

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540262

研究課題名(和文) 第一原理核反応計算を用いたビッグバン元素合成の天文学的S因子の定量的分析

研究課題名(英文) Analysis of the astrophysical S-factor of the Big Bang nucleosynthesis using the ab-initio nuclear reaction theory

研究代表者

青山 茂義 (Aoyama, Shigeyoshi)

新潟大学・学術情報基盤機構・准教授

研究者番号：60311528

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、「第一原理核反応計算を用いたビッグバン元素合成の天文学的S因子の定量的分析」の表題のもとに、現実的核力を用いた第一原理核反応論を用いて、原子核階層でのビッグバン宇宙論、及び、星内での 4He 元素合成という基礎的な核反応率について、スーパーコンピュータを用いた大規模数値計算を行った。特に、 $d(d, \gamma)4\text{He}$ 、 $d(d, n)3\text{He}$ 、 $d(d, p)t$ の詳細な分析を行った、また、本研究では、先行研究で提案していたガウス相関基底とトリプルグローバル合わせた新たな手法を一貫して用い、方法論の上でも、その有用性を示した。

研究成果の概要(英文)：Main subject of this study is analysis of the astrophysical S-factor of the Big Bang nucleosynthesis using the ab-initio nuclear reaction theory. The large-scale numerical computation using the super computer was carried out to analyze nuclear reaction rate needed in the big bang theory and the 4He nucleosynthesis in the star. Particularly, $d(d, \gamma)4\text{He}$, $d(d, n)3\text{He}$ and $d(d, p)t$ reaction was studied in detail. The new technique is proposed and showed the usefulness on one of methodology, in which correlated Gaussian basis is combined with the triple global vector.

研究分野：原子核理論

キーワード：少数多体系 元素生成 核反応 核力第一原理計算

1. 研究開始当初の背景

近年、原子核構造研究の分野では、現実的核力を用い、第一原理に基づいた核構造計算が可能になり、軽い原子核構造の理解が、急激に進展している。しかしながら、その研究は、主に基底状態などの束縛状態の構造研究に限られ、非束縛の連続状態の研究は、大きくは、進展していなかった。一方で、原子核の性質の多くは、散乱実験や核融合実験などの核反応から、理解される。そのため、最近では、核構造の第一原理計算のグループの興味や研究対象は、第一原理核反応計算を行い、核構造から核反応までの統一的理解にむかいつつある。

我々が提案しているトリプルグローバルベクトル法と微視的 R 行列理論を組み合わせる手法は、このような統一的理解に適用可能な方法の一つであり、先行研究として、Physical Review Letter 誌で発表[1]していた $d(d, \text{ } ^4\text{He})$ 反応の詳細分析を行うことが、本課題の主要テーマであった。

2. 研究の目的

本研究では、「第一原理核反応計算を用いたビッグバン元素合成の天文学的 S 因子の定量的分析」の表題のもとに、現実的核力を用いた第一原理核反応論を用いて、原子核階層でのビッグバン宇宙論、及び、星内での ^4He 元素合成という基礎的な核反応率についてスーパーコンピュータを用いた大規模数値計算を行っている。

3. 研究の方法

(1) トリプルグローバルベクトル法 + 微視的 R 行列論

現実的核力と三体力によって決まるハミルトニアンを、新たに提案したガウス相関基底法とトリプルグローバルベクトル表現[2]を用いて、第一原理的に相互作用領域で波動関数を求める。相互作用領域の外側は、二体の厳密解であるクーロン波動関数を用いる。この相互作用領域と漸近領域の解は、微視的 R 行列理論により、チャンネル半径で接続する。

(2) トリプルグローバルベクトル法 + 複素座標スケールリング

微視的 R 行列理論の方法は、遠方での形がわかっている二体系のクーロン波に接続するので、三体系以上については近似計算となる。通常、この近似は大きな問題にならないと期待できるが、実際に三体や四体の共鳴状態が影響する場合もあり得る。この問題を相補的に分析するために、複素座標スケールリング法を適用する。この方法は、三体系以上の束縛から連続状態、共鳴状態を統一的に取り扱う最も代表的な手法の一つとして発展してきている(レビュー論文[3])。この手法を核力第一原理計算に初めて適用する。

4. 研究成果

(1) 電磁遷移の詳細分析

先行レター論文(PRL)で、低エネルギーの $d(d, \text{ } ^4\text{He})$ 反応では、テンソル力の効果により、反応率が上がり、天文学的 S 因子が増大することを示した。しかしながら、計算機の制限により、 d (重水素)の分解に対応するチャンネルなど、影響がそれほど大きくないと期待されるチャンネルを含んでいなかった。また、E2 遷移を主要とし、E1 遷移については、計算していなかった。これらについて、北海道大学のスーパーコンピュータ SR16000 を用いた大規模数値計算を行って、詳細な分析を行った。

その主な結果は、模型空間を広げると、高エネルギー側で若干の変化はあるものの天文学的 S 因子に影響する低エネルギー領域では、先行論文の結果を変えないということが明らかになった。また、E1 遷移についても、その効果が数パーセント程度であることが明らかになった(図1)。これにより、先行研究で第一原理的手法ではあるが、計算能力の制限によって存在した不定性を取り除いた収束した結果を得た。また、提案するトリプルグローバルベクトル法を初めて、電磁遷移の計算に適用した。

