

# 核分裂の静的・動力学的性質および 大域的核種領域における研究

先端基礎研究センター 重原子核反応フロンティア研究グループ  
小浦寛之

理論メンバー: 千葉敏(グループリーダー)  
宇都野穰  
有友嘉浩

N. Bohr and J.A. Wheeler (1939)

G. Flerov and K. Petrjzak

Leningrad 1940

22 years later .

Potential energy (in MeV)

Liquid Drop Model

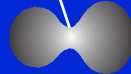
$^{92}\text{U}$

$^{98}\text{Cf}$

$10^{16}$  years

Deformation

$Z=108$



Microscopic Theory

Models:

Macro-microscopic  
Hartree-Fock-Bogolubov  
Relativistic-mean-field

Potential energy (in MeV)

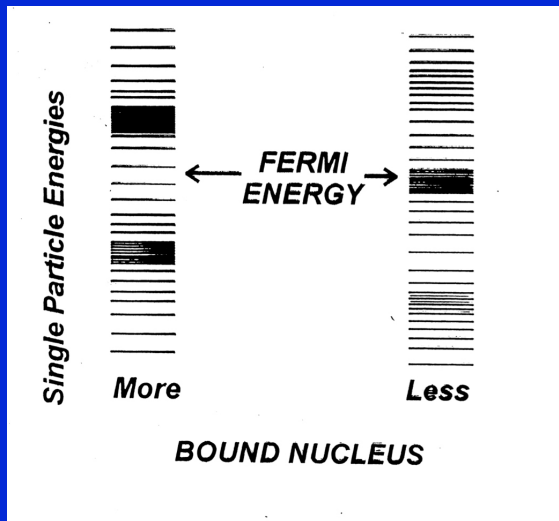
$^{92}\text{U}$

$0.3 \cdot 10^{-6}$  s.

