

様式 C-19

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月25日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540295

研究課題名（和文）

銀河系ガンマ線源 Al-26 の天体起源の解明

研究課題名（英文）

Nucleosynthesis of gamma-ray emitter Al-26 in the Galxy

研究代表者

小松原 哲郎 (KOMATSUBARA TETSURO)

筑波大学・数理物質系・講師

研究者番号：10195852

研究成果の概要（和文）：

人工衛星に搭載されたガンマ線検出器による観測により、半減期72万年の²⁶Alの崩壊に由来するガンマ線が天の川銀河方向から飛来している事が観測された。この²⁶Alの生成量を正確に知る為には、この原子核を生成する核反応のバイパス経路に位置する²⁶Siの原子核構造の情報が非常に重要である。そこで、我々はこの²⁶Siの原子核構造をガンマ線分光法を用いて調べ、元素合成に関連すると予想される状態として、5889keVに新たな準位を見出した。この準位はガンマ線角度相関の測定から0⁺状態である事が判明した。

研究成果の概要（英文）：

Observation of gamma-rays originated from radioactive nucleus ²⁶Al, whose half life is 720 thousand yr, is the crucial proof of nuclear synthesis in the Galaxy. In order to reproduce yield of the gamma-rays from ²⁶Al, information of excited states in ²⁶Si, which is located in bypass sequence of the ²⁶Al creation cascade, is quite important. In our present study with gamma-ray spectroscopy, we newly observed one level at 5889-keV in the ²⁶Si. Spin parity of this level is determined as 0⁺ by our angular correlation measurements.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

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（実験）、宇宙元素合成、アルミニウム26、ガンマ線分光、ガンマ線同時計数、ガンマ線角度相関測定、原子核構造、ゲルマニウム検出器

1. 研究開始当初の背景

半減期 7 2 万年の ^{26}Al からのガンマ線が人工衛星に搭載されたガンマ線検出器によって Diehl らにより系統的に観測された。 ^{26}Al は天の川銀河の中心部に分散している様に観測され、銀河の回転に由来するドップラーシフトも観測された。このガンマ線は ^{26}Al の基底状態 (スピン 5^+) が電子捕獲して 9 7 % の確率で ^{26}Mg の第一励起状態の 2^+ へ遷移し、この 2^+ が 0^+ へ遷移する際に放出される 1809keV である。ガンマ線は物質に対して透過力があるが、残念ながら地球の大気は厚く地上に到達できない為、人工衛星に搭載された検出器で初めて観測が可能になった。この宇宙空間に分散する ^{26}Al は、超新星爆発や新星爆発、あるいは、宇宙線を放出するウルフ・レイヤ星により、宇宙空間に放出されていると推定される。この ^{26}Al からのガンマ線の観測は、天の川銀河における元素合成が現在も活発である事を明確に示すものである。また、アレンデ隕石などにおけるマグネシウムの同位体比の精密測定では ^{26}Mg 同位体比の異常が報告され、これにも ^{26}Al の生成量が深く関与している。この ^{26}Mg 同位体異常と ^{27}Al の量の間に非常良い相関がある為、半減期 7 2 万年の ^{26}Al が何らかの理由で過剰に生成され、それが 7 2 万年で崩壊する前にアルミニウムとして岩石に取り込まれ、その後 ^{26}Mg になったと推定される。すなわちこの隕石は、地球で採取される鉱物とは異なる起源で ^{26}Al が過剰に生成され、地球上に飛来したと推定される。この様に ^{26}Al は宇宙元素合成を理解する上で非常に重要な原子核である。しかし、一方、超新星爆発での宇宙元素合成の理論計算では、この ^{26}Al と同様に ^{60}Fe も同様に観測されると期待されたが、実際の観測値では ^{60}Fe は推定値の $1/6$ しか観測されず問題となっている。この ^{26}Al の生

成量の計算には、基礎データとして、低エネルギー原子核反応、および原子核構造の情報が使用されるが、この核データに曖昧な点が残っている。そこで、我々はこの ^{26}Al の生成に関与すると考える ^{26}Si の原子核構造の研究を行った。

