

# 動力学モデルによる Md-258の核分裂計算

石崎翔馬<sup>1</sup>, 奥林瑞樹<sup>1</sup>, 宮本祐也<sup>1</sup>, 有友嘉浩<sup>1</sup>, 廣瀬健太郎<sup>2</sup>, 西尾勝久<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Science and Engineering Research, Kindai University, Higashiosaka 577-8502, Japan

<sup>2</sup>Advanced Science Research Center, Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Tokai, Ibaraki, Japan

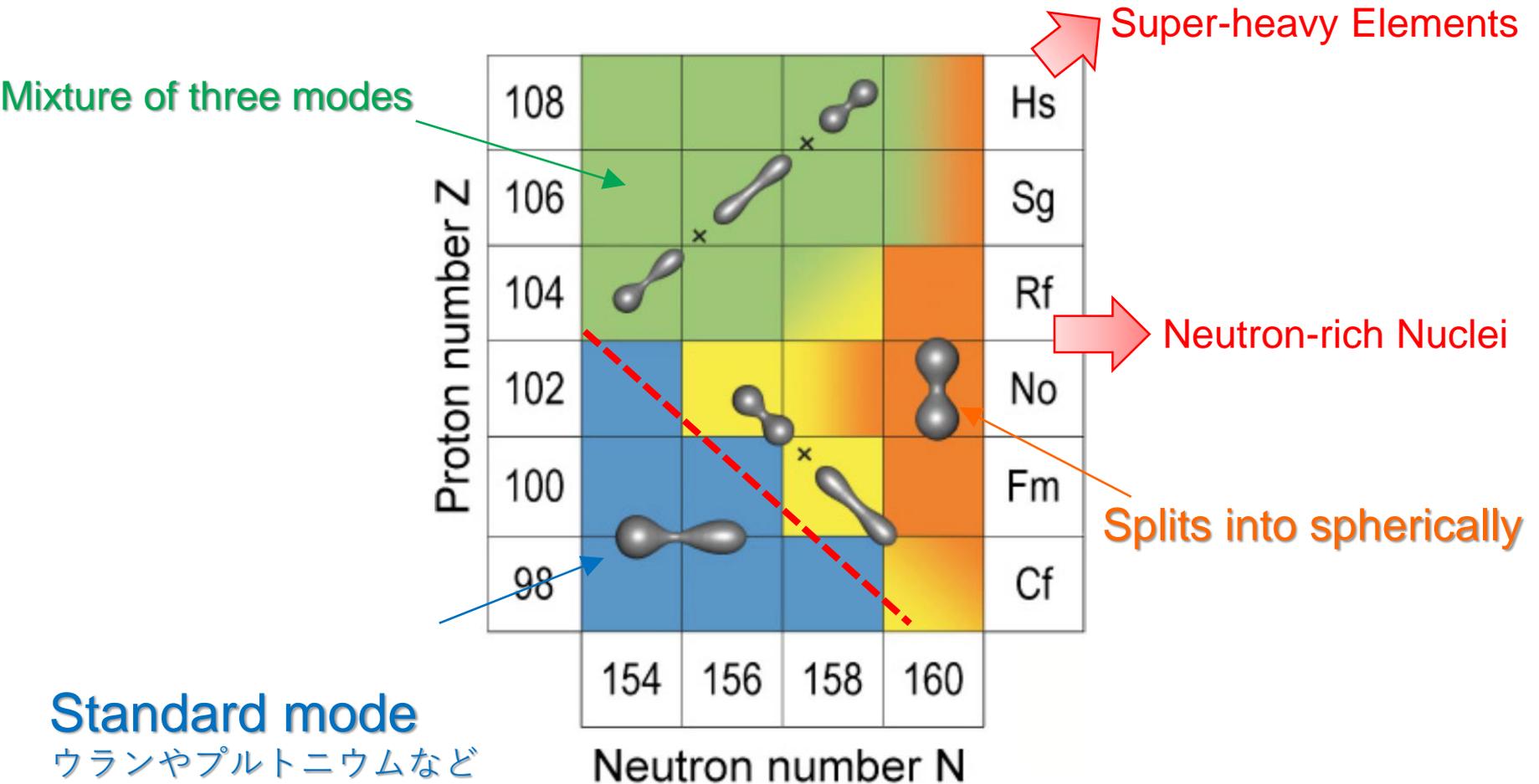
# 発表内容

---

- 導入
- Md-258の核分裂計算結果
- まとめ
- 今後の課題

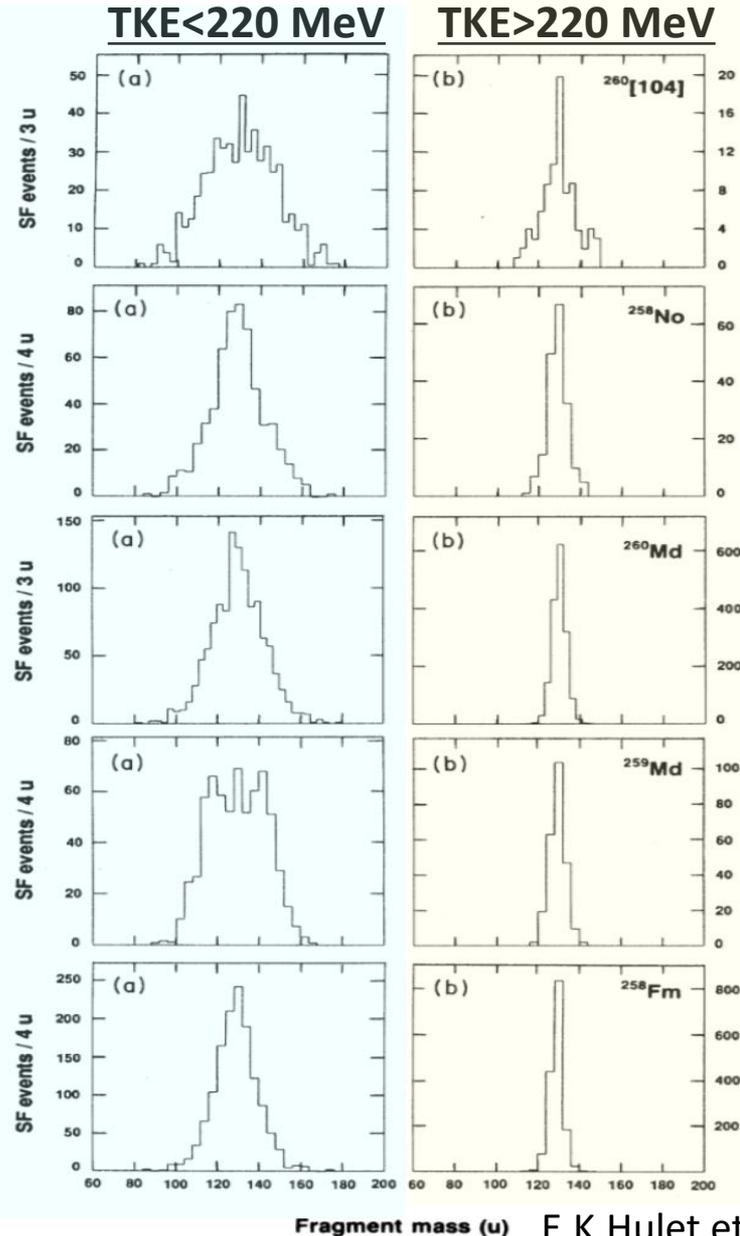
# 重元素及び中性子過剰核の核分裂

## 核分裂モードの混在



# 核分裂モードの混在例

(運動エネルギーで区別)



ブロードな分布

質量対称分裂  
と  
質量非対称分裂

シャープな分布

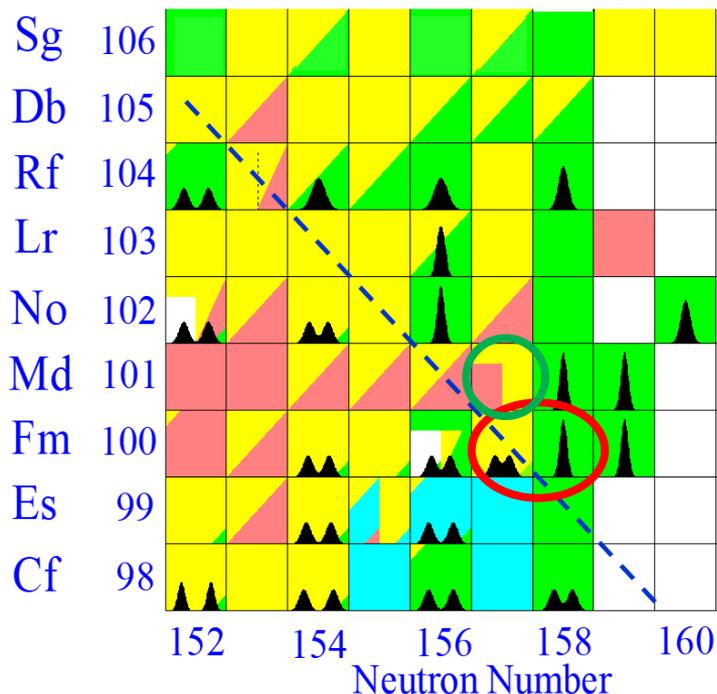
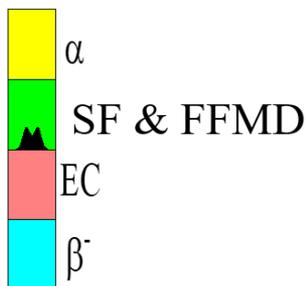
質量対称分裂

