

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540289

研究課題名(和文)核分裂における断裂中性子と分裂片質量分布の動力学的研究

研究課題名(英文) Dynamical Study of Scission Neutrons and Fragment Mass Distribution in Nuclear Fission

研究代表者

和田 隆宏 (Wada, Takahiro)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：30202419

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：核分裂の過程で原子核が二つの分裂片に断裂する際に放出される断裂中性子および断裂陽子の角度分布を時間依存シュレディンガー方程式によって研究し、分裂片が角度分布に及ぼす影響を明らかにした。重い原子核の核分裂の動的過程を揺動散逸力学の枠組みで研究し、特にFmの分裂に対して核分裂片の質量分布および運動エネルギー分布のアイソトープ依存性を詳しく調べ、中性子数の増加に伴って対称核分裂の成分が増加し、質量分布や運動エネルギー分布が大きく変化する様子を明らかにした。また、分裂過程で現れる変形した原子核の形状を少数のパラメータで表現し、変形に対応したポテンシャルの微視的補正の計算法を改良した。

研究成果の概要(英文)：We investigated the angular distribution of scission neutrons and protons which are emitted at the moment of scission by solving the time-dependent Schroedinger equation. We clarified the effects of the fission fragments on the angular distribution of the scission particles. We investigated the fission process of heavy nuclei by means of the fluctuation-dissipation dynamics. By solving the multi-dimensional Langevin equation, we investigated the distribution of the mass and the total kinetic energy of the fragments for the fission of Fermium (Fm). We clarified that the symmetric fission components becomes dominant as the neutron number increases resulting in the qualitative change in the fragment mass and kinetic energy distributions. We investigated the parameterization to describe the various shapes that appear in the course of fission process and improved the calculation of the microscopic correction to the nuclear potential corresponding to each deformation.

研究分野：原子核理論

キーワード：核分裂 揺動散逸力学 ランジバン方程式 分裂片質量分布 断裂中性子 断裂陽子

## 1. 研究開始当初の背景

核分裂の発見は、核エネルギーの解放という形で人類に大きな恩恵をもたらしたが、一方、核分裂物質や核分裂生成物の多くは放射能を持つため、その処理が社会的課題となっている。発見後70年以上を経過しても、核分裂の仕組みはよく理解されているとは言い難い。

たとえば、核分裂の本質的理解には、核分裂の動的過程のどの段階で中性子が放出されるかが非常に重要である。また、分裂片の質量分布は、核分裂生成物を理解する上で重要なものというまでもなく、宇宙における r-過程元素合成での核分裂による新しい合成経路の発生という分野をまたぐ興味も持たれている。

核分裂は、平衡状態である1中心形状から原子核が変形し、変形ポテンシャルの鞍点を越えて、ネック(くびれ)によって結ばれた2中心形状に至り、さらに変形が進んで最終的にネックが切れる一連の過程である。我々は、揺動散逸力学の観点から、Langevin 方程式によって上に述べた核分裂過程を動力学的に研究してきている。この扱いは、原子核形状の時間変化を、核子の熱運動の反映であるランダムな力と変形ポテンシャルからの力による運動として記述し、平衡状態から分裂に至るまでを追跡するもので、粒子放出の効果を取り入れつつ、分裂片の質量や運動エネルギーをイベント毎に求める点で、実験との比較に適している。これまでに、断裂前に放出される中性子の数と分裂の時間スケールの関係に着目した先駆的な研究(T. Wada, Y. Abe, N. Carjan, Phys. Rev. Lett 70 (1993) 3538-3541)や、分裂片の質量・運動エネルギー分布の基礎的研究、超重元素合成における核融合・分裂過程の動的的研究などで多くの成果を上げてきている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、核分裂を動力学過程として捉え、その理解を深めることである。ポイントは二つある。一つは、断裂中性子の角度分布を理論的に求め、実験に指針を与えることで、ネックが断裂する過程の理解を深めること、もう一つは、分裂片の質量分布・運動エネルギー分布の理論計算における定量性を高めること。特に、理論的に予想されるアイソトープ依存性を示すことで新たな実験を喚起し、核分裂におけるポテンシャルエネルギーの微視的補正、いわゆる「殻補正」についての知見を深めることを目指している。

