

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 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：24540261

研究課題名(和文)放射性捕獲3反応による ^{12}C 生成のダイナミクスの理論的研究研究課題名(英文)Theoretical study on dynamics of ^{12}C synthesis through radiative capture reactions of three alpha-particles

研究代表者

鈴木 宜之 (SUZUKI, YASUYUKI)

新潟大学・自然科学系・フェロー

研究者番号：70018670

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：3個の粒子から炭素 ^{12}C を生成する反応は、2個の粒子が ^8Be の共鳴をつくり、それがもう一つの粒子を捕獲してガンマ線を放出する過程からなると考えられている。実験的に反応率を測定することは困難なので理論的に計算する必要がある。本研究では超球座標を用いて、電荷をもった3粒子の連続状態を高精度で記述することを行い、炭素生成反応の鍵を握るホイール共鳴のエネルギーと幅を再現することに初めて成功した。この結果は課題として掲げた放射性捕獲反応率を計算することが可能であることを保証するものであり、現在具体的な結果を得るべく計算を進めている。

研究成果の概要(英文)：The process for synthesizing ^{12}C through radiative capture reactions of three alpha-particles proceeds dominantly via two steps, a formation of ^8Be resonance and a subsequent capture of an alpha-particle by emitting gamma rays. An experimental determination of the reaction rate is hopeless, so that a theoretically reliable calculation is needed. Using the hyperspherical coordinate we have developed a description of continuum states of three charged particles and have for the first time succeeded in obtaining the energy and width of the Hoyle resonance that plays a key role for the triple-alpha reactions. This result warrants the possibility of calculating the reaction rate accurately. A calculation for reaching our goal is in progress.

研究分野：原子核理論

キーワード：Triple-alpha reactions Hoyle resonance Hyperspherical method Adiabatic potential 複素吸収ポテンシャル

1. 研究開始当初の背景

太陽質量の半分以上の質量を持つ星はある段階で十分温度が上がり、3個の粒子が放射性捕獲反応を起こして ^{12}C の 2^+ 状態に遷移し、更にその基底状態に遷移して炭素元素を生成する。このtriple-alpha反応は宇宙における炭素の存在比の決定や超新星爆発を起こす直前の鉄の芯の大きさを決める上で重要な役割を果たす。実験でこの反応率を決めることは当面期待できないので、理論的に求めるしかない。幾つかの既知のデータから概算したNACREのcompilation[C. Angulo et al., Nucl. Phys. A656, 3 (1999)]が標準とされてきたが、3 閾値近傍の低エネルギーではNACRE値を20桁も上回るという理論計算 [K. Ogata et al., Prog. Theor. Phys. 122, 1055(2009)]が2009年に発表されて大きな話題になった。それが正しいとするとその影響は甚大なので、真偽をめぐって直ちに幾つかの計算が試みられた。この過程の鍵は、電荷を持った3粒子が非常に幅の狭い共鳴を含む連続状態から有限の大きさを持った原子核に遷移する過程を正しく記述できるか否かということにある。電荷を持った3体系の連続状態を記述することは相互作用レンジが無限遠方に及ぶために難問とみなされてきたものであるので、独立の方法での検証が求められていた。

2. 研究の目的

3個の粒子が ^{12}C の閾値近傍の低エネルギーの連続状態から、電気四重極放射によって ^{12}C の 2^+ 束縛状態へ遷移する過程を理論的に記述し、その反応率を求めることが主要な目的である。

この過程で鍵を握るのは3 閾値近傍にあるホイル共鳴であり、その性質(共鳴エネルギーと幅)を再現できるか否かが重要であるので、それが再現できるかどうか、またその構造はどうなっているかということに特別な注意を払う。

3. 研究の方法

Triple-alpha 反応率を計算する直接の方法は、3個の粒子が決められたエネルギーを持って連続状態にある波動関数を得て、 2^+ の束縛状態との電気四重極遷移の行列要素を計算することである。3粒子系のダイナミクスを記述するために、超球座標を用いた定式化を採用する。超半径の関数として断熱ポテンシャルを求め、動径部分の波動関数を解くことによって連続状態を処理する。電荷をもった3体系なので、超半径が非常に大きなところまで計算する必要があるが、そこで複素吸収ポテンシャルを導入して、基本的には連続状態の問題を束縛状態の問題に帰着させることが出来ると期待する。この方法の妥当性はホイル共鳴が再現できるか否かで判定できる。