# フェルミウム領域の核分裂特性

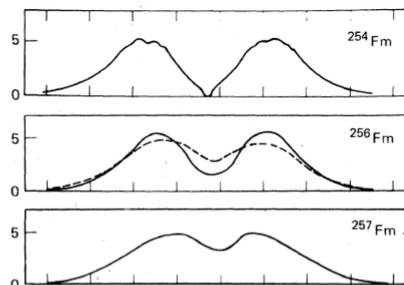
JAEA - ORNL



0.5 $\mu$ g,  $^{254}\text{Es}$  ( $T_{1/2}=276$  day)



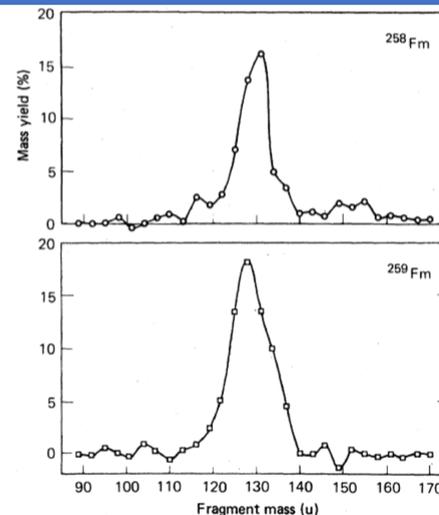
質量非対称分裂



Fm-255

Fm-256

Fm-257



Fm-258

Fm-259

質量対称分裂

Md-258は境界線近傍に位置する核種

# 研究背景



## Es-254を用いた世界初の実験



## Md-258の核分裂データの取得

### 核分裂データ

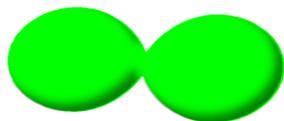
- 核分裂収率（核分裂片の質量分布）
- 核分裂片の全運動エネルギー（TKE）

## 核分裂特性の解析

# マルチモード核分裂

## • 質量対称分裂

Superlongモード  
( $TKE < 220\text{MeV}$ )



変形した核分裂

Supershortモード  
( $TKE > 220\text{MeV}$ )



コンパクトな核分裂

## • 質量非対称分裂

Standardモード ( $TKE < 220\text{MeV}$ )



変形した核分裂

Md-258は...

「Standardモード」と「Super Longモード」が混在

# 原子核の形状およびポテンシャル

## 原子核の形状

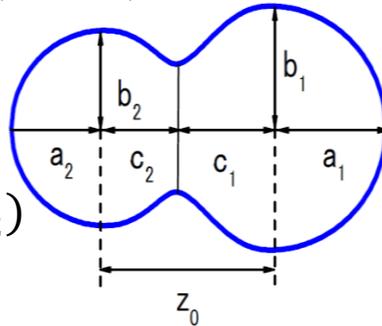
### 二中心間模型

$(z, \delta, \alpha)$

中心間距離 :  $Z = \frac{z_0}{BR}$  ( $B = \frac{3 + \delta}{3 - 2\delta}$ )

変形度 :  $\delta = \frac{3(a - b)}{2a + b}$  ( $\delta_1 = \delta_2$ )

質量非対称度 :  $\alpha = \frac{A_1 - A_2}{A_{CN}}$



R: 複合核の半径

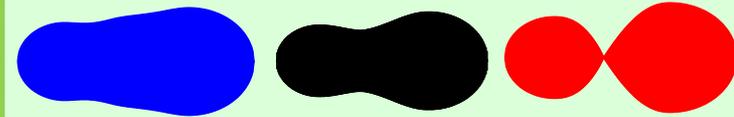
### パラメータ

ネックパラメータ :  $\epsilon$

$\epsilon = 0.0$

$\epsilon = 0.35$

$\epsilon = 1.00$



原子核のくびれに影響

## ポテンシャルエネルギー

### パラメータ

$$V(q, \ell, T) = V_{LDM}(q) + V_{SH}(q, E^*) + \frac{\hbar \ell(\ell + 1)^2}{2I(q)}$$

回転エネルギー

$$V_{LDM}(q) = \frac{E_s(q)}{\text{表面張力}} + \frac{E_c(q)}{\text{クーロン力}}$$

$$V_{SH}(q, E^*) = E_{shell}^0(q) \Phi(E^*)$$

温度依存性

$$\Phi(E^*) = \exp\left\{-\frac{E^*}{E_d}\right\}$$

$E^*$ : 励起エネルギー

$E_d$ : shell damping energy

Shell damping energy :  $E_d$

$E^* = E_d$  の場合

$$V_{SH}(q, E^*) = E_{shell}^0(q) \cdot \frac{1}{e}$$

$E^* \gg E_d$  の場合

$$V_{SH}(q, E^*) \cong 0$$

一般的に...

