May 24 2019

京都大学基礎物理学研究所 パナソニック国際交流ホール

|研究会「原子核物理でつむぐrプロセス」 <sup>ハナン</sup>

セッション9: 超重元素と核分裂(後半)

# 高励起複合核における核分裂および 中性子放出の競合過程

### Competition between fission and neutron-emission at highly excited nucleus

Shoya Tanaka,<sup>1,2</sup> Kentaro Hirose,<sup>2</sup> Katsuhisa Nishio,<sup>2</sup> Yoshihiro Aritomo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Science and Engineering, Kindai University

<sup>2</sup>Advanced Science Research Center, Japan Atomic Energy Agency







rプロセスと核分裂

http://www.riken.jp/pr/press/2012/20121122/ 強度 > 1 個/日 (U) 安定核の破砕 (Pb) ウランの核分裂と破砕 新元素113番 (Sn) 5 (質量数278)発見!! 126 04 7 23 18:55 (魔法数) (Ni) 28 82 RIビームファクトリーで拡大 される生成可能なRIの領域 (Ca) 20 天然に存在する原子核 50 これまでに発見されたRI (O) 8 理研で新たに発見したRI (He) 2 原子核の存在限界(理論的予想) 魔法数(マジックナンパー) 中性子数 ---超新星爆発で作られた不安定核 (同位元素の種類) (ウランまでの元素が合成)の経路(仮説)(

核分裂サイクル(自発核分裂、中性子入射核分裂、β遅延核分裂) 中性子過剰領域での核分裂の理解が重要となる。

### 原子力機構での取り組み











Fragment Mass (u)

### 陽子入射核分裂との比較



### 高励起複合核における核分裂および中性子放出の競合過程



中性子放出と核分裂が競合して発生する。競合過程はエネルギーが分裂障壁以 下になるまで続く。 分裂する前に放出される中性子の数で分離することが実験ではできない。

### マルチチャンス核分裂 (Multi-chance fission: MCF)



J.P. Lestone, and T.T. Strother, Nuclear Data Sheets 118 (2014) 208-210

#### マルチチャンス核分裂の存在

核分裂断面積がエネルギーに対して中性子放出数に対応し階段状の振る舞いが 観測される。

平均全運動エネルギーや平均即発中性子エネルギー、平均即発γ線エネルギー について複合核の励起エネルギーを軸に取った場合も同様の傾向が見られる。

11論植刑

#### Multi-dimensional Langevin Equation





原子核のエネルギーが変化することで、核分裂の様相も変化する。

エネルギーが低い場合 → 質量非対称分裂 = ふた山分布 エネルギーが高い場合 → 質量対称分裂 = ひと山分布

### 計算過程



各チャンス核分裂の質量分布(2)に確率(1)で重みをかけて足し合わせることで、実験 データと比較可能な計算結果が得られる。

 $\bar{E}_k = 1.9 MeV$  (Calculated by PACE2 code) A. Gavron, Phys. Rev. C 21, 230 (1980).

Mass table: P. Möller, A.J. Sierk , T. Ichikawa, H.Sagawac Atomic Data and Nuclear Data Tables 109–110 (2016)

### 計算結果のまとめ

トリウム、プロトアクチニウム、ウラン、ネプツニウム、プルトニウムの同位体 において励起エネルギー15~55 MeVの範囲で計算を行った。



Experimental data

[5] R. Leguillon et al., Physics Letters B 761 125-130 (2016). [6] K. Hirose, K. Nishio, S. Tanaka, et al., Phys. Rev. Lett. 119, 222501 (2017). 11

### マルチチャンス核分裂の効果



- マルチチャンス核分裂を導入しない場合、殻構造が消失しているため質量対称分裂が支配的となっている。
- この計算結果は初期状態(<sup>240</sup>U, E<sup>\*</sup>=45 MeV)からの核分裂のみ を評価したものであり、この核 分裂の真の姿を明らかにした計 算結果と言える。

- マルチチャンス核分裂の効果に よって、高い励起エネルギーに おいて現れる、明らかな非対称 分布が再現された。
- これは中性子放出により、励起 エネルギーの下がった原子核からの核分裂に起因するものである。

中性子数依存性

原子核の励起エネルギーを固定して考えた場合、高い励起エネルギーにおい て同位体における中性子が多くなるほど、核分裂片質量分布のPeak-to-Valley Ratioが大きくなる現象が観測された。



## 殻構造の温度依存性と中性子放出による脱励起

 $V(q, l, T) = V_{LD}(q) + V_{SH}(q, T)$  $V_{LD}(q) = E_S(q) + E_C(q)$  $V_{SH}(q, T) = E_{shell}^0(q)\Phi(T)$ 

Ignatyuk type function  

$$\Phi(T) = \frac{exp\left(-\frac{aT^2}{E_d}\right)}{\text{Shell damping energy: } E_d = 20 \text{ MeV}}$$

A. V. Ignatyuk, et al., Yad. Fiz. 21, 485 (1974); Sov. J. Nucl. Phys. 21, 255 (1975).



### <sup>254</sup>Es(アインスタイニウム)を用いた実験





Fission barrier Calc from P. Moller et al., PRC 79, 064304 (2009)

Experimented by JAEA team at tandem accelerator facility

まとめ

- ▶ マルチチャンス核分裂(MCF)の研究はFission probabilityやTotal kinetic energyの観測 によって示唆されてきたが、核分裂片質量分布に対する評価は行われてこな かった。
- ▶ 高い励起エネルギー領域では、核分裂と中性子放出が競合して発生することが予測され、マルチチャンス核分裂の影響が大きくなる。
- ▶ 動力学模型と統計模型を用いた理論計算によってマルチチャンス核分裂 を導入した核分裂片質量分布を評価し、マルチチャンス核分裂が核分裂 片質量分布に与える影響を示した。
- ▶ 高励起複合核で維持される核分裂片質量分布のふた山構造は最初の原子 核の殻構造が残っているのではなく、マルチチャンス核分裂の効果に よって励起エネルギーの下がったものを観測していることが分かった。

▶ 高励起複合核の質量分布における同位体中性子数依存性を初めて説明した。

▶ この結果から高励起複合核の核分裂においてマルチチャンス核分裂の効果は大きなものであり、他の観測量においても考慮されるべき効果である。