

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800145

研究課題名(和文) 極低エネルギー入射核融合反応で観測された融合阻害現象の微視的機構解明

研究課題名(英文) Microscopic mechanism of fusion hindrance observed at extremely low incident energies in heavy-ion fusion reactions

研究代表者

市川 隆敏 (ICHIKAWA, Takatoshi)

京都大学・基礎物理学研究所・研究員

研究者番号：00370354

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,300,000円

研究成果の概要(和文)：極低エネルギー入射核融合反応において、核融合断面積が標準的なチャネル結合計算の値から大きく減少する融合阻害現象の微視的機構を明らかにした。先行研究において、この融合阻害現象は、量子トンネル途中で、融合する二つの核が接近した時に、各々の量子振動励起がお互いの相互作用により減衰して、断熱状態へと緩やかに遷移するために起こる事を現象論的に示した。そこで本研究は乱雑位相近似法を二体系へと拡張して、二つの核がお互いに近づいた時の量子振動励起を微視的に計算して、その減衰機構の微視的起源を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We investigate the microscopic mechanism for the steep falloffs of the fusion cross sections, compared to the standard coupled-channel calculations, observed at extremely low incident energies. In our previous study, we indicated that the steep falloffs of the fusion cross sections, called the fusion hindrance, is response for the smooth transition from the sudden to the adiabatic processes. To achieve it, we phenomenologically introduced the damping factor in the standard coupled-channel calculations. Thus, to investigate the microscopic origin of this damping factor, we extend the random-phase approximation method to the two-body systems and calculate quantum vibrations of the individual colliding nuclei, when two nuclei approach each other.

研究分野：原子核理論物理学

キーワード：核融合反応 量子トンネル チャネル結合法 RPA法 平均場理論

1. 研究開始当初の背景

中重核領域の深部サブバリア融合反応において、ある閾値以下の超低入射エネルギーでの融合断面積が、標準的なチャネル結合法の見積もりよりも急激に落ち込む現象が観測されている。この実験値の急激な落ち込みは、量子トンネルが阻害されている事を示唆しており、しばしば融合阻害と呼ばれている。これらの融合阻害の機構を明らかにする試みは、理論と実験共に *Physica Review Letters* 誌に多数の論文が掲載されており、重イオン核反応分野では最先端の話題である。

この融合阻害を理解する鍵は、量子トンネル透過中での衝突する二つの核の核子密度の重なりである。入射エネルギーが二つの核の接触点でのポテンシャルエネルギー V_{touch} よりも低い時、複合核状態へ到達する為に二つの核密度が重なりあう領域を必ず量子トンネルしなければならない。一方、融合障壁近傍での入射 (V_{touch} よりも十分高いエネルギー) ではトンネル途中で二つの核の重なりは起こらない。我々は実験との系統性を調べ、二つの核の重なりが融合阻害の原因である事を初めて示した [T. Ichikawa et al., *Phys. Rev. C* 75, 064612(2007); *Phys. Rev. C* 75, 057603 (2007)]。

我々は先行研究において、融合断面積の実験値の急激な落ち込みを再現する為に、従来から用いられている標準的なチャネル結合法を拡張して、二つの核の密度が重なり合う領域での量子トンネルを断熱近似に基づいて取り扱うモデルを提案した。このモデルでは、二つの核が重なり合う領域において、標的核と入射核間はネック形成してエネルギー的に最も低い密度配位を取ると仮定する。そこで二つの核が接触して複合核に至るまでの形状変化を考慮して、ポテンシャルエネルギーを二つの核 (二体系) から複合核 (一体系) まで滑らかに接続した。しかしこの断熱的ポテンシャルエネルギーを直接、標準的なチャネル結合法へ適用出来ない。チャネル結合法で仮定されているのは、二つの核が量子振動励起してチャネル結合している非断熱的な過程である。エネルギー的に最低となる密度配位を仮定した断熱近似とは大きく異なる仮定に基づいている。