$E_d = 20 \text{ (MeV)}$

# ランジュバン方程式

$$\frac{dq_i}{dt} = (m^{-1})_{ij} p_j$$

$$\frac{dp_i}{dt} = -\frac{\partial V}{\partial q_i} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial q_i} (m^{-1})_{jk} p_j p_k - \underbrace{\gamma_{ij} (m^{-1})_{jk} p_k}_{\text{摩擦力散逸}} + \underbrace{g_{ij} R_j(t)}_{\text{ランダム力揺動}}$$

$q_i$  : 二中心間模型の変数座標 ( $z, \delta, \alpha$ )

$p_j$  : 運動量

$m_{ij}$  : 慣性質量 (Werner-Wheeler近似による流体力学模型)

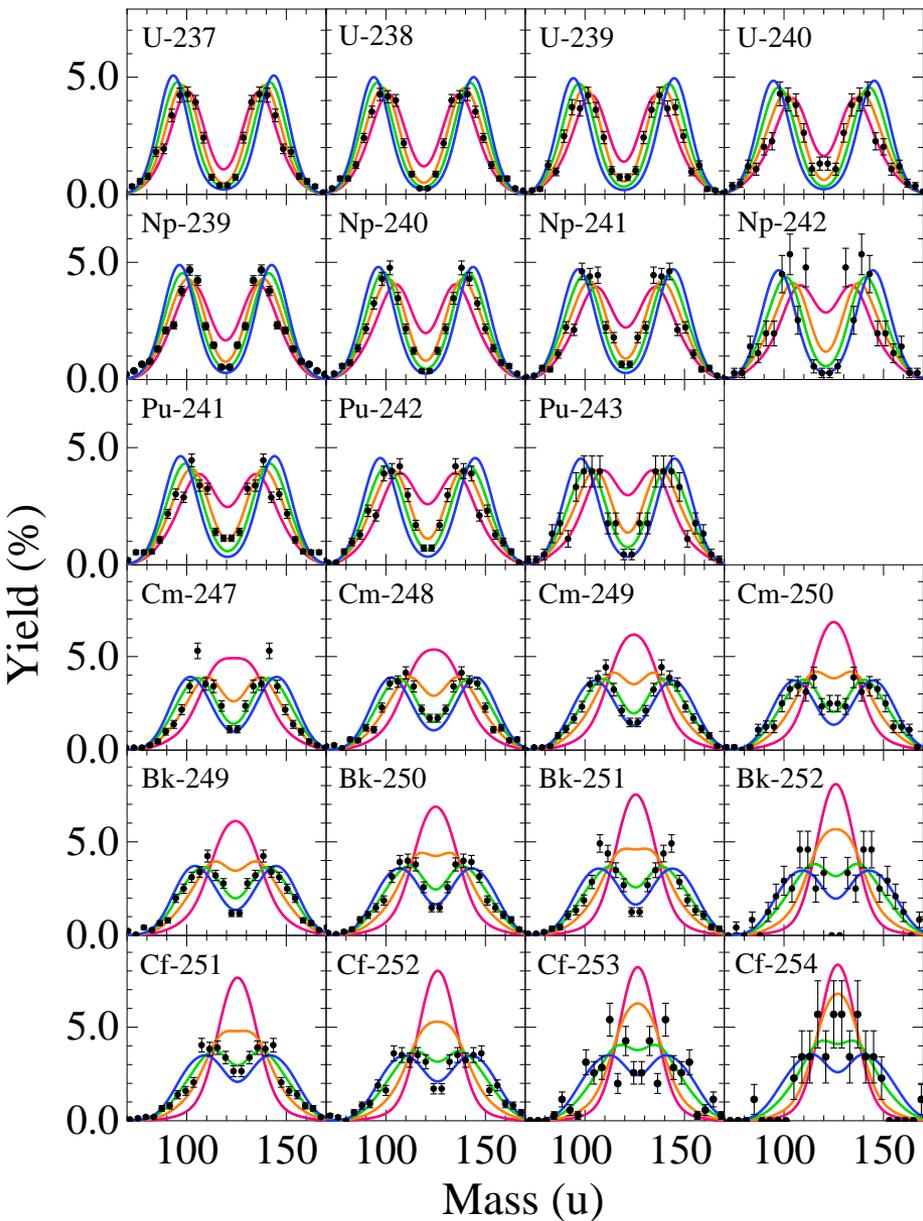
$\gamma_{ij}$  : 摩擦係数 (Wall and Window形式による一体散逸)

$R_i$  : 乱数  $\langle R_i(t) \rangle = 0, \quad \langle R_i(t_1) R_j(t_2) \rangle = 2\delta_{ij} \delta(t_1 - t_2)$  : 白色雑音

