄積された電子とレーザーの逆コンプトン散乱(トムソン散乱)によって、高エネルギーの線を生成する技術である。生成された線は、準単色、エネルギー可変、空間的にビーム状等の特徴を有する。また、レーザーの偏光度がそのまま線に移行するため、ほぼ100%直線偏光の線を生成することができる点が従来の線より優れた点の一つである。

現在、MeV領域でユーザー利用可能なLCS線施設は、HIGS(Duke Uni.), NewSUBARU(兵庫県立大)UVSOR-III(分子科学研究所)の3か所のみであり、核物理研究等で優れた成果を生み出している。LCS線の重要性が世界的に認知され、EUでは2018年完成予定でELI-NP(ルーマニア)で高輝度LCS線装置の建設を開始した。しかし、ユーザー利用可能になるのは2019年度以降になると予想される。そこで、本研究ではNewSUBARU放射光のレーザーコンプトン散乱線装置を用いて実験を行った。

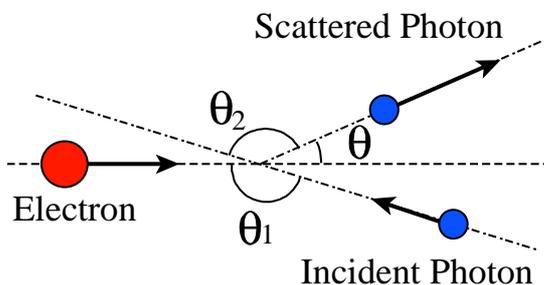


図2 レーザーコンプトン散乱線の概念図

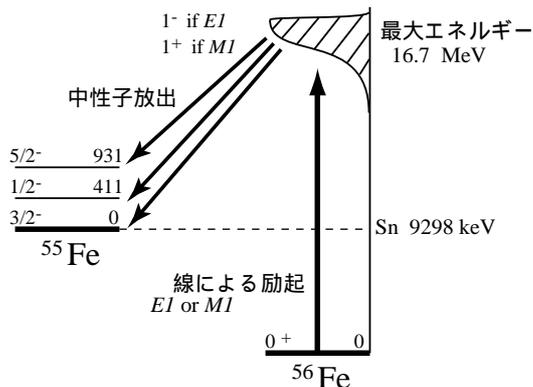


図3  $^{56}\text{Fe}$  に対する  $(n, n)$  反応の模式図

中性子のエネルギー計測は飛行時間測定(TOF)法を行った。図3に $^{56}\text{Fe}$ を標的核とした場合の核反応の模式図を示す。原子核は、線を吸収して励起状態を形成し、励起状態から一部の原子核は中性子を放出して、中性子数が1個少ない同位体(残留核)に変換される。一部の反応では、中性子放出によって残留核の励起状態を形成し、励起状態から基底状態に崩壊する過程をとる。そのため、 $(n, n)$ 反応は、標的核の励起状態(中間状態)及び、残留核の終状態(基底状態ないし、い

ずれかの励起状態)によって異なる反応である。仮に中間状態・終状態を同定するためには、時間分解能を上げることで、放出された中性子のエネルギーを制限すること及び、入射線のエネルギー幅を狭くする必要がある。時間分解能を上げるために、立ち上がり時間が速いシンチレーター(EJ-232)と、高速度な光電子増倍管(H2431-50)を用いた。

TOF法ではLCS散乱線をパルス化する必要があるのである。通常の運転モードでは、電子蓄積リング内で複数の電子バンチが周回している。そこで、1パルス運転モードで実験を行った。パルス幅8nsの約 $1\mu\text{m}$ の波長のレーザーを正面衝突させLCS線を生成させた。蓄積リングの電子ビームのパルス幅60psのため、生成される線のパルス幅も原理的に60psであり、TOF実験の期待される時間精度よりも十分に短い。パルスビームを試料に照射し、試料中の $(n, n)$ 反応で生成される中性子をTOF法で計測した。MeV領域では中性子の速度は光速の10%程度であり、1mの距離では目的とする中性子の飛行時間は20~40nsかかる。TOF法の基準となる時間信号には、加速器のRF源の信号を用いた(図4参照)、RF源の信号をトリガー用に分け、分周器で25kHz程度に落としている。この信号はレーザーの外部トリガーに入力されレーザー発振のタイミングを制御している。