これを解決する為に我々は、標準的なチャネル結合方程式中の振動励起の結合ポテンシャルが二つの核が重なった領域では減衰するモデルを提案した。つまり二つの核が重なった領域では量子振動を減衰させてチャネル間の結合を消失させ、非断熱過程と断熱過程を滑らかに接続するための減衰因子を結合ポテンシャル中に現象論的に導入した。この減衰因子を導入してチャネル結合法の計算を行うと、極低エネルギー領域から通常のエネルギ領域まで融合断面積を非常に良く再現した。またその他の重要な物理量すべてコンシステントに再現する唯一のモデルで

ある [*Phys. Rev. Lett.* 103, 202702(2009)]。

量子振動を減衰する減衰因子を現象論的に導入する事で、断面積の急激な落ち込みを非常に上手く記述する事が出来たが、この減衰因子の微視的理論からの基礎付けは未だよくわかっていない。この様な観点から、二つの核 (二体系) での量子振動を微視的理論である乱雑位相近似法を拡張して直接計算し、二つの核がお互いに近づいた時の各々の振動の減衰を量子力学的に確認すると言う着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、中重核の極低エネルギー入射核融合反応において、核融合断面積が標準的なチャネル結合計算で見積もった値から大きく減少する、融合阻害現象の微視的機構を明らかにする。我々は先行研究において、この融合阻害現象は融合する二つの核が接近した時に、量子トンネル途中で二つの核の量子振動励起がお互いの相互作用により減衰して、断熱状態へと緩やかに遷移するために起こる事を現象論的に示した。そこで本研究はこの融合阻害現象の微視的機構解明を目指し以下の二点を行う。

(1) 融合する二つの核の量子振動を乱雑位相近似法を二体系へ拡張して計算する枠組みの開発を行う。

(2) 二つの核がお互いに近づいた時の量子振動励起の減衰機構を明らかにして、先行研究で提案した現象論的モデルでの減衰因子の微視的裏付けを行う。

3. 研究の方法

上記(1)と(2)の研究を行うために、下記項目について研究を実施する。

① 乱雑位相近似理論の二体系への拡張

従来から乱雑位相近似 (RPA) 法は、単一原子核の量子振動モードを計算するために用いられて来た。そこでお互い近づく二つの原子核 (二体系) での量子振動モードを計算するために、RPA 法を二体系まで拡張を行った。本研究では RPA 法の拡張に焦点を絞るため、全セルフコンシステントを満たす複雑な平均場計算は行わない。そのため二つの接近する原子核の平均場ポテンシャルを湯川型関数を用いた密度畳み込みポテンシャルで近似する。そして与えられたこの平均場ポテンシャルに対して、二つの核の孤立系での波動関数を重ね合わせた合成系の単一スレータ行列式波動関数を用意した。

つまり孤立系での二つの原子核の波動関数をそれぞれ Φ_R と Φ_L とすると、その合成系の波動関数 Φ は正負パリティ状態で縮退して、 $\Phi^+ = (\Phi_R + \Phi_L)/\sqrt{2}$ と $\Phi^- = (\Phi_R - \Phi_L)/\sqrt{2}$ と Φ となる。この合成系の波動関数 Φ を十分な数の単一調和振動子基底で展開して全系の波動関数 Φ を計算する。この展開された全系の波動関数 Φ は、一体系の原子核に対する単一スレータ行列式波動関数とまった

く同じ表式で記述されているので、従来のRPA法をこの全系の波動関数 Φ にそのまま適用する事が可能である。この波動関数に対して1粒子-1空孔状態を重ね合わせて、二体系での量子振動モードを直接計算した。

②計算コードの作成

上記①で示した様に、全系の波動関数 Φ を単一の調振動子基底で展開しなければならない。これは非常に多数の基底を計算に必要とする事を意味する。我々は今まで核分裂反応の研究で、原子核が二つに分裂するまで大きく変形した形状での波動関数を計算した経験を有する。そして長年に渡り変形調和振動子基底を用いた固有状態の計算コードを開発して来た。そこでこのコードを多数の基底を用いて展開できる様に改良を行った。またRPA計算を行う為に、デルタ型残留相互作用を用いた二体の行列要素の計算部分などをコードに実装する。そして一体系で大きく変形した形状から二体系まで幅広くRPA計算が行える汎用コードを開発した。