2. 研究の目的

宇宙元素合成を理解する上で重要な ^{26}Al の合成は ^{24}Mg に由来する。 ^{24}Mg に陽子がぶつかり、半減期 7.2 秒の ^{25}Al が生成され、これが電子捕獲崩壊で安定な ^{25}Mg になった後、再度、陽子がぶつかり ^{26}Al が生成される。しかし、この経路の途中に位置する ^{25}Al の半減期は 7.2 秒なので、高い反応率の高温状態で反応が進むと ^{25}Al が陽子と融合し ^{26}Si 反応が生成される。この ^{26}Si は ^{26}Al の親核であるが、基底状態スピンが 0^+ であるので、スピンの選択則から ^{26}Al の基底状態の 5^+ には遷移せず、第一励起状態の 0^+ に遷移する。するとこの第一励起状態は半減期 6.3 秒で ^{26}Mg の基底状態の 0^+ へ崩壊してしまうため、1809keV のガンマ線を放出しないバイパス経路となる。つまり、 ^{26}Si を経由する反応は ^{26}Al の生成を阻害する流れであり、この経路の反応率は ^{26}Al の生成量を求める上で非常に重要である。しかし、最近の実験的研究において、その反応率に曖昧さが指摘されていた。問題になっているのは、 $^{25}\text{Al}(p, \gamma)^{26}\text{Si}$ 反応の反応率である。 ^{25}Al はスピンパリティが $5/2^+$ であり、 $1/2^+$ の陽子が S 波で融合すると、 3^+ または 2^+ が生成される。反応に関与するのは ^{26}Si の陽子放出閾値 5.55137MeV の直ぐ上から、ガモフエネルギー (2MeV 程度) の準位であり、これらの状態のスピン、パリティ、励起エネルギーの情報が非常に重要である。この領域の ^{26}Si の核構造は、これまで核反応やガンマ線分光の研究で既に研究されて来たが、データに食い違いがあった。こ

の為、我々は、 ^{26}Si の原子核構造を調べる為にガンマ線分光実験を開始した。

3. 研究の方法

宇宙元素合成を理解する上において非常に重要な ^{26}Al の生成過程のバイパス経路に位置する ^{26}Si の励起状態をインビームガンマ線分光法の手法で研究した。筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門に於いてガンマ線分光実験を行なった。厚み $6\text{mg}/\text{cm}^2$ のマグネシウムターゲットに 12UD ペルトロン加速器で 10MeV に加速された ^3He を照射し、 $^{24}\text{Mg}(^3\text{He},n)^{26}\text{Si}$ 反応で生成された ^{26}Si が脱励起する際に放出されるガンマ線を測定した。ガンマ線測定は、検出効率 140% (日本原子力研究開発機構所有) のゲルマニウム検出器、および検出効率 70% のゲルマニウム検出器を用いて、ガンマ線同時計数実験をおこなった。さらに、検出器の角度

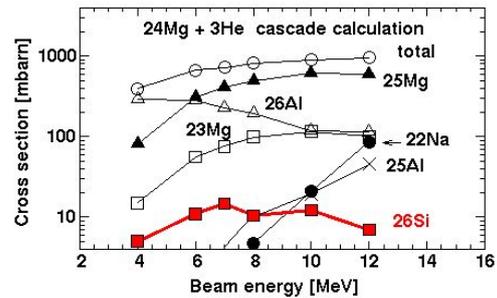
^{26}Si 2.2 sec	^{27}Si 4.2 sec	^{28}Si stable
^{24}Al 2.1 sec	^{25}Al 7.2 sec	^{26}Al 720000 y
^{23}Mg 11 sec	^{24}Mg stable	^{25}Mg stable
^{22}Na 2.6 a	^{23}Na stable	^{26}Mg stable

マグネシウム+ヘリウム3反応で観測された原子核を斜線で示す。

をビーム軸に対して 90° と 135° に変えて、ガンマ線角度相関測定を行った。

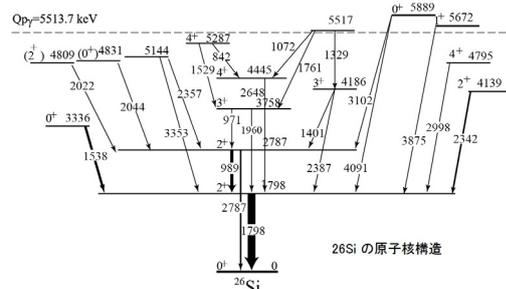
このマグネシウムターゲットに ^3He ビームを照射する実験では、目的の ^{26}Si 以外に ^{23}Mg 、 ^{24}Mg 、 ^{25}Mg 、 ^{26}Mg 、 ^{26}Al 、 ^{28}Si などの原子核からのガンマ線が観測された。実験で観測された原子核を図に示す。この理由は $(^3\text{He},n)$ 反応の分岐比が 1% しかない事に由来する。

反応の Q 値の関係から、 $(^3\text{He},2p)$ 反応や $(^3\text{He},p)$ 反応が起きやすい。スケード計算結果による ^{26}Si 反応断面積を図に示す。これらの原子核からのガンマ線は妨害バックグラウンドであるが、一方、既に正確にガンマ線のエネルギーが報告されていた為、エネルギー校正の為に標準値として使用した。



