

非対称核分裂をめぐる謎の解明  
～洋ナシ型原子核の出現～

研究成果のポイント

1. 核分裂現象をめぐる謎の一つ、キセノン周辺の元素の原子核が大量に作られる理由を、依存密度汎関数理論を用いた核分裂現象のシミュレーションによって解明しました。
2. これまで困難とされた時間依存密度汎関数理論の核分裂現象への適用に成功し、分裂の機構をミクロな観点から解明することに成功しました。
3. 核分裂片としてどのような元素（原子核）がどのように生成されるかを解明することは、基礎科学の域を越えて、様々な応用において大きな意義があります。

国立大学法人筑波大学 計算科学研究センター ギヨーム・スカムス (Guillaume Scamps) 研究員 (原子核物理研究部門) は、オーストラリア国立大学との共同研究により、原子力エネルギーの源である核分裂<sup>(注1)</sup> 反応の数値理論的解析を用いて、核分裂現象をめぐる謎の一つ、分裂片として生成される核種にキセノン<sup>(注2)</sup> 周辺の元素が大量に含まれているのはなぜかを解明しました。

原子力発電のエネルギー源は、ウランやプルトニウム等の重い原子核が分裂する際に放出するエネルギーです。核分裂現象のミクロな機構の解明は、原子核物理学の重要な課題ですが、多くの粒子が関与する量子力学的過程であることから、非常に困難な課題として研究者を悩ませてきました。分裂片の核種にキセノンなどが多く存在することも、実験ではよく知られていたものの、理論的にその理由は謎とされていました。

スカムス研究員らは、今回、時間依存密度汎関数理論<sup>(注3)</sup> と超伝導の理論であるBCS理論を組み合わせ、スーパーコンピュータ (スパコン) を用いた数値計算を実施し、この困難な課題に挑戦しました。その結果、数値計算の解析から、分裂片として生成される核種に多く含まれているキセノンなど、原子番号52から56あたりの原子核を産み出す新たな機構を提唱しました。

生成される分裂片核種の領域は、洋ナシ型 (瓢箪型) の形をした原子核が安定して存在する領域として知られている領域です。今回の研究では、この洋ナシ型に変形した原子核が分裂時に出現することが分かりました。1つの原子核が2つに分裂する際、分裂の相手側に引っ張られて洋ナシのような形が自然に作り出されます。この時にエネルギー的に得をするのが、キセノンやバリウムなどの原子核であり、そのためこれらの核種が分裂片として生成されるのです。このことを数値計算で示し、また分裂片の持つ運動エネルギーなど、他の観測量についても実験データと良く一致することを示しました。

今回の成果は、長年の課題であった核分裂現象の観測事実を説明する新説としてだけでなく、最近観測された水銀などの新しい領域の核分裂現象に関しても、重要な意味を持ちます。さらには、宇宙元素合成における核分裂の役割に関しても、多くの知見を提供することになると期待されます。

本研究の成果は、2018年12月19日（日本時間20日3時）付で「Nature」で公開される予定です。

\* 本研究は、筑波大学計算科学研究センターの学際共同利用プログラムによって提供されたスパコンCOMAの計算資源を用いて実施されました。

## 研究の背景

原子力発電のエネルギーは、ウランやプルトニウム等のアクチノイド<sup>(注4)</sup>と呼ばれる核種（重い原子核）の核分裂を用いて取り出されています。1938年に核分裂現象が発見されてから80年、エンリコ・フェルミが世界初の原子炉を作ってから既に75年以上の年月が経過していますが、核分裂現象には多くの謎が残されています。例えば、分裂する際に、ほぼ等しい大きさの原子核2つに分裂する場合（対称核分裂）と、大きさが異なる2つの原子核に分裂する場合（非対称核分裂）が観測されていますが、エネルギー的に必ずしも得をしない非対称核分裂が起こる理由は、未だミクロな観点から解明されていません。特に、アクチノイドに属する原子核の非対称核分裂においては、分裂する原子核の核種によらず、分裂片のうち大きい方はキセノン（原子番号54）の原子核、あるいはその周辺の原子核であることが実験で確かめられています。多くの研究者がこの問題に取り組んできましたが、その理由、および非対称核分裂のミクロな機構は未解明の謎として長い間残されていました。

## 研究内容と成果

原子核の構造・反応の量子ダイナミクスを記述する時間依存密度汎関数理論とスパコンを用いた大規模数値シミュレーションを実施することで、核分裂現象のミクロな機構を解析することに成功しました。

