

## 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 25 年 4 月 18 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740169

研究課題名（和文） 3 粒子融合反応に基づく宇宙元素合成の新しい理解

研究課題名（英文） New understanding of nucleosynthesis based on ternary fusion processes

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：3 つの  $\alpha$  粒子（ヘリウム原子核）から炭素 12 が形成されるという反応の理解を、3 体量子力学反応論を用いることにより深化させた。特に 3 体融合という反応に平明な解釈（定式化）を与え、かつ他の反応モデルとの違いを明らかにした。また、実験グループとの共同研究をスタートさせ、3 体融合反応の実証実験の立案に参画し、その遂行の一翼を担った。なお、本研究の過程で反応模型の様々な改良が得られた事も、重要な成果として掲げたい。

研究成果の概要（英文）：This study provided deep understanding of the  $^{12}\text{C}$  formation process from three alpha particles ( $^4\text{He}$  nuclei), by means of a three-body quantum mechanical reaction theory. Plain formulation of the ternary fusion process (TFP) and differentiation from other existing models are very important outcomes of this study. Collaboration with experimental group to measure the TFP process was also initiated; they have successfully carried out a measurement very recently. Besides, some important modifications on the reaction model have been done, which fruitfully produced several reaction works.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

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：3 粒子融合反応, Ternary Fusion Process, 宇宙元素合成, triple alpha, CDCC

## 1. 研究開始当初の背景

精力的な研究により、宇宙進化における元素合成の解明は大きく進みつつあるが、従来の研究においては、3 つの粒子が同時に衝突して元素を形成する過程（3 粒子融合反応）の寄与が本質的に見落とされてきたという重大な問題があった。3 粒子融合反応は、通常考慮されている 2 粒子の反応が何らかの理由

で禁止あるいは制限される場合、元素合成の唯一の筋道として、極めて重要な役割を果たす。

3 粒子融合反応の代表例が、3 つの  $^4\text{He}$  原子核 ( $\alpha$  粒子) が融合して  $^{12}\text{C}$  を形成する反応である。ただしこの反応は通常、2 粒子系 ( $\alpha$ - $\alpha$  系および  $^8\text{Be}$ - $\alpha$  系) の共鳴状態 (準束縛状態) を経由して起きると考えられている。これ

は、連続して起きる2つの2粒子融合反応という描像に他ならない。一方温度が低い場合、この反応は共鳴を経由しない反応、すなわち3粒子融合反応へと移行すると考えられるが、そのような反応を正確に記述する方法は存在せず、従ってこの3粒子融合反応の確率がどの程度なのかは、全く未知の問題であった。

このような状況の中、研究代表者は2009年に発表した論文において、3粒子融合反応を初めて定式化し、これに基づき、 $^{12}\text{C}$ の生成反応率を算定した。その結果、これまで近似的に算定されていた生成反応率が、107Kにおいて26桁、10<sup>8</sup>Kにおいて6桁という、劇的な反応率の増大を見出した。これは、従来の $^{12}\text{C}$ の形成シナリオを根本から覆す結果であるだけでなく、3粒子融合反応という、原理的には元素合成のシナリオ全体に影響する、普遍的で新しい反応描像の重要性を強く示唆する結果であった。

## 2. 研究の目的

これまで記述されていなかった、3粒子融合反応という新しい反応描像を基軸として、宇宙元素合成過程の新しい理解を確立することを主な目的とする。具体的には、 $^{12}\text{C}$ 生成反応の定量的な理解を進めると共に、 $^{12}\text{C}$ 同様、3粒子系としての構造を持つ $^9\text{Be}(=\alpha + \alpha + n)$ 、 $^6\text{Li}(=\alpha + p + n)$ 、 $^8\text{He}(=\alpha + n + n)$ といった軽い重要原子核の3粒子融合反応による生成率を定量的に決定する。さらに、3粒子融合反応確率の簡便な算定方法を考案し、より広範な原子核の生成における3粒子融合反応の役割を明らかにすることを研究期間内の目標とする。

## 3. 研究の方法

3粒子融合反応は、九州大学原子核理論グループが開発・推進にあたった、離散化チャンネル結合法(CDCC法)に基づいて定式化される。CDCC法は、反応が起きる模型空間を適切に(見たい物理量に影響しないという条件で)制限し、その制限された空間内で正確に反応過程を記述するという模型である。CDCC法は、正確さと簡便さを兼ね備えた模型として、原子核反応研究の最先端で活躍を続けている。

3粒子融合反応を記述する際には、原理的には極めて複雑な境界条件を考慮する必要があるが、CDCC法の基本的な考え方を適用することにより、境界条件の問題を簡略化し、平明な描像で、3粒子融合反応を記述することができる。ただし、研究代表者による先駆的CDCC計算では、以下の点が十分に考慮されていない。

