

機関番号：82110

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21840058

研究課題名（和文）

対相関の変形依存性に着目した原子核の準位構造と核分裂メカニズムの解明

研究課題名（英文）

Nuclear Level Density and Fission Barrier focused on dependence of pairing correlation on nuclear deformation

研究代表者

湊 太志 (MINATO FUTOSHI)

日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学研究部門・博士研究員

研究者番号：00554065

研究成果の概要（和文）：

原子核反応シミュレーションで重要となる原子核の準位密度を、これまで正確に記述することのできなかつた対相関の効果を取り入れて計算するコードを開発した。その結果、従来型の手法に比べ、より精度のある中性子反応断面積の予測を可能にした。また、ラムダ粒子を不純物として原子核に導入し、核分裂を調べる新しい手法を確立した。その手法によって、原子核中の粒子の軌道を調べるのが可能になり、核分裂バリアが形成されていくメカニズムを解明した。

研究成果の概要（英文）：

Nuclear level density is one of the important ingredients for performing nuclear reaction simulation. We invented a new code calculating nuclear level density which correctly takes into account pairing interaction, which has been neglected or approximated in preceding studies. As a consequence, it became possible to predict neutron reaction cross section in more reliable accuracy through the nuclear reaction simulation. We also established new method that introduces Lambda particle into a nucleus as an impurity to investigate nuclear fission. Using this method, we clarified the mechanism of formation of fission barrier.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	430,000	129,000	559,000
2010 年度	190,000	57,000	247,000
年度			
年度			
年度			
総計	620,000	186,000	806,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：核分裂、準位密度、対相関、ハイパー核

1. 研究開始当初の背景

原子核の核分裂のメカニズムの解明は主に理論的な方法で研究が行われている。液滴

モデルやトーマス・フェルミモデルなど、様々な手法による考察のなか、量子効果である殻効果や2つの核子が対を組む対相関が核分裂において重要であることが共通認識

されている。それにもかかわらず、対相関と核分裂の関係を詳細に調べた研究報告はまだない。特に核分裂バリアがどのように形成されているのか、その微視的メカニズムは依然としてよく分かっていない。

また、対相関は原子核の準位密度にも関連している。準位密度は、単位エネルギー当たりのエネルギー準位数で定義され、原子核の崩壊や反応を記述する上で重要な情報の一つである。また、核分裂にも密接に関係している。準位密度は実験的に調べることが難しい物理量であるため、理論手法によって導出する必要がある。それらの手法の中で取り扱われている対相関の強さは、原子核の形状に依らず一定という条件がこれまで採用されてきた。しかし、我々が行ったテスト計算によると、対相関は変形度によって大きく変化し、それに伴って準位密度も変化することが分かった。

対相関と核分裂バリアの関係を明らかにすることは、信頼性のある原子核の反応・崩壊モデルを構築するために重要である。特に中性子反応シミュレーションは、放射線を用いた核物理基礎研究や材料・生命科学の分野に強く関連しており、その高精度化が求められている。そのために、核分裂バリア形成メカニズムを解明するとともに新しい準位密度の計算法を開発するという研究テーマに至った。

2. 研究の目的

対相関の変形依存性に着目して、核分裂バリアの形成メカニズムを明らかにすることがこの研究の目的の一つである。同様に、対相関の変形依存性が、準位密度にどのような影響を与えるか調べる。最終的に、得られた準位密度から、核反応シミュレーションを通して、高精度の原子核崩壊・反応モデルを構築し、放射線を用いた核物理基礎研究や材料・生命科学の分野に貢献する。

3. 研究の方法

(1) 対相関を考慮した準位密度

準位密度を理論的に導出する方法として、平均場理論である Skyrme Hartree Fock (SHF) 法と統計理論を組み合わせた“微視的統計法”を用いる。これまでの微視的統計法は、SHF法と統計理論で異なる残留相互作用を用いて計算を行うという欠点があった。その結果、対相関の変形依存性を正確に取り入れることができず、その効果を論じることができなかった。そこで、我々は残留相互作用を正確に取り入れた新しい微視的統計法の数値計算コードを開発し、これまで行われてこなかった対相関の変形依存性を考慮し