筑波大学と理研のグループは、核分裂を起こすような重い原子核の記述で必要とされる対凝縮機構を、時間依存BCS理論を用いて取り入れる手法を開発してきました [1]。今回、スカムス研究員は、同様の理論手法を用いて、オーストラリア国立大学のSimenel准教授と共同で、スカム型（スカーム型）のエネルギー密度汎関数を用いた最先端の計算を実行しました。原子核が分裂する様子を計算機上でシミュレートし、核分裂がどのように進行しているのかを調べました。その結果、非対称核分裂の分裂初期の段階で作られた八重極変形<sup>(注5)</sup>（洋ナシ型変形）が、分裂する直前にも分裂片のそれぞれに引き継がれていることが分かりました（図1）。しかも、大きい方の分裂片がキセノンとその周辺の原子核に対応しています。すなわち、分裂直前の段階においては、分裂片同士が引き合うために、このような八重極変形した原子核が出現します。すると、このような形においてエネルギー的に得である原子核が作られるというわけです。実際に、周期表でキセノンのそばに位置するバリウム（原子番号56）の原子核<sup>144</sup>Baは、八重極変形を引き起こしていることで有名な核種であり、様々な実験及び理論的な研究により、この周辺の原子核の多くも八重極変形していることが示唆されています。一方、この領域から離れると、原子核を八重極変形させるためには大きなエネルギーを必要とします。したがって、バリウムやキセノンといった原子核が分裂片として選ばれるというわけです。

これまで、非対称核分裂においては、原子番号50の錫の原子核が持つ陽子数50の殻効果が重要なのではないかという示唆がありました。丸い原子核の場合、錫の原子核は確かにエネルギー的に得をしますが、ではなぜ錫よりもキセノンを核分裂では多く作り出すのか、という疑問が残ります。今回の研究はこの説を覆し、バリウム領域の八重極変形した原子核の存在が非対称性の起源であるという新説を提唱するものになります。この新しい解釈においては、これまで理解困難であった実験データ、原子番号52から55の元素が大量に作られること、分裂片が獲得する運動エネルギーの大きさなどが自然に理解できます。

### 今後の展開

最近大きな話題となっている核分裂としては、鉛（原子番号82）よりも軽い原子核の核分裂が実験的に調査され、多くの非対称核分裂現象が発見されています。その中には、従来のモデルでは理解できないデータがあり、今回の成果は、この軽い領域の核分裂に対しても重要な意味があるかもしれません。また、ここで用いられた理論・数値手法をこの領域の新しい核分裂に適用することで、理解が大きく進展すると考えられます。

現在の世界を形作る様々な元素は、宇宙進化の歴史の中で作り出されてきたものです。重い元素の生成過程にはまだ多くの謎が残っており、特に爆発的天体現象の裏で進むと考えられているrプロセス<sup>(注6)</sup>と呼ばれる元素生成過程の研究においては、核分裂が果たす役割が注目されています。核分裂現象のミクロな機構を理解することは、宇宙における元素誕生の謎解明や、原子力エネルギーを産み出す過程を計算機でシミュレートする上でも重要な貢献をする可能性があります。