断裂中性子は分裂片のごく近傍で放出されることから、その角度分布は分裂片からの終相互作用に影響されるはずである。本研究では、断裂中性子の角度分布が分裂片によってどう変化するかを考える。特徴的な角度分布が得られれば、断裂中性子を測定で特定することが可能となり、断裂の速さなどに関する知見がこれまでにくらべて大きく広がることが期待される。他方、断裂陽子については角度分布が異なることが予想される。これは、陽子が正の電荷を持つためである。断裂陽子は分裂片から強いクーロン斥力を受けるが、これは陽子を分裂軸と垂直な方向に押しやる傾向を持つ。陽子は中性子に比べて分裂あたりの放出数は少ないが、検出が容易であるため、断裂中性子と同様、重要な研究対象である。

分裂片の質量分布や運動エネルギー分布は、核分裂における主要な測定量である。たとえば、分裂片の運動エネルギーは主に断裂後の分裂片間のクーロン斥力による加速によるものであり、断裂直後の分裂片間の距離、すなわち断裂時の形状に関する情報を与える。これに対して質量分布は変形ポテンシャルの鞍点の位置や高さ、鞍点か

ら断裂に至るポテンシャルの谷の深さなどによって決定される。鞍点の位置や高さは、殻補正によって決まり、核子数（中性子数や陽子数）に強く依存すると考えられる。Fm などのアクチノイド核において質量分布や運動エネルギー分布のアイソトープ依存性を理論的に求め、これまでに知られている実験結果との比較を行うとともに、実験の行われていない核種での理論値を示すことで、新たな実験を喚起し、アクチノイド領域における核分裂の知見を深める。これは、理論的に得られる殻補正が現実のデータを再現できるかのテストとなると同時に、核分裂動力学が分裂片の質量・運動エネルギー分布にどのように反映されるかを明らかにする。

### 3. 研究の方法

断裂中性子の角度分布は、中性子に対する時間依存シュレディンガー方程式を解いて、その時間発展から計算する。二つの分裂片の効果は光学ポテンシャル（虚数の吸収ポテンシャルを含む）の形で取り入れ、断裂点を中心とする球対称分布を持つ波束を初期条件として、分裂片から十分離れた球面における確率の流れから、角度分布を求める。散乱状態を時間依存シュレディンガー方程式で扱う際には、計算領域の境界における波動関数の反射が問題となる。本研究では、確率の流れを計算する球面の外に弱い吸収ポテンシャルを導入し、計算領域の境界における波動関数の絶対値を減少させることで、反射の影響を取り除く方法を用いる。分裂片が互いのクーロン斥力によって時間とともに遠ざかる動きを取り入れる。光学ポテンシャルのうち、実部の引力ポテンシャルは、中性子の波動関数を分裂軸方向に引き寄せ、虚部の吸収ポテンシャルは分裂片に近づいた波動関数を減衰させる。吸収ポテンシャルの強さや初期分布

の広がり、分裂片の質量非対称性などを変化させて、中性子の角度分布がどのように変化するかを調べる。断裂陽子に対しては、同様の方法を用いるが、陽子と分裂片の間に働くクーロン斥力を考慮することで、角度分布がどのように変化するかを調べる。