$10^{16}$  years

Deformation

$Z=108$

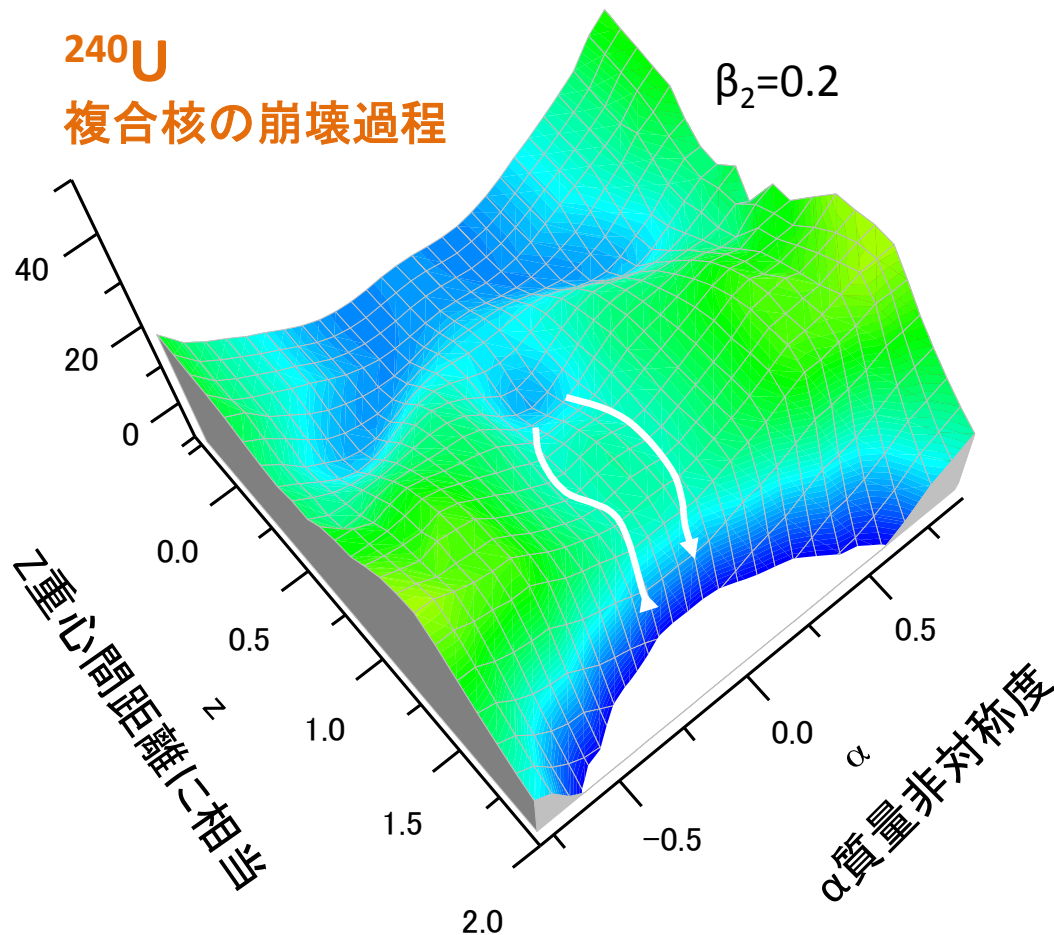


# 核分裂の理論的アプローチ

1. 核分裂の動的性質: ポテンシャルエネルギー面上の(古典的)動力学
  - 分裂片質量分布、即発中性子放出率、TKE
2. 核分裂の系統的性質: 核図表上での障壁
  - 核分裂障壁のlandscape、r過程元素合成、存在領域
3. 核構造的アプローチ: スピン・軌道力の陽子数・中性子数依存性
  - スピン・軌道力の陽子数・中性子数依存性
  - $\Lambda$ ハイパー核の核分裂

# 1.核分裂の動的性質

## 計算方法の概観



核分裂過程における  
原子核形状の時間発展を追う

必要なもの

1. ポテンシャルエネルギー面
2. 軌道 → 方程式で記述

# 原子核の形状

2中心変形パラメータ  $(z, \delta, \alpha)$

(Maruhn and Greiner,  
Z. Phys. 251(1972) 431)

$$q(z, \delta, \alpha)$$

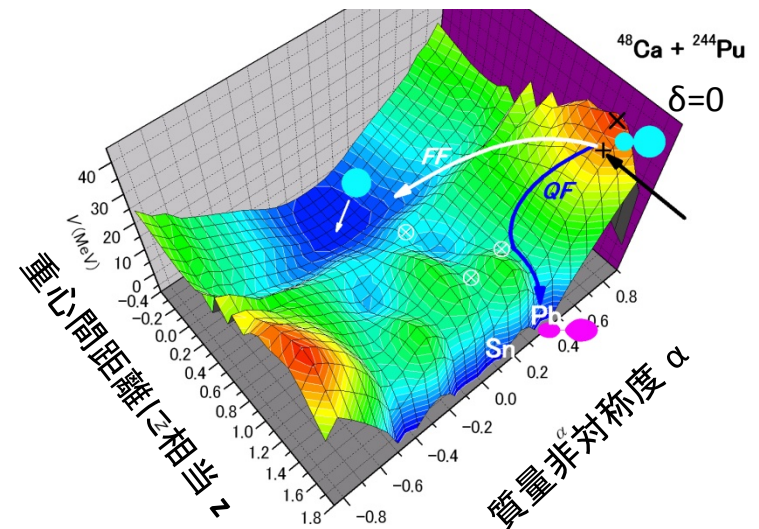
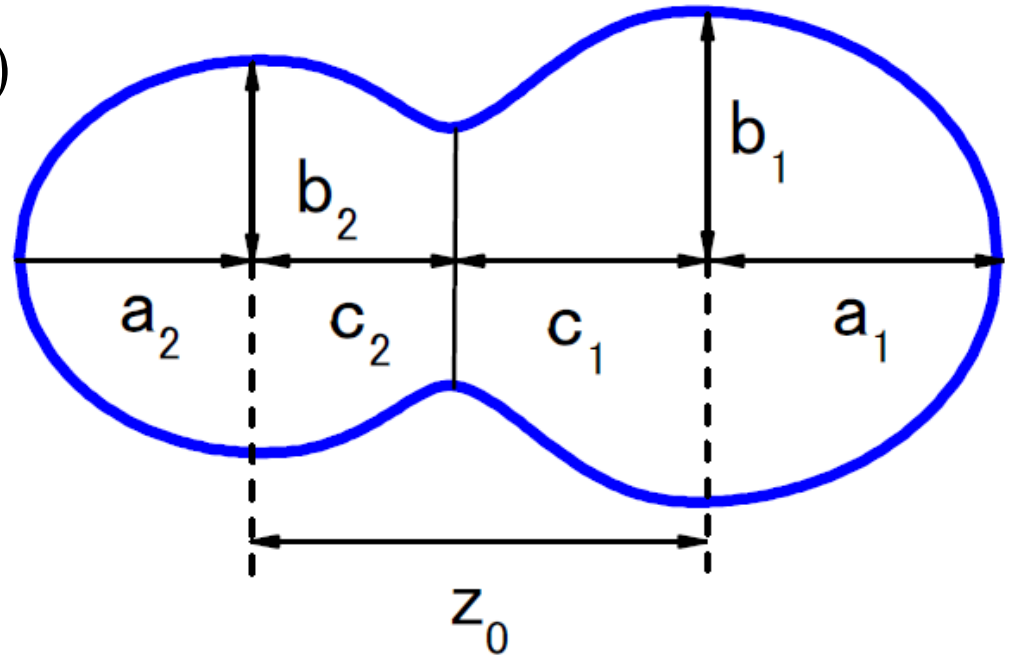
$$z = \frac{z_0}{BR}$$