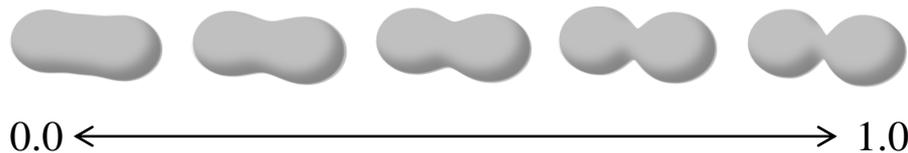
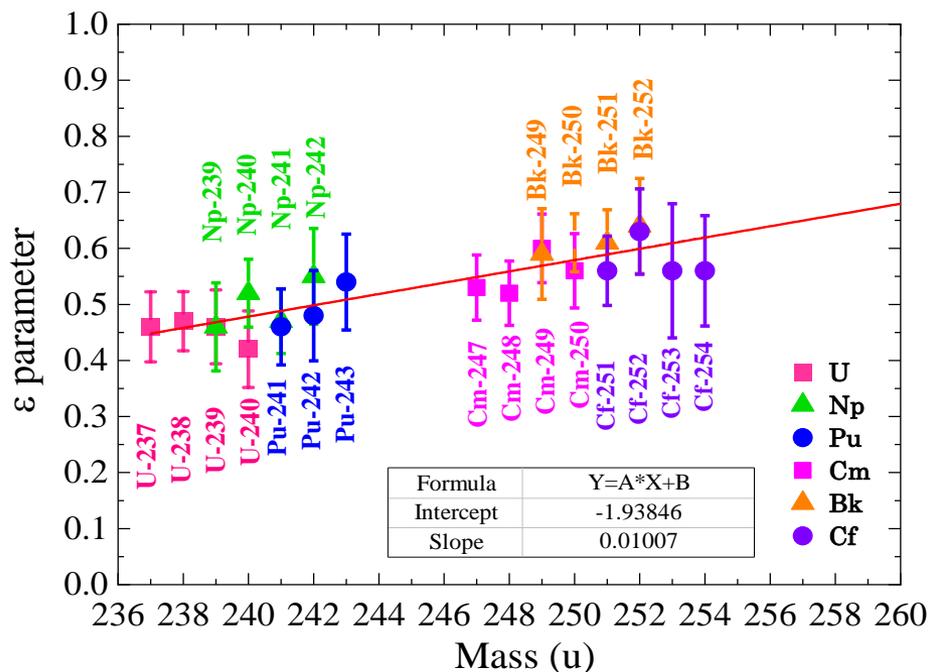
$\sum_k g_{ik} g_{jk} = T \gamma_{ij}$  : アインシュタインの関係式

# Actinide領域における核分裂片質量収率とネックパラメータの相関 Ex = 10-20MeV

• Exp. —  $\varepsilon = 0.35$  —  $\varepsilon = 0.45$  —  $\varepsilon = 0.55$  —  $\varepsilon = 0.65$