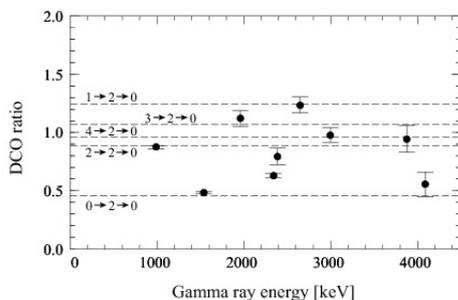
4. 研究成果

ガンマ線同時計数測定の結果得られた、 ^{26}Si の準位構造を図に示す。コインシデンス関係を解析した結果、 ^{26}Si の第一励起状態が崩壊する際に放出される 1797keV ガンマ線とほぼ同時に放出されるガンマ線として、新たに 3102keV と 4091keV のガンマ線が見出された。このうちの 3102keV ガンマ線は、第二励起状態が崩壊する際に放出される 989keV ガンマ線と同時に放出される事が確認された為、 ^{26}Si の新たな励起状態として 5889keV の存在が確認された。この状態は、陽子閾値の 5513.7keV より上にある為、 $^{25}\text{Al}(p,\gamma)^{26}\text{Si}$ 反応に関与する事が出来る重要な準位である。



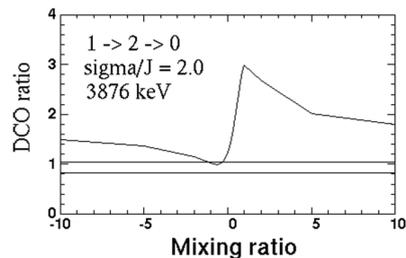
この観測に加え、5672keV も確認された。この準位は、既に Seweryniak により米国の GAMMASPHERE 実験で報告されていた準位である。一方、 $^{25}\text{Al}(p, \gamma)^{26}\text{Si}$ 反応で最も重要と推定される、陽子閾値の上の 3^+ 状態の観測も試みた。もしこの状態が生成されるとすると、鏡映核 ^{26}Mg の準位構造と酷似していると推定され、4186keV の 3^+ 状態への遷移が観測されるはずである。しかし、詳細にガンマ線同時計数マップを解析したが、残念ながらこの遷移は観測できなかった。

今回新たに観測された状態のスピニパリティを決定する為にガンマ線角度相関測定を行った。ビーム軸に対して、2台の検出器を置き、両者とも 90 度に設置した測定と、90 度と 135 度に設置した場合の強度の比を調べた結果を図に示す。この測定から 5889keV のスピニが 0 である事が判った。負パリティは原子核模型を考慮すると非常に考えにくいので結局スピニパリティは 0^+ と決められた。



ガンマ線角度相関測定の結果

5672keV の準位は Seweryniak が 1^+ と報告し、ここから 3875keV のガンマ線が放出されるが、このガンマ線の角度相関測定の結果は、上図では $1 \rightarrow 2 \rightarrow 0$ 遷移から外れている。しかし次の図のようにガンマ線遷移混合比を変化させて理論値を計算すると、Mixing ratio $\delta = -0.5$ 程度で実験と良く整合する。



^{26}Si の陽子閾値のすぐ上の準位構造は、ガンマ線分光の手法以外に荷電粒子移行反応や中性子 TOF 測定などで研究されてきている。Parpottas は $(^3\text{He}, n)$ 反応から放出された中性子の TOF 測定を行い、断面積を計算値と比較して 0^+ 、 1^+ 、 3^+ を報告している。また、 (p, t) 反応を用いた実験では、Bardayan や Chipps の報告がある。さらに Caggiano は $(^3\text{He}, ^6\text{He})$ 反応を用いて 1^+ と 3^+ を報告した。また、Thomas は β 崩壊遅延陽子を観測し、 3^+ を予言している。また、Matic と Kwon もピークを観測した。以下の表にこれらの文献値と我々の結果を比較した。我々の測定した励起エネルギーは 5886keV であるが、これは Bardayan 等の 5916keV より低く誤差範囲に含まれない為、全く別の状態が観測されたと推定される。