$$B = \frac{3 + \delta}{3 - 2\delta}$$

$R$ : 球形複合核の半径

$$\delta = \frac{3(a - b)}{2a + b} \quad (\delta_1 = \delta_2) : 2 \text{ 片の変形度が等しい}$$

$$\alpha = \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2}$$



球形領域に入ってきた  
軌道 = 融合軌道

3パラメータ変形空間

# 多次元ランジュバン方程式 軌道の時間発展を記述

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

ニュートン方程式

常微分方程式

$\langle R_i(t) \rangle = 0$ ,  $\langle R_i(t_1) R_j(t_2) \rangle = 2\delta_{ij} \delta(t_1 - t_2)$ : white noise (Markovian process)

$$\sum_k g_{ik} g_{jk} = T \gamma_{ij}$$

Einstein relation

揺動-散逸定理

$q_i$ : 変形座標

2中心模型変形パラメータ  $(z, \delta, \alpha)$

(原子核の形状)

(Maruhn and Greiner, Z. Phys. 251(1972) 431)

$p_i$ : 運動量

$m_{ij}$ : Hydrodynamical mass

(慣性質量)

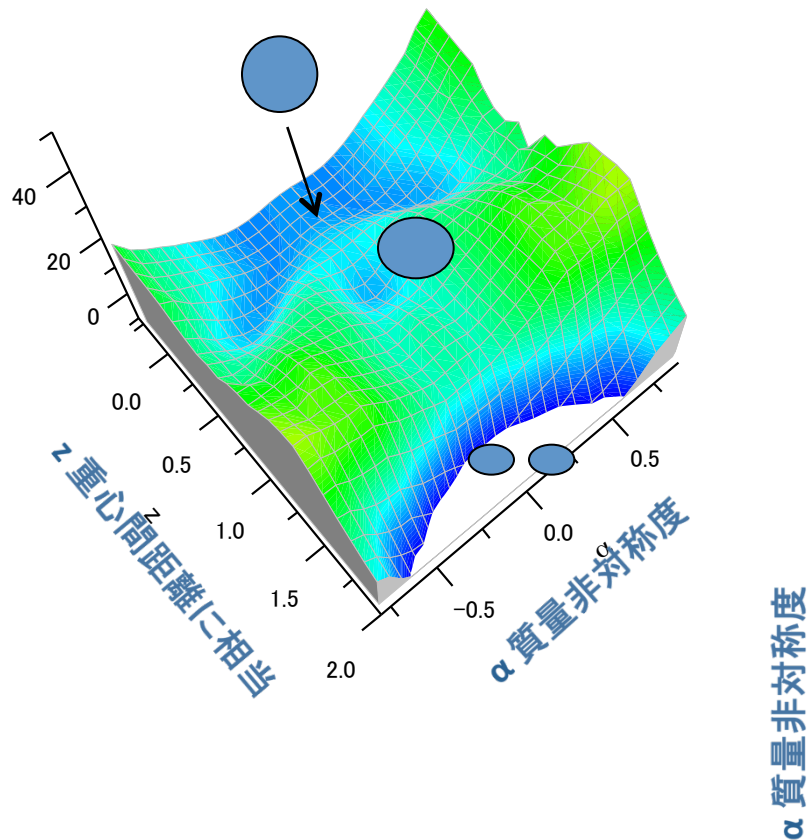
$\gamma_{ij}$ : Wall and Window (one-body) dissipation