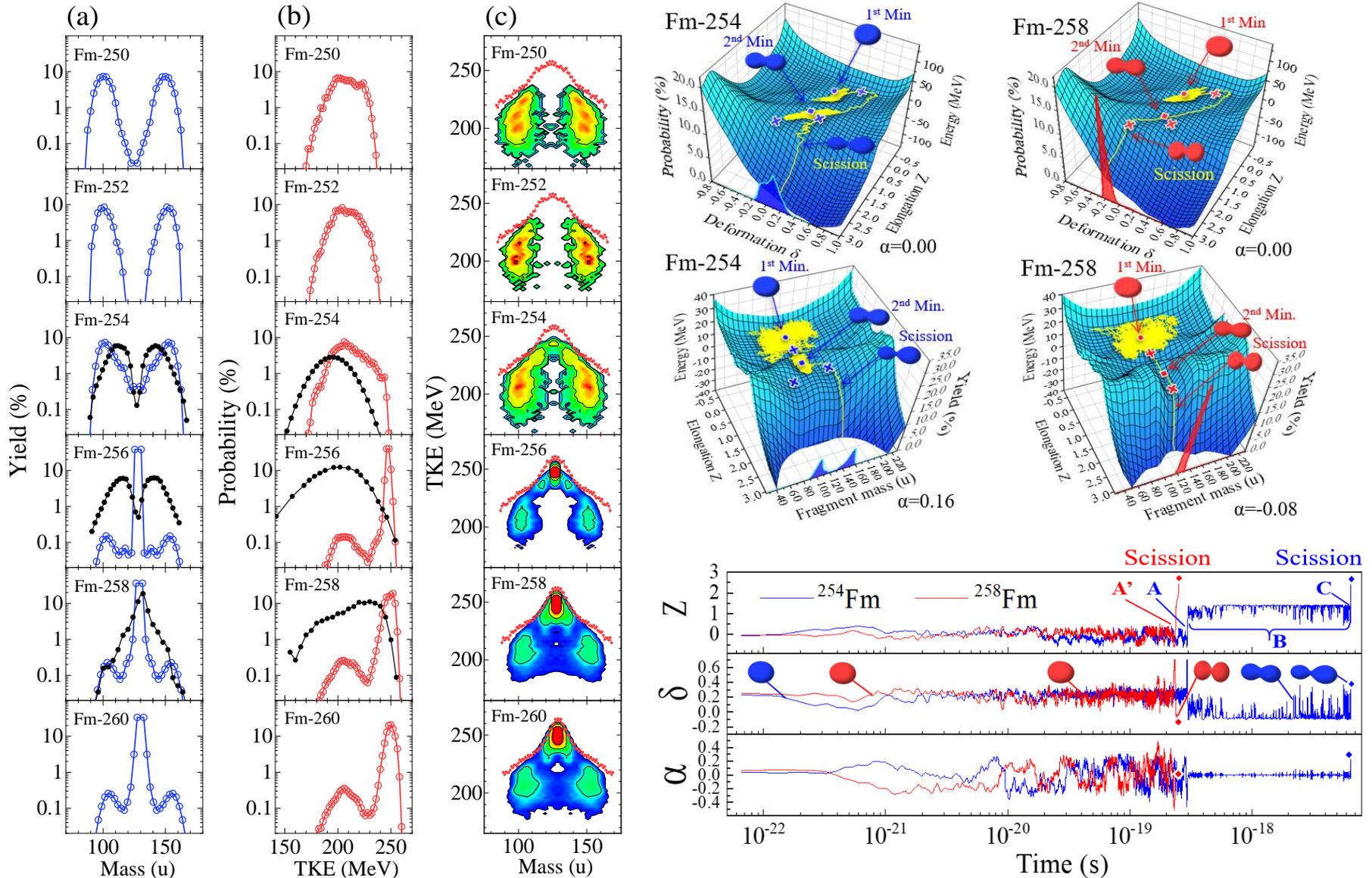
$$\chi^2 = \frac{\sum_1^N \left( \frac{Y_{ex} - Y_{cal}}{\sigma_{ex}} \right)^2}{N} \quad \chi^2 = C\varepsilon^2 + B\varepsilon + A$$



$\varepsilon$  neck parameter

近畿大学 宮本さんの計算

# フェルミウム領域における核分裂モードの劇的な変化の理論解析 Ex = 7.0 MeV



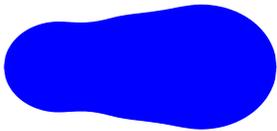
# 計算条件 (Md-258)

## ① ネットパラメータ: $\varepsilon = 0.66$

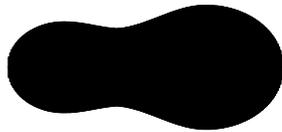
$\varepsilon$ と質量数Aの経験式

$$\varepsilon = 0.01007A - 1.93846$$

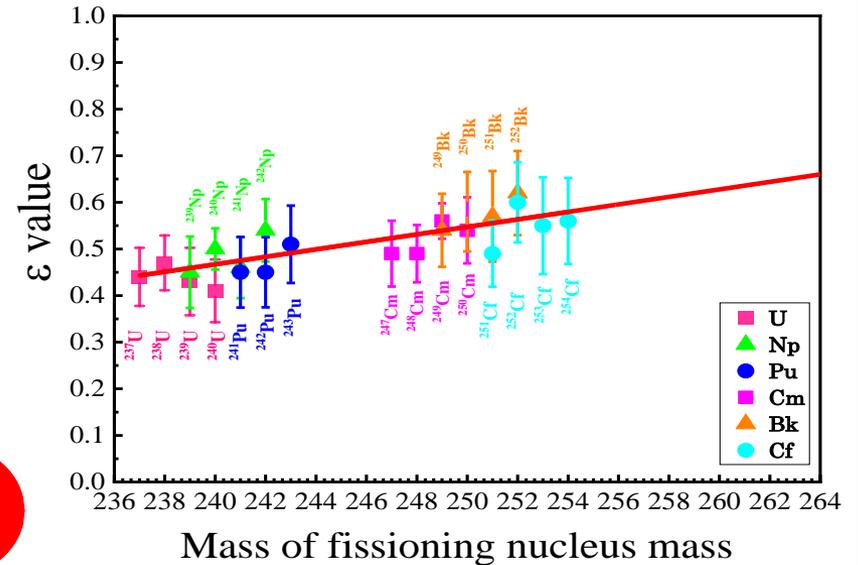
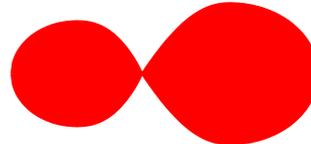
$\varepsilon = 0.0$