分裂片の質量分布・運動エネルギー分布は、核分裂過程を揺動散逸動力学によって平衡変形から断裂に至るまでを記述し、断裂時の分裂片の質量非対称度、重心間距離、変形度から求める。このために、まず核の形状を少数のパラメータで表し、パラメータ空間での慣性質量テンソル、摩擦テンソル、ポテンシャルエネルギーを用意する。中でもポテンシャルエネルギーは、核分裂経路を決定するもっとも重要な要因である。本研究では、ポテンシャルエネルギーは巨視的・微視的モデルにより計算する。この方法では、まず液滴モデルなどの巨視的モデルにより核子数や核の変形に対して緩やかに変化する平均のポテンシャルを求め、これに核子の単一粒子エネルギーの不均一性に起因する微視的補正(殻補正)を取り入れる。揺動散逸動力学を記述する方程式としては、Langevin 方程式を用いる。揺動散逸動力学とは、原子核のような多自由度系の動力学を考える際に、巨視的・集団的な自由度と残りの熱運動する自由度との間のエネルギーのやり取りを摩擦力（散逸）とランダム力（揺動）として取り入れるもので、極めて一般的な枠組みである。本研究では、核の形状を表すパラメータとしては2中心モデルを用い、3つのパラメータ(elongation, deformation, mass asymmetry)を集団変数とする。殻補正は Strutinski 法により求め、励起エネルギーの増加に伴う殻補正の減衰効果を取り入れる。核種と励起エネルギーを定め、平衡変形から出発して多数の軌跡を追跡し、ランダム力によって鞍点に達し断裂に至るサンプルを記録する。断裂

時の Asymmetry から二つの分裂片への質量分配が決まり、Elongation と Deformation から分裂片が無遠方で持つ全運動エネルギー (Total Kinetic Energy) が求められる。

#### 4. 研究成果

まず、断裂中性子および断裂陽子に対する計算結果例を示す。図1は断裂中性子の角度分布、図2は断裂陽子の角度分布を求めた結果である。親核は  $^{236}\text{U}$  を考えており、これは  $^{235}\text{U}$  が中性子を吸収したもので、原子炉での主要な分裂反応である。光学ポテンシャルは Woods-Saxon 型の形状を仮定し、実部の深さは  $-40\text{MeV}$  とする。虚部の深さ  $W$  としては、 $W=0$  すなわち吸収なしと  $W=-1\text{MeV}$  の場合を図示している。図中の一点鎖線は対称核分裂で  $W=0$  に対するもの、残りは非対称核分裂で具体的には  $\text{Kr}+\text{Ba}$  を想定している。実線は  $W=0$  の場合で、破線は  $W=-1\text{MeV}$  の場合である。