(摩擦)

$$E_{\text{int}} = E^* - \frac{1}{2} (m^{-1})_{ij} p_i p_j - V(q)$$

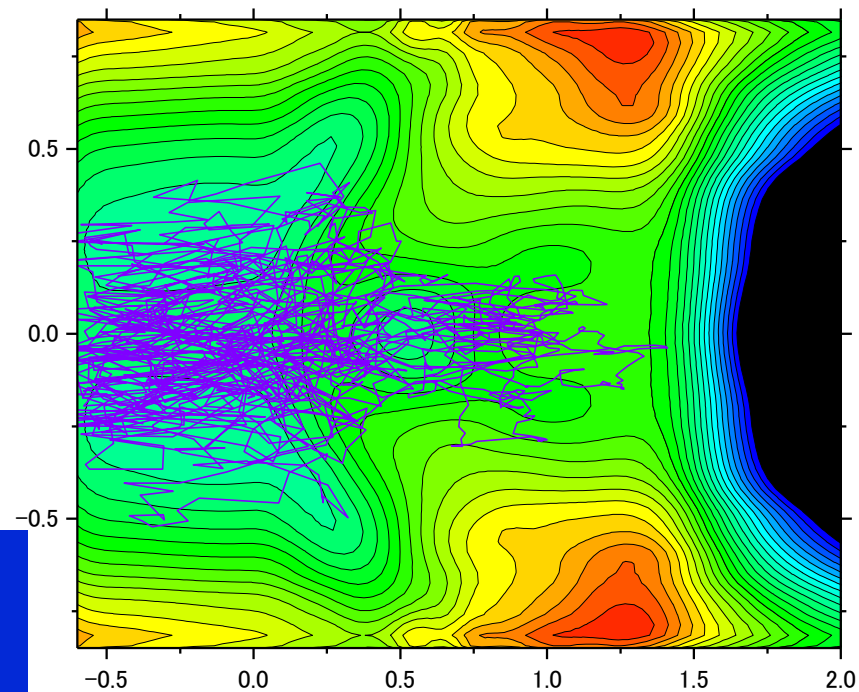
$E_{\text{int}}$ : intrinsic energy,  $E^*$ : excitation energy

# テスト計算 生成核の崩壊過程 $^{240}\text{U}$ $E^* = 20 \text{ MeV}$



計算時間: 京大の  
大型計算機で1時間  
(1万トラジェクトリ)