$\varepsilon = 0.35$



$\varepsilon = 1.00$



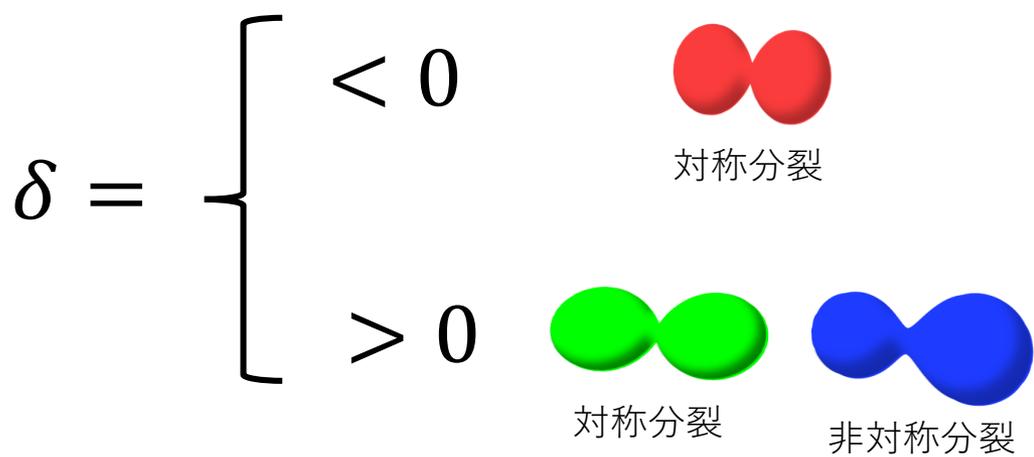
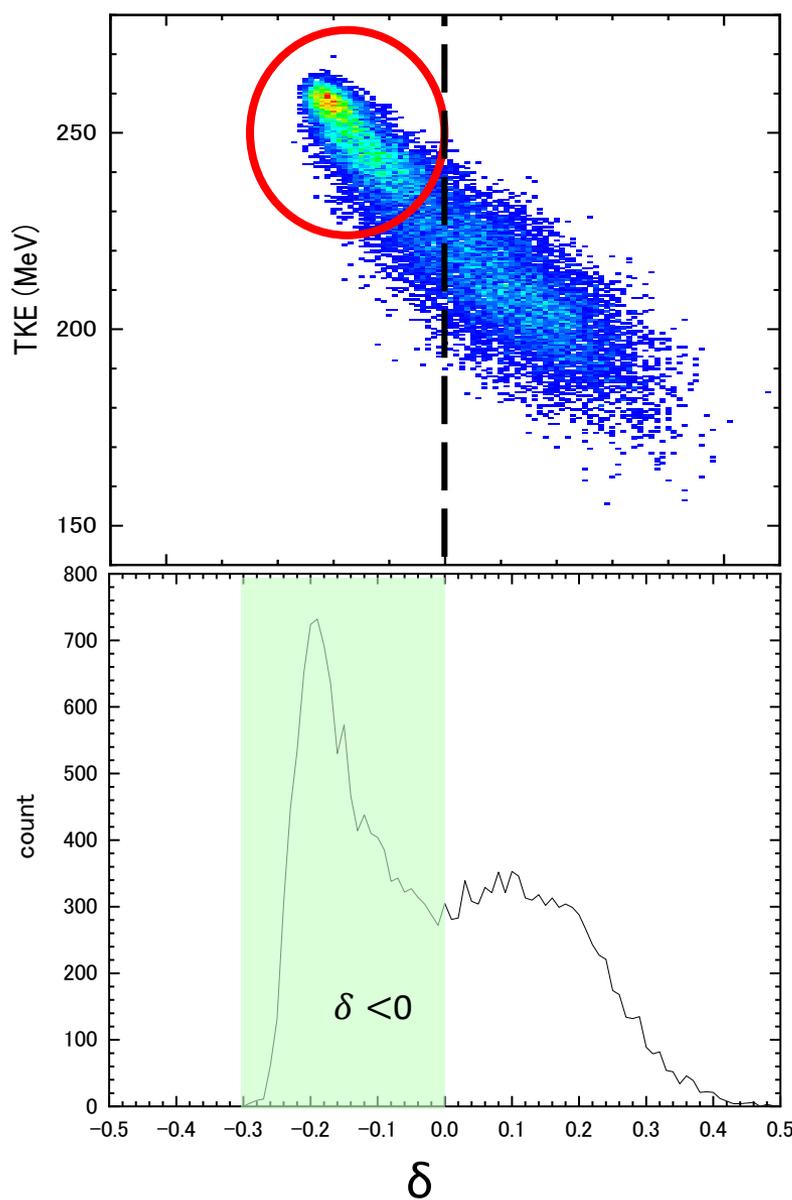
## ② Shell damping energy: $E_d = 20\text{MeV}$

殻補正エネルギーの温度依存性

$$\Phi(E^*) = \exp\left\{-\frac{E^*}{E_d}\right\}$$

$$E^* = 15\text{MeV} \quad (\text{実験の条件より})$$

# $\delta$ (変形度) 分布および $\delta$ -TKE分布



計算結果より...