^{26}Si levels	(1)	(2)	(3)
Bardayan 2002 (p,t) DWBA		5916 ± 2 0^+	
Bardayan 2006 (p,t) FRESCO		5914 ± 2 $2^+, 3^+$	
Parpottas 2004 ($^3\text{He}, n$) Hauser-Feshbach	5670 ± 4 1^+	5912 ± 4 3^+	5946 ± 4 0^+
Caggiano 2002 ($^3\text{He}, ^6\text{He}$) スピニは推定	5678 ± 8 1^+		5945 ± 8 3^+
Kwon 2008 ($^4\text{He}, ^6\text{He}$)		5918 ± 8	
Matic 2010 (p,t) 弱く見えない		(5921)	(5944)
Chipps 2010 (p,t)		5927 ± 4 3^+	
Seweryniak 2007 $^{12}\text{C}(^{16}\text{O}, ^2n)$	5677.0 ± 1.7 1^+		
Komatsubara $^{24}\text{Mg}(^3\text{He}, n)$	5672.1 ± 0.71*	5885.7 ± 1.6 0^+	
Peplowski 2009 $^2\text{H}(^{25}\text{Al}, n)$ Florida State Univ. FRESCO		5874 ± 70 3^+ l=0 resonance	
Thomas 2004 delayed proton		5930 3^+	

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5件)

(1) K. Setoodehnia, A.A. Chen, T. Komatsubara, S. Kubono, D.N. Binh, J.F. Carpino, J. Chen, T. Hashimoto, T. Hayakawa, Y. Ishibashi, Y. Ito, D. Kahl, T. Moriguchi, H. Ooishi, A. Ozawa, T. Shizuma, Y. Sugiyama, H. Yamaguchi, Spin and parities of astrophysically important ^{30}S states from $^{28}\text{Si}({}^3\text{He}, n\gamma){}^{30}\text{S}$, Physical Review C83, 018803 (査読有)

DOI : 10.1103/PhysRevC.83.018803

(2) S. Kubono, Dam N. Binh, S. Hayakawa, H. Hashimoto, D. Kahl, Y. Wakabayashi, H. Yamaguchi, T. Teranishi, N. Iwasa, T. Komatsubara, S. Kato, Le H. Khiem, Nuclear Clusters in Astrophysics, Nucl. Phys. A 834, 647c - 650c, (2010) (査読有)

DOI : 10.1016/j.nuclphysa.2010.01.113

(3) A. Kim, N.H. Lee, I.S. Hahn, J.S. Yoo, M.H. Han, S. Kubono, H. Yamaguchi, S. Hayakawa, Y. Wakabayashi, D. Binh, H. Hashimoto, T. Kawabata, D. Kahl, Y. Kurihara, Y.K. Kwon, T. Teranishi, S. Kato, T. Komatsubara, B. Guo, G. Bing, W. Liu, Y. Wang, Direct measurement of the $^{140}(\alpha, \alpha)^{140}$ cross section for astrophysically important $^{140} + \alpha$ resonances, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 57, No. 1, July (2010), pp. 40-43 (査読有)

DOI : 10.3938/jkps.57.40

(4) K. Nomura, Y. Ohki, M. Fujimaki, X. Wang, K. Awazu, T. Komatsubara, Plasmonic

activity on gold nanoparticles embedded in nanopores formed in a surface layer of silica glass by swift-heavy-ion irradiation, Nanotechnology Vol. 20 Num. 47 475306, November (2009) (査読有)

DOI:10.1088/0957-4484/20/47/475306

(5) K. Awazu, X. Wang, T. Komatsubara, J. Watanabe, Y. Matsumoto, S. Warisawa, S. Ishihara, The fabrication of aligned pairs of gold nanorods in SiO_2 films by ion irradiation, Nanotechnology 20 (2009) 325303 (査読有)

DOI: 10.1088/0957-4484/20/32/325303

[学会発表] (計4件)

(1) 小松原哲郎、「1M タンデトロンによる宇宙核物理」、「筑波大学複合タンデム加速器施設の新展開—タンデム加速器更新計画と今後の研究展望」、於筑波大学、2012年3月29日

(2) 小松原哲郎、「 ^{26}Si 励起状態の角分布、角相関測定」、日本物理学会 第67回年次大会、於関西学院大学、2012年3月24日～27日

(3) 小松原哲郎、「ガンマ線分光による宇宙核物理学の研究」、「高度制御量子ビーム応用研究創出事業 研究成果報告会」、於筑波大学、2010年3月15日

(4) Tetsuro Komatsubara, Astrophysical studies by means of gamma-ray spectroscopy, The 10th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies, University of Osaka, March 8-10, 2010

[その他]

ホームページ:

<http://www.tac.tsukuba.ac.jp/~komatsu>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小松原 哲郎(KOMATSUBARA TETSURO)

筑波大学・数理物質系・講師

研究者番号: 1 0 1 9 5 8 5 2

(2) 連携研究者

早川 岳人 (HAYAKAWA TAKEHITO)

日本原子力研究開発機構・研究主幹

研究者番号: 7 0 3 4 3 9 4 4

静間 俊行 (SHIZUMA TOSHIYUKI)

日本原子力研究開発機構・研究主幹)

研究者番号: 5 0 2 8 2 2 9 9