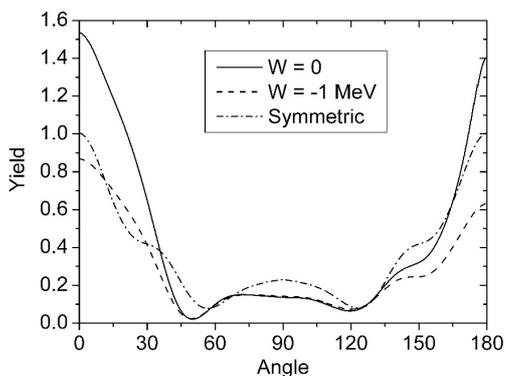


図1：断裂中性子の角度分布

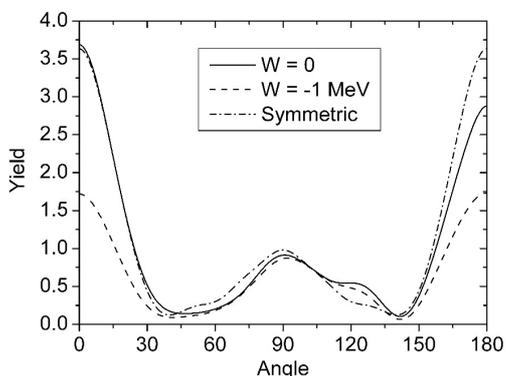


図2：断裂陽子の角度分布

断裂中性子、断裂陽子とも  $W=0$  では、0度と180度の方向に多く現れることがわかる、これは分裂片の引力ポテンシャルによって引きつけられる効果である。また非対称分裂では0度すなわち重い分裂片のほうにより強く引きつけられることがわかる。次に、吸収ポテンシャルを導入すると0度と180度で減少が見られ、吸収の強さによって角度分布の形が変わることがわかる。また、中性子と陽子を比べると、陽子の場合には90度方向に集中する傾向が見られるが、いわゆるクーロン集中として想定される90度方向に強いピークを持つものではないことがわかる。これらの結果はこれまでの常識、すなわち中性子は等方的に分布し、陽子は90度ピークで分布するというものとは全く異なり、本研究によって初めて明らかにされたものである。

次に、分裂片の質量・運動エネルギー分布の計算結果を示す。図3と図4はFm核の核分裂における分裂片の質量数 ( $A_1$ ) と全運動エネルギー (TKE) の分布を示すため、質量数を横軸、運動エネルギーを縦軸にとり、分布の高さを色で表現している。図3は軽い同位核  $^{246}\text{Fm}$  に対するもの、図4は重い同位核  $^{264}\text{Fm}$  に対するもので、それぞれ典型例として取り上げた。Fm核分裂における分裂片の質量分布および運動エネルギー分布は中性子数によって大きく変化する。 $^{246}\text{Fm}$  では非対称核分裂がメインであるのに対し、中性子数の増加に伴って対称核分裂の成分が増加し、 $^{264}\text{Fm}$  では対称核分裂が主要な成分となっているのがわかる。 $^{246}\text{Fm}$  で薄い水色の部分や  $^{264}\text{Fm}$  で赤色の部分が分布のピークに対応している。 $^{246}\text{Fm}$  ではピークの質量数が98と148付近にある (非対称核分裂) のに対し、 $^{264}\text{Fm}$  では質量数132の対称分裂に集中している。運動エネルギーで見ると、 $^{246}\text{Fm}$  ではピークが195MeV付近にあるのに対して、 $^{264}\text{Fm}$  では240MeV付近にあり、対称核分裂において運動エネルギー、すなわちクーロンエネルギーが

大きいことを示している。これは、分裂時の形状が対称核分裂においてよりコンパクトであることを示している。Fm原子核では基底状態からトンネル効果によって分裂する自発核分裂における分裂片質量分布のデータがあり、軽い同位核（ $^{256}\text{Fm}$ ）では非対称分裂が観測され、重い同位核（ $^{258}\text{Fm}$ ）では対称分裂が観測されている。計算で示したのは、励起エネルギーが10MeVの結果であり、また質量数も異なっている。今後これらの同位核で実験データが得られることが望まれる。