た準位密度計算を行う。

(2) 核分裂バリア形成メカニズムの解明

核分裂バリア形成メカニズムを調べる方法としてSHF法を採用する。数値計算コードは準位密度計算のSHFコードと同じものを利用するが、その計算コードは“対称核分裂”しか計算することができない。そこで、さらに現実的な核分裂へと応用させるため、これまで考慮していなかった八重極変形を考慮して計算コードを拡張し、“非対称核分裂”の計算を可能にする。また、核分裂バリア形成メカニズムをより詳細に解明するため、陽子・中性子以外にラムダ粒子を不純物として原子核中に取り込み調べる手法を確立する。この手法によって、200個近くある陽子と中性子の軌道を調べる代わりに、1個のラムダ粒子の軌道を見ることで、より詳細な微視的効果を調べることができる。同様に2個のラムダ粒子を入れた場合も議論する。これまでにラムダ粒子を不純物として含んだ核分裂の研究は行われておらず、独創的な研究である。

4. 研究成果

(1) 対相関を考慮した準位密度

微視的統計法による準位密度計算コードの開発に取り組み、完成させた。その計算コードを用いて、様々な原子核の準位密度の計算を行った。

得られた結果を実験データと比較するために中性子平均共鳴間隔の計算を行った。中性子平均共鳴間隔とは、原子核の中性子放出エネルギー付近での平均のエネルギー準位間隔である。図1はその結果を示している。横軸が原子核の質量数で、縦軸が理論的に得られた中性子平均共鳴間隔 D_{th} を実験から得られた D_{exp} で比を取った値を示している。我々の手法によって得られた結果は、実験データを10のファクター以内に再現している。この結果は、これまで提案されてきた他の最新の準位密度計算法と同程度の精度である。

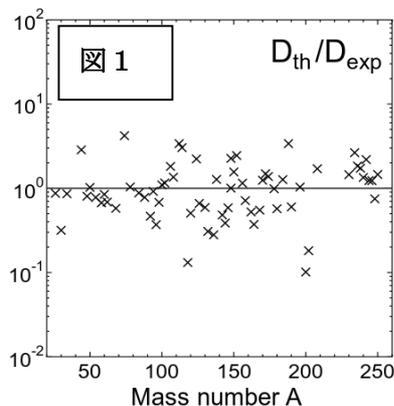
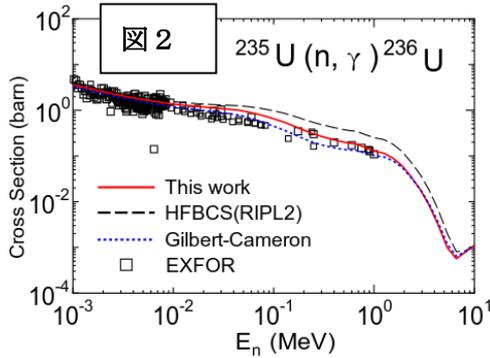


図 2 は得られた準位密度を核反応シミュレーションコードに取り込み、ウラン 235 (^{235}U) の中性子吸収断面積の計算を行った結果を示している。実験データ (EXFOR) および他のモデル (HFBCS法、Gilbert-Cameron法) との比較も行った。横軸は入射中性子のエネルギーで、縦軸は反応断面積を示している。我々の計算によって予測されている中性子吸収断面積は、HFBCS (RIPL2) や Gilbert-Cameron



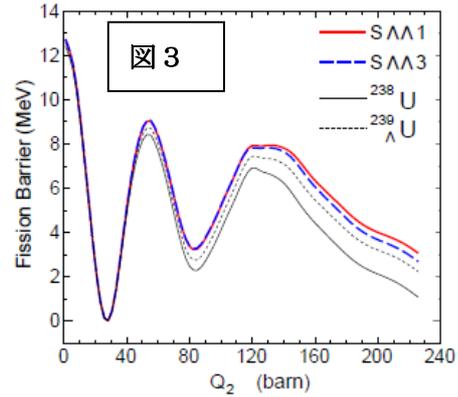
riber-Cameron法の値よりも実験データを再現しているのが分かる。他の原子核においても同様の結果が得られることを確認した。