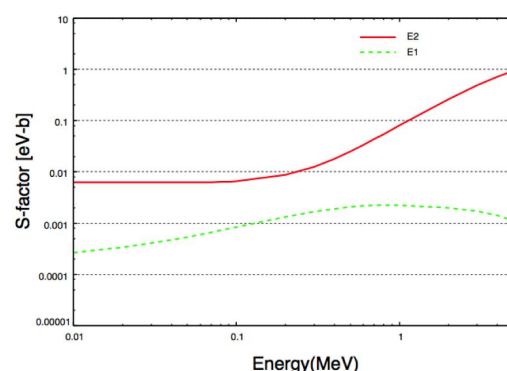


図1 E1 と E2 遷移による S 因子の比較

(2) 複素座標スケーリング法を適用した ${}^4\text{He}$ 核の励起状態の分析

${}^4\text{He}$ 核に複素座標スケーリング法を適用し、励起状態の分析を行い、第22回ヨーロッパ少数体系物理学で発表を行った。図2の複素固有値のように、四核子系に現れる四体しき居 $p+p+n+n$ 、三体しきい値 $d+p+n$ 、二体しきい値 $d+d$ 、 $t+p$ 、 $h+n$ をきれいに分離することに成功した。 ${}^4\text{He}$ の基底状態も同時に再現しているので、四核子系の束縛状態から連続状態まで、一つの手法で分析可能になった。

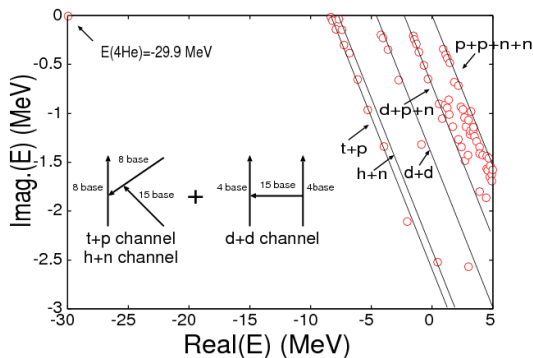


図2 ${}^4\text{He}$ 核の $0+$ 状態の複素固有値の分布

(3) S 行列の位相差解析による ${}^4\text{He}$ 核の励起状態の分析

微視的R行列理論から導いたS行列をもとに、 ${}^4\text{He}$ 核の位相差分析を詳細かつ精密に行った(図3)。これにより、実験では、はっきりとわかっていない励起共鳴状態が、核力第一原理から始めた大規模数値計算では予言できることが、わかった。今後、複素座標スケーリング法も、相補的に用いることにより、詳細な分析を行う予定である。これは、本課題の申請段階ではわかっていなかった新たな研究の発展という成果の一つである。

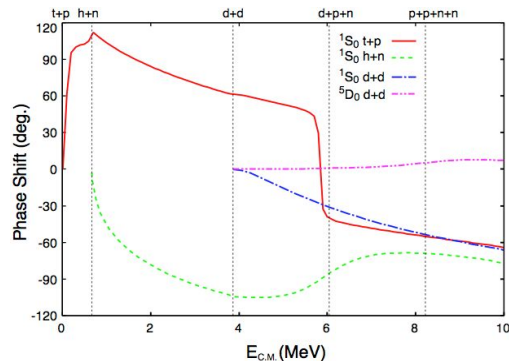


図3 ${}^4\text{He}$ 核の $1S_0$ の位相差

< 引用文献 >

[1] “Tensor Force Manifestations in *ab initio* study of $2H(d,\gamma)4He$, $2H(d,p)3H$, and $2H(d,n)3He$ reactions”, Koji Arai, Shigeyoshi Aoyama and Yasuyuki Suzuki, Phys. Rev. Lett. 107, 132502(2011).

[2] “Four-nucleon scattering with a correlated Gaussian basis method”, Shigeyoshi Aoyama, Koji Arai, Yasuyuki Suzuki, Piere Descouvemont and Daniel Baye, Few-Body Systems 52, pp.97-123 (2012).

[3] “The Complex Scaling Method for Many-Body Resonances and Its Applications to Three-Body Resonances”, Shigeyoshi Aoyama, Takayuki Myo, Kiyoshi Kato and Kiyomi Ikeda, Progress of Theoretical Physics 116, pp.1-36(2006).

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 1件)

“Few-body models for nuclear astrophysics”, Piere Descouvemont, Daniel Baye, Yasuyuki Suzuki, Shigeyoshi Aoyama and Koji Arai, AIP Advances Vol.4, 041011(pp.1-14), 2014, 査読有

[学会発表] (計 3件)

“Ab initio study of nuclear four-body reactions”, Shigeyoshi Aoyama, Advances and perspectives in computational physics, Hawaii, Oct.5-7, 2014.

“Analyses of excited states in ${}^4\text{He}$ with complex scaling method”, Shigeyoshi Aoyama, The 22nd European Few-body physics, Krakow, Sep.9-13, 2014.

「第一原理核反応計算による $d(d, \gamma){}^4\text{He}$ 反応の分析」、青山茂義、新井好司、鈴木宜之、日本物理学会、高知大学、2014年9月20日～23日。

[図書] (計0件)

[産業財産権]

出願状況 (計 0件)

取得状況 (計 0件)

[その他]

特になし

6 . 研究組織

(1)研究代表者

青山 茂義 (AOYAMA Shigeyoshi)
新潟大学・学術情報基盤機構・准教授
研究者番号：6 0 3 1 1 5 2 8

(2)研究分担者

新井 好司 (ARAI Kouji)
長岡工業高等専門学校・一般教育科・准教授
研究者番号：2 0 3 7 4 7 3 8

(3)連携研究者

鈴木 宜之 (SUZUKI Yasuyuki)
新潟大学・自然科学系・自然科学系フェロー
研究者番号：7 0 0 1 8 6 7 0