- (1) 3粒子系の仮想的な束縛状態、いわゆる「閉じたチャンネル」の取り扱い。
- (2) 系の軌道角運動量に対する計算結果の

収束性。

- (3)  $\alpha$ 粒子系の対称性に起因する、組み替えチャンネルの寄与の定量的評価。

これらは、反応率の桁数を議論する段階では問題にならないが、より定量的に反応率を求める際には、いずれも検討が必要である。本研究では、まずこれらの問題点を改善し、3粒子融合反応計算の定量性を向上させる。上記(1)-(3)を考慮しつつ、3粒子系の波動関数を求めるためには、大規模な連立微積分方程式を解く必要がある。これは一般に非常に困難であるが、申請者は連立微積分方程式を非局所型の連立微分方程式に変換し、これを差分法によって解くというアプローチを適用する。この方法は、申請者自身が開発に携わった既存の計算コードの拡張という形で遂行することができる。

こうして3粒子融合反応計算の定量性を向上させた後、本研究の計算結果(および反応描像)と既存のそれとの対応、特に、どのような極限で既存の反応計算が正当化されるかを、より深いレベルで明らかにし、3粒子融合反応の理解を進める。

次に、上で構築したより信頼性の高い3粒子融合反応の計算手法を用いて、 $^9\text{Be}$ 、 $^6\text{Li}$ 、 $^8\text{He}$ の生成反応率を決定する。研究の過程で、これらの他に詳細な検討を要する原子核の示唆が得られた場合は、柔軟に対応し、計算対象の拡大を図る。また、これと並行して、3粒子融合反応確率の簡便な算定方法を考案する。例えば、反応の一部において核力が無視できる場合には、対応する波動関数は解析的に得ることができる。そのような近似的状況を想定し、模型を簡略化することは、3粒子融合反応の系統的分析を可能にするという点だけでなく、反応過程のさらに平明で直観的な理解にとっても重要である。ただし、想定する近似の精度は、常に定量的に評価しておく必要がある。

このようにして構築した簡便な反応率算定法を利用することにより、3粒子融合反応が、宇宙元素合成過程全体において、どのような状況(関与する原子核の性質や環境の温度など)でどの程度の寄与を持つかを明らかにする。特に、これまでの常識では合成経路が存在しないとされる原子核(3粒子的な構造を持ち、2粒子系として見ると不安定な原子核)を最優先で分析する。

このように、正確な計算手法と簡便な算定法を有機的に結合することにより、3粒子融合反応に対する広汎で深い理解を獲得する。

## 4. 研究成果

- (1) 3粒子融合反応の反応確率の定式化を整理し、平明な理解を与えた。これにより、3粒子融合反応と、その逆過程である、光を用いた3粒子分解反応との関係を正確に議論で

きる足場が完成した。その上で、3粒子系の反応を正確に解く手法として名高い、ファデーエフの方法を用いた計算結果との比較を行った。2010年7月の国際会議において、ファデーエフ計算が、研究代表者の研究成果と著しく異なる結果を与えることが報告された。研究代表者は、その計算の内容を分析することにより、本研究の本質である、「3粒子系の量子力学的相関に伴うクーロン相互作用の変化」が、このファデーエフでは事実上取り入れられていないことを明らかにした。

次に、本研究の反応計算の中身を詳細に分析する事により、①チャンネル結合計算を無視した場合、反応率が収束しないこと、② $\alpha$ 粒子間の軌道角運動量が2の成分は、反応率に影響を与えないことを明らかにした。

(2) 天体物理学の専門家とメールや国際研究会で議論を活発に行い、彼らが使用している既存の反応率が物理的根拠を持たないことを伝えた。本研究が提示した新しい反応率は、中性子星のX線バーストやセファイド型変光星の分析に応用され、前者では観測との矛盾が、後者では観測と理論との矛盾の部分的解決が、それぞれ示された。

(3)  $\alpha$ 粒子( ${}^4\text{He}$ 原子核)の座標が組み替わるチャンネルを取り入れたチャンネル結合計算の定式化を完了させた。ただしこの計算に必要なメモリと計算精度が、現在の計算機環境では容易には達成できない事が判明したため、数値計算は断念した。

(4) 2012年度、筑波大学のグループによる計算が発表され、研究代表者らによる $3\alpha$ 融合反応計算の模型空間( $\alpha$ - $\alpha$ 間のエネルギーの上限値)が十分ではないという可能性が強く示唆された。このため、3粒子融合反応の系統的な分析を断念し、 $\alpha$ - $\alpha$ 間の超高励起状態(反応のエネルギースケールの約10,000倍のエネルギーを持つ仮想的状態: 閉じたチャンネル)を計算に取り入れる方法の検討を進めた。従来定式化では、そのような閉じたチャンネルの自由度は、 $\alpha$ - $\alpha$ ペアと第3の $\alpha$ 粒子が束縛的な漸近状態(減衰解)を持つように境界条件を設定することで表現される。しかしこの方法では、①漸近条件を設定できる数1,000フェムトメートルまで波動関数を解く必要があること、②接続する境界条件が通常の散乱解とは異なるため、数値計算が著しく不安定になること、といった問題が生じるため、最終的には計算の実行は不可能であることが判明した。そこで代替案として、閉じたチャンネルの寄与を、コンパクトな基底関数の重ね合わせで表現する方法の検討に着手した。この方法では上述の問題は発生せず、反応計算は実行可