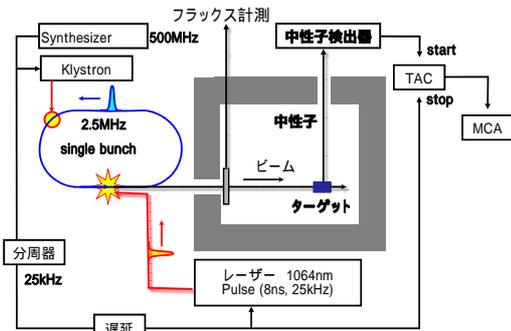


図4 飛行時間計測法の回路模式図

現在、ニュースパルのLCS線ビームラインでは、串刺し状の2つの実験室が使用可能である。第一実験室では厚さ50cmのコンクリートで覆われた部屋の中にターゲットを配置して、直径10cm程度の穴を通して中性子を外部に導く。ターゲット室が遮蔽されているので、S/Nが良いというメリットがある。ターゲットから中性子検出器までの距離は最短で1mであり、最大3m程度まで伸ばすことができる。しかし、中性子の検出効率が中性子誘導の穴の直径で制限されているという問題がある。一方、第二実験室では片側1.5m程度の幅があり、複数の中性子検出器を配置できるというメリットがある。ただし、線のビームダンプからのバックグラウンドが強いという問題がある。複数の検出器を配置した場合には、配置できる鉛シールドの厚さに制限があり、十分にバックグラウンドを落とすことができない。また、ケーブル等の取

り回しのため、ターゲットと検出器の距離は約 84cm と第一実験室での距離より短い。TOF 法において、時間分解能を上げるには飛行距離を長くする必要がある。そのため、第一実験室の方が距離の点で有利である。また、第一実験室の場合には検出器を 1 台しか使えない代わりに、同じ検出器を用いるため検出器の系統誤差を最少にすることができるという長所がある。そのため、最終的には第一実験室で測定を行った。

線の直線偏光面はレーザーの直線偏光面を変えることで変更できる。検出器システムを固定したまま測定するため、系統誤差を小さくできる。ただし、ミラーが予期せず直線偏光面を変えてしまう可能性があるため、電子との衝突点におけるレーザーの偏光面を測定する必要がある。そのため、LCS 線生成の後に、レーザーを蓄積リングの外にミラーなしで導き、グラントムソン・プリズムで直線偏光面を測定した。

これまで、この種の実験がほとんどされていないため、解析方法は確立していない。そこで、線の励起と中性子放出を別の過程とするシンプルな 2 ステップモデルを構築する。

線の吸収により、双極子遷移で励起した原子核のスピンのパリティは強い制限を受ける。そのような状態から、中性子放出によって残留核の基底状態に遷移するプロセスを考える。原理的に E1 遷移と M1 遷移では、最初に励起される状態のパリティが異なる。Agodi の計算では、その場合に非等方性  $b/a$  は E1 遷移と M1 遷移で符号が逆になることが指摘されている。また、分担者の緒方准教授の理論計算では、 $b/a$  は電磁気的遷移密度に直接的に関係し、原子核構造モデルを取り入れた計算を行うことで、実験値と比較できる。核反応の部分については理論構築を完成させ、核構造モデルを取り入れ完成させた。

また、直線偏光線の性質を追求すると同時に、線の回折などの基礎技術の探求を行った。さらに、超新星ニュートリノ元素合成過程の研究を行った。

#### 4. 研究成果

図 5 に TOF による時間スペクトルの一例を示す。パルスビームの標的におけるコンプトン散乱等線と中性子を明確に分れているのが分かる。また、バックグラウンドを無視できるほど低いことが判る。時間スペクトルの中から中性子のピーク面積を、直線偏光面の角度の関数として計測したのが図 6 である。この実験では方位角について 0 度から 90 度の範囲で 7 点計測した。この実験データは、Agodi が予言した  $a + b \cdot \sin(2\theta)$  の関数で最少二乗法で求めた関数で良く説明できる。

ガンマ線の直線偏光面が定まっている場合の角運動量保存則に起因する核反応に関する理論計算モデルの枠組みは完成した。その結果、原子核の励起状態を経由するため励

起状態の波動関数を求め、遷移確率を計算して取り込む必要があることが判明した。鉄のような中重核では 10 ~ 20MeV の高励起状態では、状態密度が高く個々の励起状態を求めることは現実に不可能である。そのため、角度分布を求めるために、もっとシンプルな励起状態の原子核で個々の励起状態について計算し角度分布を求めることにした。