### 参考図

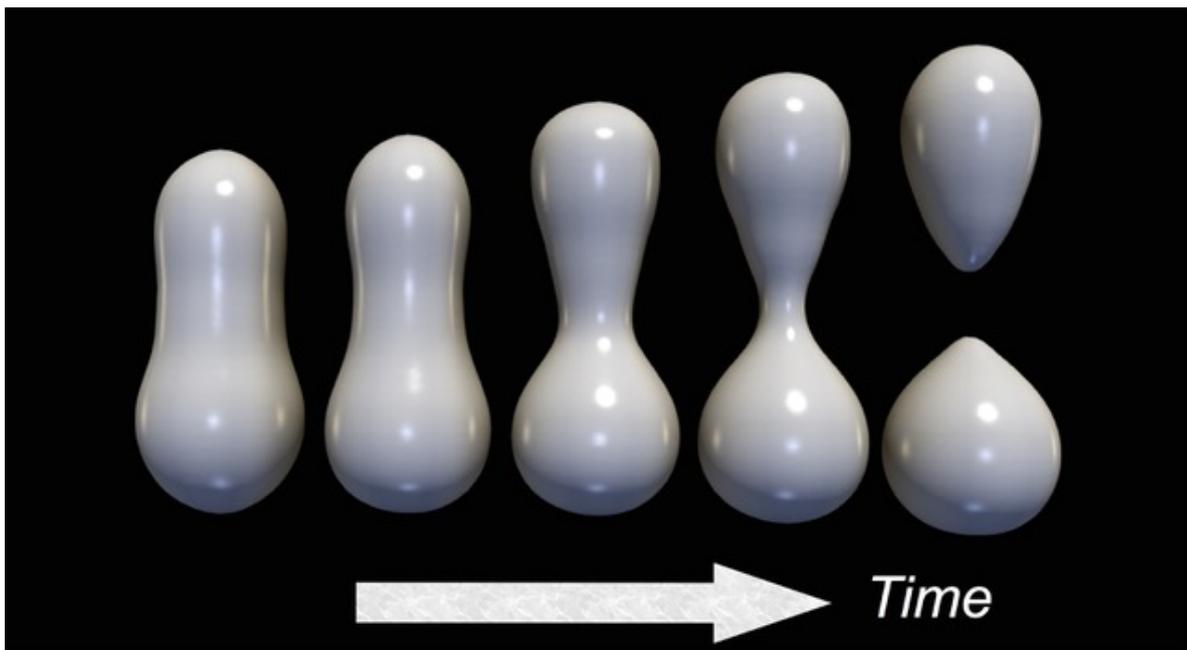


図1. プルトニウム原子核 ( $^{240}\text{Pu}$ ) の核分裂シミュレーションの結果。分裂していく様子（核形状）を表している。左端から右端の状態まで、時間スケールはおおよそ20 zs (zs: ゼプト秒、 $10^{-21}$  秒)。2つに分裂すると、重い分裂片（下部）の原子核が八重極変形をしているが、この形状が分裂して生成される核種に重大な影響を与えていることが分かった。

### 用語解説

注1) 核分裂

原子核が分裂し、2つ（以上）の重い原子核を作り出す反応。軽いヘリウムの原子核（アルファ粒子）を放出する反応はアルファ崩壊と呼ばれ、核分裂とは区別されている。核分裂が発見された当初から、非対称核分裂が起きていること、バリウムの原子核が作られていることが知られていた。

注2) キセノン

原子番号54の元素。すなわち54個の陽子を含む原子核を持つ。不活性な希ガスの一つであるが、核分裂生成物として原子炉の中で大量に作られていることが知られている。チェルノブイリの事故を引き起こした一因は、溜まった<sup>135</sup>Xeの原子核が強い中性子吸収効果を持つことを運転員が理解していなかったことにあるとされる。

注3) (時間依存) 密度汎関数理論

(時間に依存する) 密度分布と多粒子系の量子状態とが1対1に対応するという定理に基づき、密度分布を基本的な自由度と考える理論。量子力学に基づいて波動関数を求めることが困難な量子多体系に多く用いられている。

注4) アクチノイド

原子番号89のアクチニウムから原子番号103のローレンシウムまでの15個の元素の総称。ウランやプルトニウムといった元素を含む。

注5) 八重極変形

洋ナシや瓢箪のような形で、大きさが異なる2つの球を結合させたような変形を表す。重心の周りの180度回転や、空間を反転させるパリティ変換に対して不変ではないため、このような形状を持つ原子核には、パリティの異なる状態が交互に現れる特徴的なスペクトルを持つ回転バンドが現れる。

注6) rプロセス

宇宙において鉄よりも重い元素を作り出す過程の一つで、およそその半分はこのrプロセスで作られたと考えられている。爆発的天体現象の中で大量の中性子が存在する環境があると、地球上には通常存在しない、中性子を過剰に含んだ重い原子核が生成される。重すぎる原子核は核分裂すると考えられるが、この見積もりには不定性が大きい。

参考文献

[1] S. Ebata, T. Nakatsukasa, T. Inakura, K. Yoshida, Y. Hashimoto, and K. Yabana, Phys. Rev. C 82, 034306 (2010).

掲載論文

【題名】 Impact of pear-shaped fission fragments on mass-asymmetric fission in actinides  
(アクチノイド領域の質量非対称核分裂における洋ナシ型分裂片のインパクト)

【著者名】 Guillaume Scamps, Cédric Simenel

【掲載誌】 Nature

DOI:10.1038/s41586-018-0780-0

問い合わせ先

中務 孝（なかつかさ たかし）  
筑波大学 計算科学研究センター 教授  
〒305-8572 茨城県つくば市天王台 1-1-1  
E-mail: nakatsukasa[at]nucl.ph.tsukuba.ac.jp  
Tel: 029-853-4282