- $\delta$  (変形度) が負  $\rightarrow$  コンパクトな核分裂
- 高い運動エネルギー (TKE)
- 質量対称分裂



**supershort** が支配的...

# まとめと今後の課題

## <まとめ>

- $\epsilon$ と質量数の相関を導入しMd-258の核分裂計算を行なった
- 運動エネルギー分布に関して、実験結果とは異なる傾向が得られた。

実験結果にはあまり現れていなかったsupershortモード  
(コンパクトな対称分裂)が支配的であった

## <今後の課題>

- 実験結果が示す傾向を再現
- 核分裂モードごとの変形経路の解析

# 実験結果が示す傾向の再現

- 計算で使用した $\varepsilon = 0.66, E_d = 20\text{MeV}$ が適切かどうか

$\varepsilon$ と質量数の相関を用いた場合、Fm同位体における非対称分裂→対称分裂への遷移は確認されたが、Fm-257→Fm-258での遷移は再現できていない。

# 核分裂までの原子核の変形過程

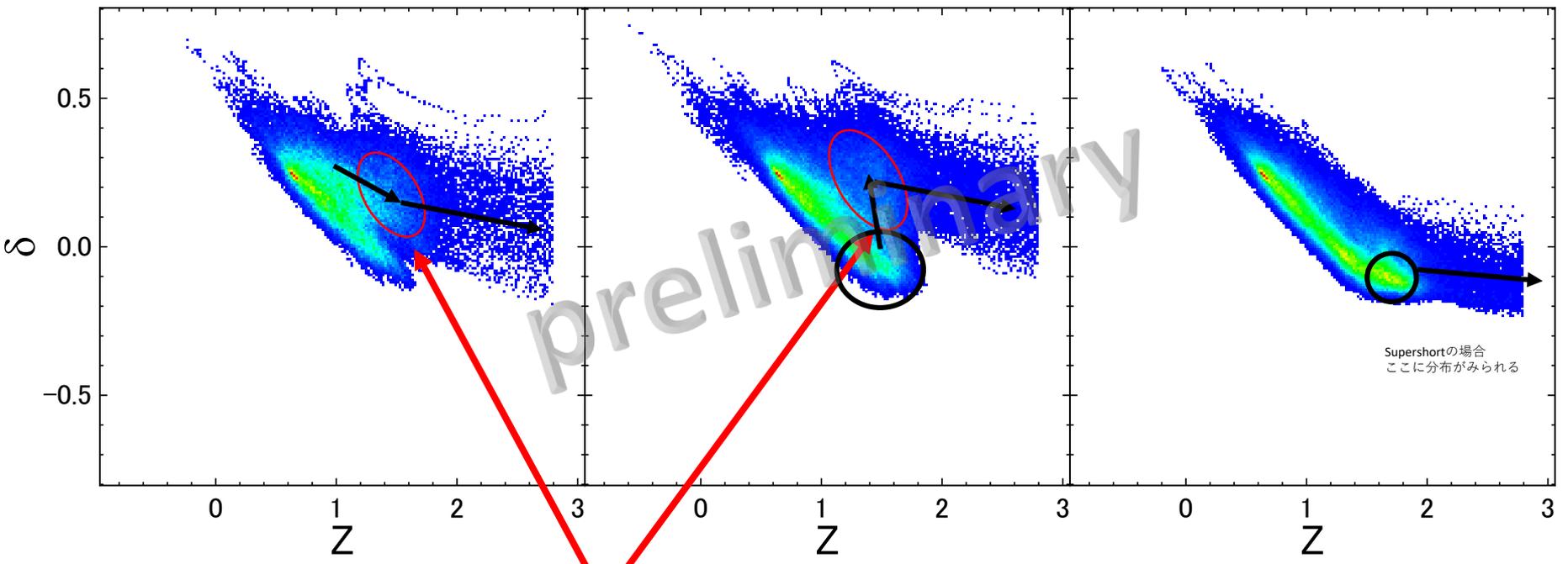
$\epsilon=0.66, E_d=20\text{MeV}, E^*=15\text{MeV}$

## Z- $\delta$ 軌道分布 (例)

standard

superlong

supershort



軌道の抜け方が異なるのか？

それぞれの核分裂モードによって  
どのような変形過程をたどるのか？

ご清聴ありがとうございました