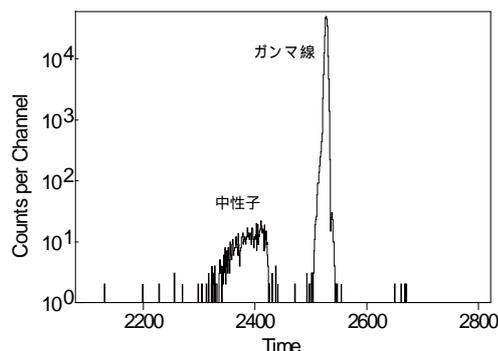


図 5 飛行時間計測のスペクトル

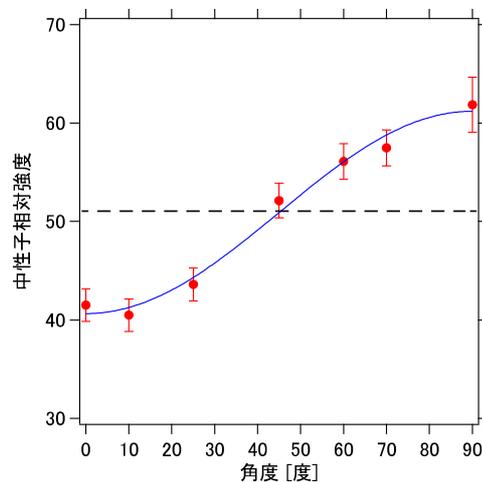


図 6 計測した角度分布

軽元素の中では  ${}^9\text{Be}$  が  $(\gamma, n)$  反応断面積が大きいことが知られており、状態密度は個々のレベルが計算可能なほど低い。また先行研究で直線偏光ガンマ線による中性子角度分布は、最近別のグループによって測定されているのでテストケースとして適している。そこで、 ${}^9\text{Be}$  の計算をすすめた。その結果、個々の共鳴状態に対応した中性子の角度分布及び、連続状態に対する角度分布を求めることができた。

低エネルギー領域では、共鳴状態のエネルギー近傍において、非等方性パラメータ  $b/a$  が極小値(あるいは極大値)を持つことから、非等方性が終状態の構造、特に共鳴状態の有無、に鋭敏であることが判明した。共鳴状態が存在しない高いエネルギー領域では、特に非等方性はエネルギーの増加と共に緩やかに変化するだけであり、符号は E1 と M1 で同じ値を取る領域が広いことから、励起モードに対する感度が低いことが判明した。また、全反応断面積においては、共鳴状態が識別できない微細構造を持つ場合がある。その

ようなケースで、励起モードが異なる場合には、非等方性の測定によって識別できる場合があることが判明した。

以上の理論モデルの構築及び、 ${}^9\text{Be}$  による具体的な計算例では、直線偏光線による ( $\gamma, n$ ) 反応の中性子の角度測定からは、核共鳴蛍光散乱の場合のように、単純に E1 遷移強度と M1 遷移強度を識別することはできない。しかし、詳細な核構造の計算を取り入れた計算を行うことで、共鳴状態のより詳細な情報 (励起モード) を得ることが可能であることが判明した。

本研究は、偏光特性という線の性質を利用しており、直線偏光した線を用いることで、デルブリュック散乱断面積を選択的に測定できる状態を理論的に見出した。また、デルブリュック散乱の高次の効果が示唆されていたが、そのような効果がないことを、LCS 線を用いて検証した。円偏光した大強度レーザーの非線形逆コンプトン散乱によって角運動量を持った渦線の生成方法を提唱した。また、最終的な目的は超新星ニュートリノ物理の理解であるが、新しい超新星ニュートリノ核種の提案を行った。

#### 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 14 件)

- 1) T. Nakamura, and T. Hayakawa, Laser-driven c-ray, positron, and neutron source from ultra-intense laser-matter Interactions, PHYSICS OF PLASMAS, 22, 83113 (2015). 10.1063/1.4928889
- 2) T. Hayakawa, T. Shizuma, S. Miyamoto, S. Amano, A. Takemoto, M. Yamaguchi, K. Horikawa, H. Akimune, S. Chiba, K. Ogata and M. Fujiwara, Spatial anisotropy of neutrons emitted from the  ${}^{56}\text{Fe}(\gamma, n){}^{55}\text{Fe}$  reaction with a linearly polarized  $\gamma$ -ray beam, Phys. Rev. C, 93, 44313 (2016). 10.1103/PhysRevC.93.044313
- 3) Shunya Matsuba, Takehito Hayakawa, Toshiyuki Shizuma, Nobuyuki Nishimori, Ryoji Nagai, Masaru Sawamura, Christopher T. Angell, Mamoru Fujiwara, and Ryoichi Hajima, Enhanced diffraction of MeV  $\gamma$ -rays by mosaic crystals, Japanese Journal of Applied Physics, 55, 112402 (2016). 10.7567/JJAP.55.112402
- 4) T. Hayakawa, Y. Toh, M. Huang, T. Shizuma, A. Kimura, S. Nakamura, H. Harada, N. Iwamoto, S. Chiba, and T. Kajino, Measurement of the isomer production ratio for the  ${}^{112}\text{Cd}(n, \gamma){}^{113}\text{Cd}$  reaction using neutron beams at J-PARC, Phys. Rev.