能である事がわかった。

(5) 大阪大学核物理研究センターの実験グループとの議論により、本研究が主張する、3粒子融合過程の寄与を実証する取り組みを開始した。アイディアの根幹は、 ${}^{12}\text{C}$ 原子核の非弾性散乱を測定し、ホイール状態に対応するピークの裾を精密に測定することにより、3つの $\alpha$ 粒子からなる系の、低エネルギーにおける連続状態の性質を探るというものである。これは、3粒子融合過程を実証する、事実上唯一の方法であると考えられるため、本研究にとって極めて重要であると判断し、その測定計画に沿った物理量(非弾性散乱断面積)の計算を優先して実行した。この実験は、2013年3月に南アフリカのiThemba研究所において遂行された。近い将来得られる実験結果と理論計算の比較により、3粒子融合反応の実態が明らかになると期待される。

(6) 本研究を推進する過程で、用いる反応模型(CDCC)の様々な改良がなされた。この恩恵により、多くの核反応研究の成果が生まれた点も、本研究の重要な成果であると考えられる。

## 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 24 件)

① A. Tamii, K. Ogata et al., non-resonant Triple- $\alpha$  Reaction Rate at Low Temperature, Few-Body Syst. (2013) (DOI: 10.1007/s00601-013-0697-y). [published online]

② K. Ogata, Recent development of CDCC and future, Progress of Theoretical Physics Supplement 196, 203 - 210 (2012).

③ M. Yahiro, K. Ogata, T. Matsumoto, and K. Minomo, The continuum discretized coupled-channels method and its applications, Progress of Theoretical and Experimental Physics 2012, 01A209-1 - 01A209-44 (2012).

④ Kosho Minomo, Takenori Sumi, Masaaki Kimura, Kazuyuki Ogata, Yoshifumi R. Shimizu, and Masanobu Yahiro, Determination of the structure of  ${}^3\text{He}$  by a fully microscopic framework, Physical Review Letters 108, 052503-1 - 052503-4 (2012).

⑤ Kazuyuki Ogata, Shintaro Hashimoto, and Satoshi Chiba, Three-Body Model Calculation of Spin Distribution in Two-Nucleon Transfer Reaction, Journal of Nuclear Science and Technology 48, 1337 - 1342 (2011).

⑥ Masanobu Yahiro, Kazuyuki Ogata, and Kosho Minomo, Eikonal Reaction Theory for Neutron-Removal Reaction, Progress of Theoretical Physics 126, 167 - 176 (2011).

⑦ K. Ogata, T. Matsumoto, S. Hashimoto, K. Minomo, T. Egami, Y. Iseri, K. Minomo, S. Chiba, C. A. Bertulani, Y. R. Shimizu, M. Kamimura, and M. Yahiro, Status of breakup reaction theory, Journal of Physics: Conference Series 312, 082008-1 - 082008-10 (2011).

⑧ Kosho Minomo, Kazuyuki Ogata, Michio Kohno, Yoshifumi R. Shimizu, and Masanobu Yahiro, Briefly-Rook localization of the microscopic nucleon-nucleus potential, Journal of Physics G, Vol. 37, 085011-1 - 085011-15 (2010).

⑨ Kazuyuki Ogata, Carlos A. Bertulani, Dynamical Relativistic Effects in Breakup Processes of Halo Nuclei, Progress of Theoretical Physics, Vol. 123, No. 4, 701 - 718 (2010).

[学会発表] (計 25 件)

① K. Ogata, Status of breakup reaction theory, ESNT workshop on Nuclear pair correlations proved via proton-induced transfer and knock-out reactions, SPhN, CEA/Saclay, France, February 6-8, 2013.

② K. Ogata, Breakup of  $^{22}\text{C}$  studied by CDCC with Cluster-Orbital Shell-Model wave functions, 13th INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUCLEAR REACTION MECHANISMS, Villa Monastero, Varenna, Italy, June 11-15, 2012.

③ Kazuyuki Ogata, Quantum scattering of three particles in stars: new understanding of the formation of  $^{12}\text{C}$ , International symposium on frontiers in nuclear physics, 1-3 November, 2011, Ruxin conference center, Beihang University, China.

④ Kazuyuki Ogata, Recent development of CDCC and future, Frontier Issues in

Physics of Exotic Nuclei (YKIS2011), 11th-15th October, 2011, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan. [Invited talk]

⑤ K. Ogata, Quantum scattering of three particles in stars: new understanding of the formation of  $^{12}\text{C}$ , GCOE Summer School on Hadrons and Nuclei under Extreme Conditions, Tokyo Institute of Technology, 2010.09. [Invited Lecture]

⑥ K. Ogata, Status of breakup reaction theory, The International Nuclear Physics Conference (INPC2010), University of British Columbia, 2010.07. [Invited talk]

[その他]

ホームページ等

<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/Divisions/np2/index.php?%B8%B6%BB%D2%B3%CB%CA%AA%CD%FD%B3%D8>

原子核物理の研究内容を記載(本研究の簡単な紹介を含む)。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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