本研究で開発した対相関の変形依存性を考慮した準位密度計算法は、より正確に中性子吸収断面積の実験データを再現できることを示した。この研究の成果によって、これまで標準的に使われている核反応シミュレーションよりもさらに高精度の核反応・崩壊予測を行うことを可能にした。今後はさらに、奇数核の準位密度計算や、核反応シミュレーションに必要なもう一つの情報である γ 線強度関数の導出などを行って、より信頼性のある原子核反応予測モデルの構築を行っていくことを計画している。

(2) 核分裂バリア形成メカニズムの解明

八重極変形を考慮したSHF法の数値計算コードの開発に取り組み、非対称核分裂をシミュレートすることを可能にした。さらに、原子核中にラムダ粒子を取り込み、核分裂バリア形成メカニズムを調べる新しい手法を確立した。

図 3 はウラン 238 (^{238}U) の核分裂バリアと、1 個または 2 個のラムダ粒子が入った場合の核分裂バリアを示している。横軸が原子核の変形度 (四重極モーメント Q_2) で、縦軸が核分裂バリアを示している。ラムダ粒子間の相互作用はいまだよく分かっていないために、我々は $S\Lambda\Lambda 1$ (赤) と $S\Lambda\Lambda 3$ (青) という 2 つの相互作用パラメータを使って、核分裂の計算を行った。この二つのパラメータの違いは相互作用距離であり、 $S\Lambda$

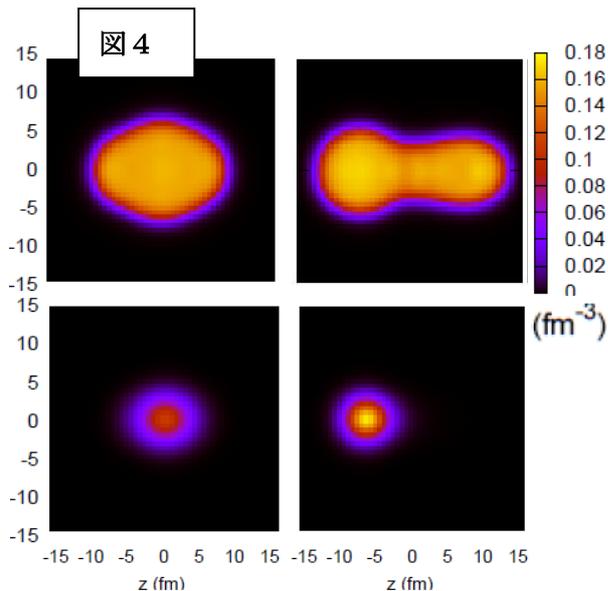


$\Lambda 1$ (相互作用距離 $\mu = 0.61\text{fm}$) は $S\Lambda\Lambda 3$ ($\mu = 1.49\text{fm}$) よりも相互作用距離が短い。ラムダ粒子が 1 つしかない場合の結果は点線で示してある。

ラムダ粒子が 1 つの場合、核分裂バリアは、ラムダ粒子がない場合 (実線) に比べて約 200 keV 程度高くなるのが分かった。これはラムダ粒子と核子が引力の関係にあり、2 つの核分裂片が分かれ難く、より安定になっているためであると解釈できる。またバリアの増加量は、ラムダ粒子がどちらか一方の核分裂片に移動するために必要なエネルギーと同等であることを解析より明らかにした。