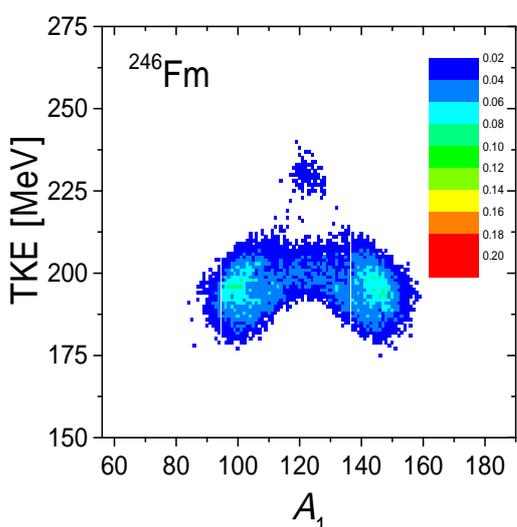


図3： $^{246}\text{Fm}$ の質量・運動エネルギー分布

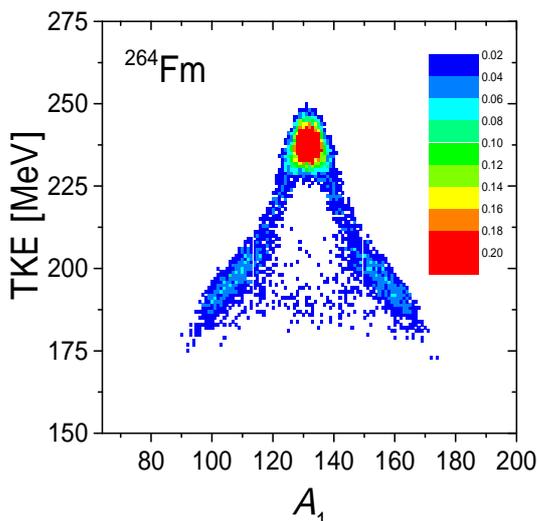


図4： $^{264}\text{Fm}$ の質量・運動エネルギー分布

これらの他に、断裂中性子の研究では、計算領域の境界における波動関数の反射を取

り扱う方法として、無反射境界条件を課す方法を検討した。これまでに一次元運動については、無反射条件の適用に成功しており、現在3次元円筒座標系で研究を続行している。また、揺動散逸力学におけるポテンシャルの殻補正については、単一粒子準位のエネルギー固有値の計算精度を高めるため、区分関数近似の方法を試みている。計算時間の問題があるが、精度は十分に確保できている。これらについては、来春学会発表を行う予定である。原子核の形状を表すパラメータ空間として、2中心模型は計算に適さない形が現れる点で問題があり、より適切なパラメータを検討している。これに関しては、Pomolski氏と協力しているが、新しいパラメータでのLangevin方程式による計算を行うには至っていない。

#### 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)

T. Wada, T. Asano, N. Carjan, Effects of fission fragments on the angular distribution of scission particles, *Physica Procedia*, Vol. 64, 2014, 34-39.

T. Wada, T. Asano, M. Hirokane, N. Carjan, M. Rizea, Effects of fission fragments on the angular distribution of fission fragments, *Physica Procedia*, Vol. 47, 2013, 33-38.

M. Rizea, N. Carjan, T. Wada, Angular distribution of the scission neutrons with respect to the fission axis, *Physica Procedia*, Vol. 47, 2013, 27-32.

[学会発表](計 6 件)

Takahiro Wada, Tomomasa Asano, Masahisa Ohta, Fission Mode and Fragment Mass Distribution of Fm Isotopes, 5th International Conference on the Chemistry and Physics of the Transactinide Elements (TAN15)、2015年5月26日、裏磐梯ロイヤルホテル(福島県・北塩原村)

Takahiro Wada, Fission Fragment Mass Distribution of Fm Isotopes, ASRC International Workshop “Nuclear Fission and Exotic Nuclei”, 2014 年 12 月 4 日、日本原子力研究開発機構（茨城県・東海村）

Takahiro Wada, Tomomasa Asano, Effects of fission fragments on the angular distribution of scission particles, Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Division of the American Physical Society and the Physical Society of Japan, 2014 年 10 月 10 日、Waikoloa (Hawaii, USA)

Takahiro Wada, Fluctuation-Dissipation Dynamics of Fission and Heavy-Ion Fusion Reactions, International Workshop on Quantitative Large Amplitude Shape Dynamics, INT13-3, 2013 年 10 月 9 日、Seattle (USA)

和田 隆宏、浅野 大雅、広兼 宗諒、N. Carjan, M. Rizea、時間依存シュレディンガー方程式による断裂中性子の角度分布の研究、日本物理学会、2013 年 3 月 27 日、広島大学（広島県・東広島市）

和田 隆宏、浅野 大雅、広兼 宗諒、ポテンシャルモデルによる断裂中性子の角分布、日本原子力学会、2013 年 3 月 26 日、近畿大学（大阪府・東大阪市）

〔図書〕(計 0 件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

和田 隆宏 (WADA, Takahiro)  
関西大学・システム理工学部・教授  
研究者番号：30202419