もう一つの方法は triple-alpha 反応の逆

過程を複素回転法で求めようとするものである。この手法で我々は現実的核力を用いて ^4He の電気双極子遷移、スピン-双極子遷移などの強度関数を計算してきた経験があり、特に電気双極子遷移についてはその実験データを再現し、またスピン-双極子遷移から ^4He の準位のエネルギーや幅を再現できることを確認している。これを triple-alpha 反応率の計算に適用できないか検討する。

4. 研究成果

上記の二つの方法は基本的には同じであり、連続状態を離散化することにその本質がある。これまで我々は2番目の複素回転法で適当な基底関数で状態を表現する方法を用いてきたが、例えばホイル状態のように幅が共鳴エネルギーの4桁以下になるような精度を得ることは困難であると認識した。3体系の可能な配位を高精度で表現できるような基底を用いることが必須であると判明した。このために本研究では最初の方法を採用することとし、超半径Rを幾つかの区間にわけ、各区間で3体系の様々な超角度に依存する配位をスプライン基底関数で表現することにした。粒子は点粒子として扱い、 ^4He ポテンシャル及び ^3He ポテンシャルは他の文献で用いられているものを参考にした。粒子のボソン対称性は正しく考慮した。詳細は文献[H.Suno, Y. Suzuki, P. Descouvemont, Phys. Rev. C91, 014004 (2015)]を参照のこと。図1は $J^\pi=0^+, 2^+$ の場合に、3系の断熱ポテンシャル曲線をエネルギーの低いものから10本について示したものである。これら

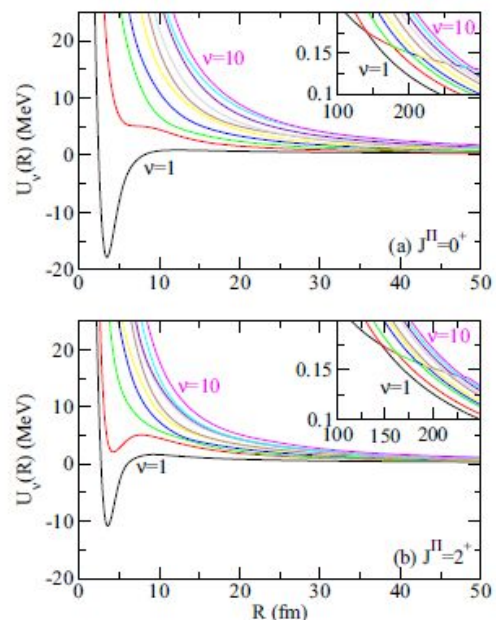


図1 エネルギーの低い順10本の3断熱ポテンシャル曲線の超半径R依存性。挿入図はRの大きいところで起こる擬交差を示す。

のポテンシャル曲線はRの大きいところで3 閾値（エネルギーの基準値ゼロに選んだ）に近づく。また挿入図はRの大きいところで、avoided crossing（擬交差）が起きていることを示している。黒のポテンシャル曲線は主に ${}^8\text{Be}+$ チャンネルによってもたらされるものであり、Rの増大とともに3 の連続状態のエネルギーが下がってきてポテンシャル曲線の擬交差が起きていることを示している。擬交差が起ころとところで、断熱ポテンシャルへのハミルトニアン寄与が特徴的な変化をする。図2は 0^+ の場合に、最も低い二つの断熱ポテンシャルの内訳をRの関数として示したものである。 ${}^8\text{Be}+$ チャンネルによって支配されているポテンシャル曲線では、核力、クーロン力、遠心力の寄与がそれぞれ大きいことが特徴であるが、二つの で共鳴を作らない3 連続状態では各項の寄与は大きくなっていないことが明確にわかる。連続状態は無数個あるので、2体の ${}^8\text{Be}+$ チャンネルと引き続いて交差する。