また二つの原子核が近づいた時、量子振動モードがどのように変化するかを調べる解析法を開発した。さらに電磁四重極遷移強度や遷移密度行列などを計算するコードを作成して、量子振動モードを多角的に解析する方法を開発した。

4. 研究成果

我々はまず、①で完成したコードを用いて、一番単純な $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ 系でお互いが十分離れた距離でRPA計算を行った。そして二つの核の重心運動や相対運動の振動励起ゼロモードが除去できているのかを確認した。その結果、相対運動のゼロモードが求まったRPA解に含まれていることが明らかとなった。そのため、相対運動のゼロモードを除去する方法を新たに開発した。そしてRPA計算を二つの核間

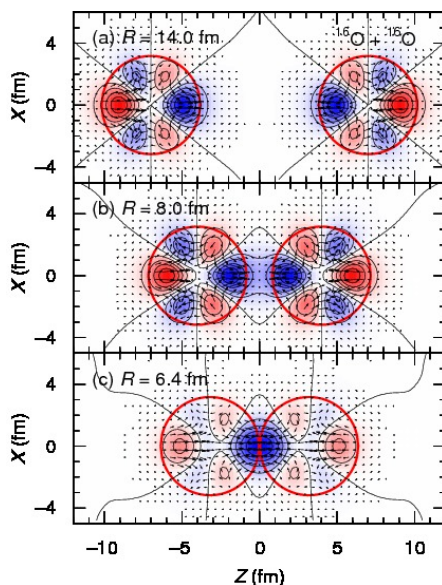


図1 各重心間距離 R での遷移密度と密度流

距離 R の関数として行い、二つの核がどのように励起して変化して行くのか調査した。

十分離れた遠方($R = 15$ fm)では、二つの ^{16}O 核は一体系の ^{16}O で計算した時の第一 3^- (八重極)励起状態の固有エネルギーと基底状態への電磁遷移強度 $B(E3)$ が一致することを確認した。

次に相対距離 R を徐々に小さくして、各 R においてRPA計算を行い、遷移密度を計算した。その結果を図1に示す。 $R = 8$ fm近傍からお互いの核の影響により、一粒子波動関数が変化して、3-励起の減衰が始まっている事がわかる。そして、二つの核が接触する $R = 6.4$ fmでは、接触の効果により3励起がかなり弱まっていることがはっきりとわかる。

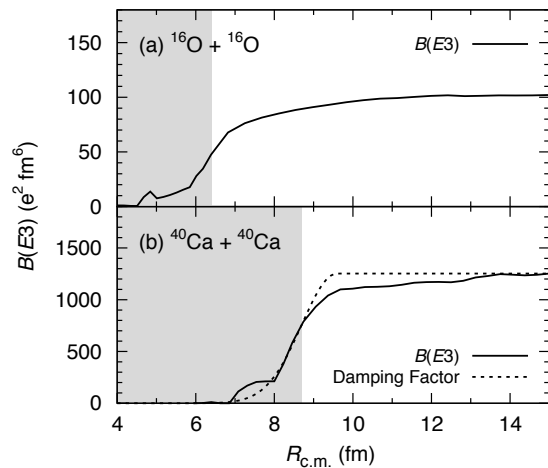


図2 各重心間距離 R での $B(E3)$

図2上は各 R での片側の ^{16}O 核の $B(E3, 3^-_1 \rightarrow 0^+)$ 値を示している。グレーの領域は二つの核が重なり合っている領域を示している。図からわかる様に、二つの核が接触する手前から、 $B(E3)$ の値が急激に減少することがわかる。