C, 94, 55803 (2016).  
10.1103/PhysRevC.94.055803

- 5) Kawasaki T., Naito S., Sano Y., Hayakawa T., Shizuma T., Hajima R., Miyamoto S. Measurement of deflection on germanium and gold prisms using 1.7 MeV laser Compton scattering  $\gamma$ -rays, Phys. Lett. A, 381, 3129-3133 (2017).  
doi.org/10.1016/j.physleta.2017.07.030
- 6) Koga, James K., Hayakawa, Takehito, Possible Precise Measurement of Delbruck Scattering Using Polarized Photon Beams, Phys. Rev. Lett. 118, 204801 (2017).  
10.1103/PhysRevLett.118.204801
- 7) Hayakawa Takehito, Hatsukawa Yuichi, Tanimori Toru,  ${}^{95g}\text{Tc}$  and  ${}^{96g}\text{Tc}$  as alternatives to medical radioisotope  ${}^{99m}\text{Tc}$ , Heliyon, e0049, (2017).  
10.1016/j.heliyon.2017.e00497
- 8) Taira Yoshitaka, Hayakawa Takehito, Katoh Masahiro, Gamma-ray vortices from nonlinear inverse Thomson scattering of circularly polarized light, Scientific Reports, 7, 5018 (2017).  
DOI:10.1038/s41598-017-05187-2
- 9) Hayakawa Takehito, Shizuma Toshiyuki, Horikawa Ken, Miyamoto Shuji, Amano Sho, Yamaguchi Masashi, Takemoto Akinori, Chiba Satoshi, Akimune Hidetoshi, Ogata Kazuyuki, Fujiwara Mamoru, M1 Strength in Photonuclear Reactions with Linearly Polarized  $\gamma$ -ray Beam, JPS Conference Proceedings, 14, 21012 (2017).  
doi.org/10.7566/JPSCP.14.021012
- 10) Hayakawa Takehito, Nakamura Tatsufumi, Proposal of Direct Reaction Cross Section Measurements on an Excited State to Study Explosive Nucleosyntheses, JPS Conference Proceedings, 14, 21013 (2017).  
doi.org/10.7566/JPSCP.14.021103
- 11) Hayakawa Takehito, Toh Yosuke, Shizuma Toshiyuki, Kimura Atsushi, Nakamura Shoji, Harada Hideo, Iwamoto Nobuyuki, Kajino Toshitaka, Chiba Satoshi, Neutron Capture Reaction on  ${}^{112}\text{Cd}$  to Study of the s-process Origin of  ${}^{115}\text{Sn}$ , JPS Conference Proceedings, 14, 20901 (2017).  
doi.org/10.7566/JPSCP.14.020901
- 12) J. W. Shin, M. Cheoun, T. Kajino, T. Hayakawa, A new scheme for short baseline electron antineutrino disappearance study Journal of Physics G, Nuclear and Particle

Physics, 44, 09LT01 (2017).  
10.1088/1361-6471/aa809e

13) H. Sasaki, T. Kajino, T. Takiwaki, T. Hayakawa, A. B. Balantekin, Y. Pehlivan  
Possible effects of collective neutrino oscillations in three-flavor multiangle simulations of supernova vp processes  
Physical Review D, 96, 043013 (2017).  
10.1103/PhysRevD.96.043013

14) J. W. Shin, M. Cheoun, T. Kajino, T. Hayakawa,  
Short-baseline electron antineutrino disappearance study by using neutrino sources from  $^{13}\text{C} + ^9\text{Be}$  reaction  
Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2017-04, 044 (2017).  
10.1088/1475-7516/2017/04/044

〔学会発表〕(計 2 件)

国際会議「Neutrinos and dark matter in nuclear physics (NDM15)」, T.Hayakawa,  
Neutrino-process in supernovae,  
2015/6/1-6/5, Jyvaskyla, Finland

国際会議「The 26<sup>th</sup> International Nuclear Physics Conference」, T.Hayakawa,  
Supernova Neutrino Process and Sensitivity to Neutrino Temperatures,  
2016/9/11-9/16, Adelaide, Australia.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

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(定常)  
研究者番号：70343944

(2)研究分担者

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

(3)研究分担者

緒方 一介 (OGATA, Kazuyuki)  
大阪大学・核物理研究センター・准教授  
研究者番号：50346764

(4)研究分担者

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(定常)  
研究者番号：50282299

(5)研究分担者

菊地 右馬 (KIKUCHI, Yuma)  
大阪市立大学・大学院理学研究科・特任講  
師  
研究者番号：00648024

(6)連携研究者

天野 壮 (AMANO, Sho)  
兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所・  
助教  
研究者番号：50271200