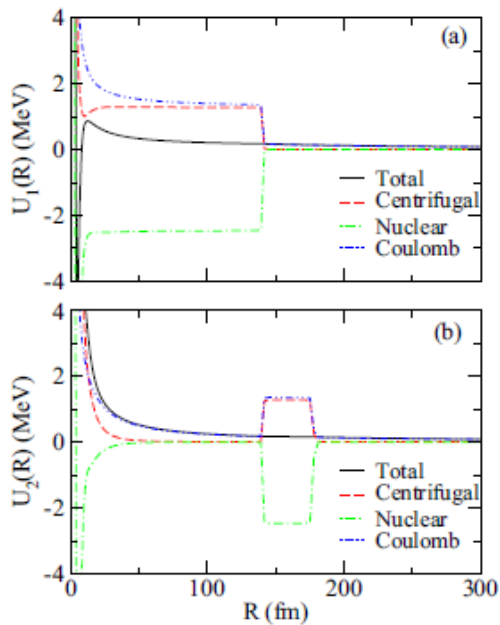


図2 $J=0^+$ の3 系の最も低い二つの断熱ポテンシャルへのハミルトニアン寄与のR依存性。

図1で示した断熱ポテンシャルを用いて、3 系の束縛状態及び共鳴に対する運動方程式をslow variable discretizationの方法で解いた。チャンネル数を増やして、得られた解の収束性を調べた。共鳴や連続状態の波動関数をRの大きなところで減衰させるように、transmission-freeの複素吸収ポテンシャルを導入した。その結果、 $J=0^+$ のホイール共鳴を信頼できる精度で得ることが可能になり、共鳴エネルギーと共鳴幅の計算値は、下記のように実験値と非常に良い一致を示した。

ホイール共鳴パラメータの比較

	共鳴エネルギー (MeV)	共鳴幅 (eV)
理論値	0.36689	9.4
実験値	0.38	8.5 ± 1.0

我々の計算では共鳴のエネルギーと幅は複素エネルギーの実数部分、虚数部分として求められるので、ホイール共鳴の幅が共鳴エネルギーの4桁以下であることを考えれば、ここで採用した超球座標による理論計算は基底関数を十分広く採用しており信頼性が極めて高いことを示している。すなわち、電荷を持った3粒子系の閾値近傍の共鳴及び連続状態を高精度で記述することに成功したことを意味している。ホイール共鳴のパラメータをこのように高精度で計算したのは初めてのことと思う。

目的としたtriple-alpha反応率の計算は研究期間中に間に合わなかったが、閾値近傍の連続状態を記述するという基本的課題はできたので早い時期に反応率の計算結果に到達できると思っており、現在その計算を継続している。

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16件)

Y. Suzuki: Adiabatic hyperspherical approach to large-scale nuclear dynamics, Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 043D05 (20 pages) 査読有

H.Suno, Y. Suzuki, P. Descouvemont: Triple-alpha continuum structure and Hoyle resonance of ${}^{12}\text{C}$ using the hyperspherical slow variable discretization, Phys. Rev. C91, 014004-1:9 (2015) 査読有

D. Mikami, W. Horiuchi, Y. Suzuki: Electric dipole response of ${}^6\text{He}$: Halo-neutron and core excitations, Phys. Rev. C89, 064303-1:13 (2014) 査読有

P. Descouvemont, D. Baye, Y. Suzuki, S. Aoyama, K. Arai: Few-body models for nuclear astrophysics, AIP Advances 4, 041011-1:14 (2014) 査読有

W. Horiuchi, Y. Suzuki: Spin-dipole strength functions of ${}^4\text{He}$ with realistic nuclear forces, Phys. Rev. C 87, 034001-1:16 (2013) 査読有

〔学会発表〕(計15件)

数納広哉、鈴木宜之、P. Descouvemont: 超球SVD法によるトリプルアルファの構造

とホイル共鳴状態の研究、日本物理学会
第70回年次大会、2015年3月21-24日、
早稲田大学早稲田キャンパス

Y. Suzuki: Adiabatic hyperspherical
approach to nuclear dynamics, International
Molecule-type Workshop on Structure and
reaction of exotic nuclei, 2015年1月6-23
日、京都大学基礎物理学研究所

Y. Suzuki: Triple-alpha reactions at low
energy, INT workshop on Universality in
Few-Body Systems: Theoretical Challenges
and New Directions, 2014年3月10-5月16
日、University of Washington, Seattle, USA

鈴木宜之: 炭素生成 3α 反応におけるポ
テンシャル障壁、日本物理学会2013年秋
季大会、9月20-23日、高知大学朝倉キ
ャンパス

堀内渉、鈴木宜之: ヘリウム4のスピ
ン双極子励起とスペクトル、日本物理学会
2013年秋季大会、9月20-23日、高知大
学朝倉キャンパス

Y. Suzuki: Electroweak response of 4He and
its level structure, INT workshop on
Electroweak properties of light nuclei, 2012
年11月5-9日、University of Washington,
Seattle, USA

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 宜之 (SUZUKI YASUYUKI)
新潟大学・自然科学系・フェロー
研究者番号: 70018670

(2) 連携研究者

堀内 渉 (HORIUCHI WATARU)
北海道大学・理学(系)研究科(研究院)・
助教
研究者番号: 00612186

青山 茂義 (AOYAMA SHIGEYOSHI)
新潟大学・学術情報基盤機構情報基盤セン
ター・准教授
研究者番号: 60311528

新井 好司 (ARAI KOUJI)
長岡工業高等専門学校・准教授
研究者番号: 20374738