ラムダ粒子が 2 つ原子核に入った場合、核分裂バリアは 1 つの場合に比べてより高くなる結果が得られた。これは、先ほど述べたように、ラムダ粒子がどちらか一方の核分裂片に移動するためのエネルギーが 2 つ分必要になったためである。また、ラムダ粒子の相互作用距離の違い ($S\Lambda\Lambda 1$ と $S\Lambda\Lambda 3$) による内側の核分裂バリアの変化は非常に小さいことが分かった。しかし、核分裂が進行するにつれて (Q_2 が増えるにつれて)、外側のバリアの幅に差が表れ始めてくるのが分かる。この相違は、原子核が分裂して小さくなり、原子核中の 2 つのラムダ粒子間の距離が狭くなったことと関連している。以下に、そのメカニズムを具体的に説明する。 $S\Lambda\Lambda 1$ は相互作用距離が短いために、原子核が小さくなくてもラムダ粒子間のエネルギーの変化は小さい。一方で、 $S\Lambda\Lambda 3$ は相互作用距離が長いために、ラムダ粒子間のエネルギーは原子核の大きさに敏感である。その結果として外側のバリアの幅が小さくなる結果が得られる。

図 4 はコア核 (上) とラムダ粒子 (下) の密度分布を示している。左側は基底状態の密度分布、右側は原子核が大きく変形した時の密度分布を示している。ラムダ粒子は左側の原子核へと移動していることが分かる。密度が一番小さくなる場所を分岐としてコア核を 2 つの核分裂片に分けると、左側の原子核が重い核分裂片に相当することが分かっ



た。つまり、重い原子核ほど強くラムダ粒子を引き寄せる傾向があるということである。最終的に、ラムダ粒子は分裂片中で崩壊して高い崩壊エネルギーを残す。この特性を活かすことによって、核燃料廃棄物を無害化させる新しい核変換技術に応用することが期待できる。

ラムダ粒子の軌道を追う新しい手法によって、陽子・中性子の複雑な運動が核分裂バリアを生み出すメカニズムの一部を解明した。ラムダ粒子を用いて核分裂を研究する手法は世界初であり、この研究成果は原子炉内に存在する不安定で寿命の短いマイナーアクチノイドの核分裂崩壊率の高精度予測に貢献することが期待できる。また今後は、ラムダ粒子を用いた手法をさらに拡張させ、核分裂後に出てくる即発中性子や終状態の原子核の励起エネルギーがどのように生み出されているか解明していく予定である。

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 3 件)

(1) 湊 太志,

“Nuclear microscopic level density with a consistent residual interaction”,
Journal of Nuclear Science and Technology,
2011年7月1日掲載予定.

(2) 湊 太志, 千葉 敏,

“Fission barrier of actinide nuclei with double- Λ particles within the Skyrme-Hartree-Fock method”,
Nuclear Physics A, Vol. **856**, pp. 55-67,

(2011).

(3) 湊 太志, 千葉 敏, 萩野 浩一,

“Fission of heavy Λ hypernuclei with the Skyrme-Hartree-Fock approach”,
Nuclear Physics A, Vol. **831**, pp150-162
(2010).

[学会発表] (計 5 件)

① 湊 太志, 千葉 敏, 萩野 浩一,

“Fission of heavy Lambda hypernuclei with the Skyrme-Hartree-Fock approach”,
日本物理学会 日米合同核物理分科会 ハワイ ワイコロアビレッジ, 10月、2009.

② 湊 太志, 千葉 敏, 萩野 浩一,

“Skyrme-Hartree-Fock 法を用いたハイパー核の核分裂”、
基研研究会「大振幅集団運動の微視的理論」基研・京都大学 2010年10月

③ 湊 太志,

“Skyrme-Hartree-Fock 法による微視的エネルギー準位密度の計算”、
日本原子力学会 秋の大会 北海道大学 2010年9月

④ 湊 太志,

“Skyrme-Hartree-Fock 法による微視的エネルギー準位密度の計算”、
日本物理学会 春季大会 岡山大学 2010年3月

⑤ 湊 太志,

“対相関の変形依存性を考慮した準位密度の計算”、
日本原子力学会 秋の大会 東北大学 2009年9月

[その他]

ホームページ等

<http://nscience.jaea.go.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

湊 太志 (MINATO FUTOSHI)

研究者番号：00554065