単一粒子軌道の解析の結果、この3-集団励起を構成する主要な成分は、十分遠方では ^{16}O の $p_{1/2} \rightarrow d_{5/2}$ 遷移であることがわかった。二つの核がお互いに近づくと、これらのエネルギー準位は異なる良い量子数 Ω (全角運動量の z 成分)とパリティ量子数ごとに反発して分裂する。その時に、+パリティをもった波動関数はネック部分に多くの波動関数の成分を持ち、粒子-空孔間の波動間で大きな重なりを維持する。一方-パリティの波動関数はネック分に波動関数を持っていないために、粒子-空孔間での重なりが小さくなり、全体の集団性が大きく減少することがわかった。このお互いの核が近づいた時の同じ量子数 Ω をもった単一粒子波動関数の準位反発による、集団運動を構成していた主要成分の性質の変化が、 $B(E3)$ の減少の直接的な原因であることを明らかにした。

次に、融合阻害現象を説明するために現象論的に導入した減衰因子と、計算された $B(E3)$ の相関を調べた。相関を調べるために、融合阻害現象がはっきりと観測されている

$^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 系でチャネル結合計算を行い、融合断面積をよく説明する減衰因子のパラメータの決定を行った。そしてRPA計算をこの系でも行い、各重心間距離RにおけるB(E3)の値を計算した。その結果が図2の下部中の実線で示されている。また、実験値をよく再現する減衰因子はR = 14 fmで計算値のB(E3)の値で規格化した値を図中点線で示している。

図より、これら二つの値は非常によく相関している事がわかる。 $^{40}\text{Ca}+^{40}\text{Ca}$ 系でも接触点手前から急激にB(E3)の値が減少している事がわかる。この減衰機構は $^{16}\text{O}+^{16}\text{O}$ 系と同じく、お互いに近づいた時に、集団運動を構成していた主要成分の単一粒子波動関数が、準位反発により性質が大きく変化して、集団性が減少している事がわかった。これらの結果から、接触によるB(E3)の減少は普遍的な機構として存在する事が示された。

以上の結果から、減衰因子の微視的な機構は、集団運動を構成していた主要な単一粒子波動関数が互いの核の接近により大きな性質をする事が起源である事を始めて明らかにした。これらの微視的計算から、極低エネルギー核融合反応では、二つの核が互いに近づく事によって、量子力学的な振動が確かに減衰している事を示した。またその減衰が原因で、チャネル間の結合が阻害され、断面積の急激な落ち込みが起こる事を明らかにした。

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1件)

- ① T. Ichikawa and K. Matsuyanagi, "Damping of quantum vibrations revealed in deep sub-barrier fusion", Phys. Rev. C 88, 011602(R) (2013)、査読あり
DOI: 10.1103/PhysRevC.88.011602

[学会発表] (計5件)

- ① 市川 隆敏, "二体系でのRPA法を用いた深部サブバリア融合反応で起こる接近する二つの核の量子力学的振動の減衰"、日本物理学会、2013年9月23日、「高知大学(高知県・高知市)」
- ② T. Ichikawa, "Damping of quantum vibrations revealed in deep sub-barrier fusion", INT Program 13-3 Quantitative Large Amplitude Shape Dynamics: fission and heavy ion fusion, 「シアトル(米国)」、2013年10月25日
- ③ 市川 隆敏, "Damping of quantum vibrations revealed in deep sub-barrier fusion", 第4回日米物理学会合同核物理分科会、「ハワイ島(米国)」、2014年10月11日
- ④ T. Ichikawa, "Damping of quantum vibrations revealed in deep

sub-barrier fusion", Nuclear Fission and Exotic Nuclei, 「原子力機構(東海村・茨城県)」、2014年12月5日

- ⑤ T. Ichikawa, "Damping of Quantum Vibrations Revealed in Deep Sub-barrier Fusion", Structure and reaction of light Exotic Nuclei, 「京都大学(京都市・京都府)」、2015年1月15日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

市川 隆敏 (ICHIKAWA, Takatoshi)
京都大学・基礎物理学研究所・特定研究員
研究者番号: 370354

(2) 研究協力者

松柳 研一 (MATSUYANAGI, Kenichi)