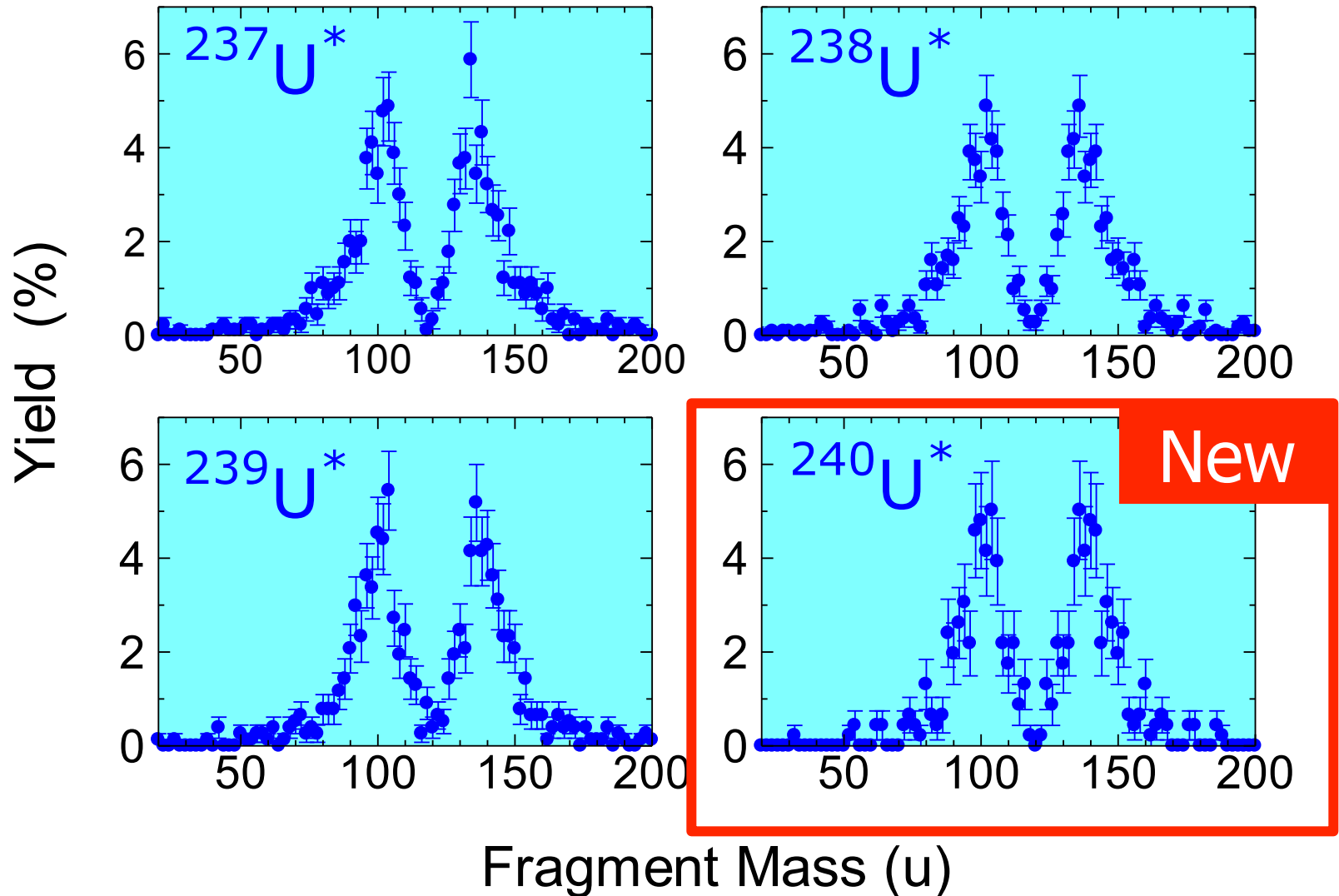
$\delta=0.0$ のPES



3次元ランジュバン方程式を用いた計算  
殻補正エネルギーを導入  
低エネルギーの核分裂

Konan Gr. FLNR theory Gr. → JAEA Gr.  
(他の研究機関では行われていない)

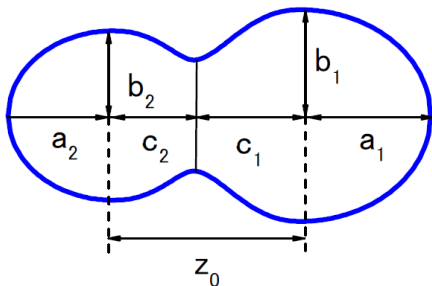
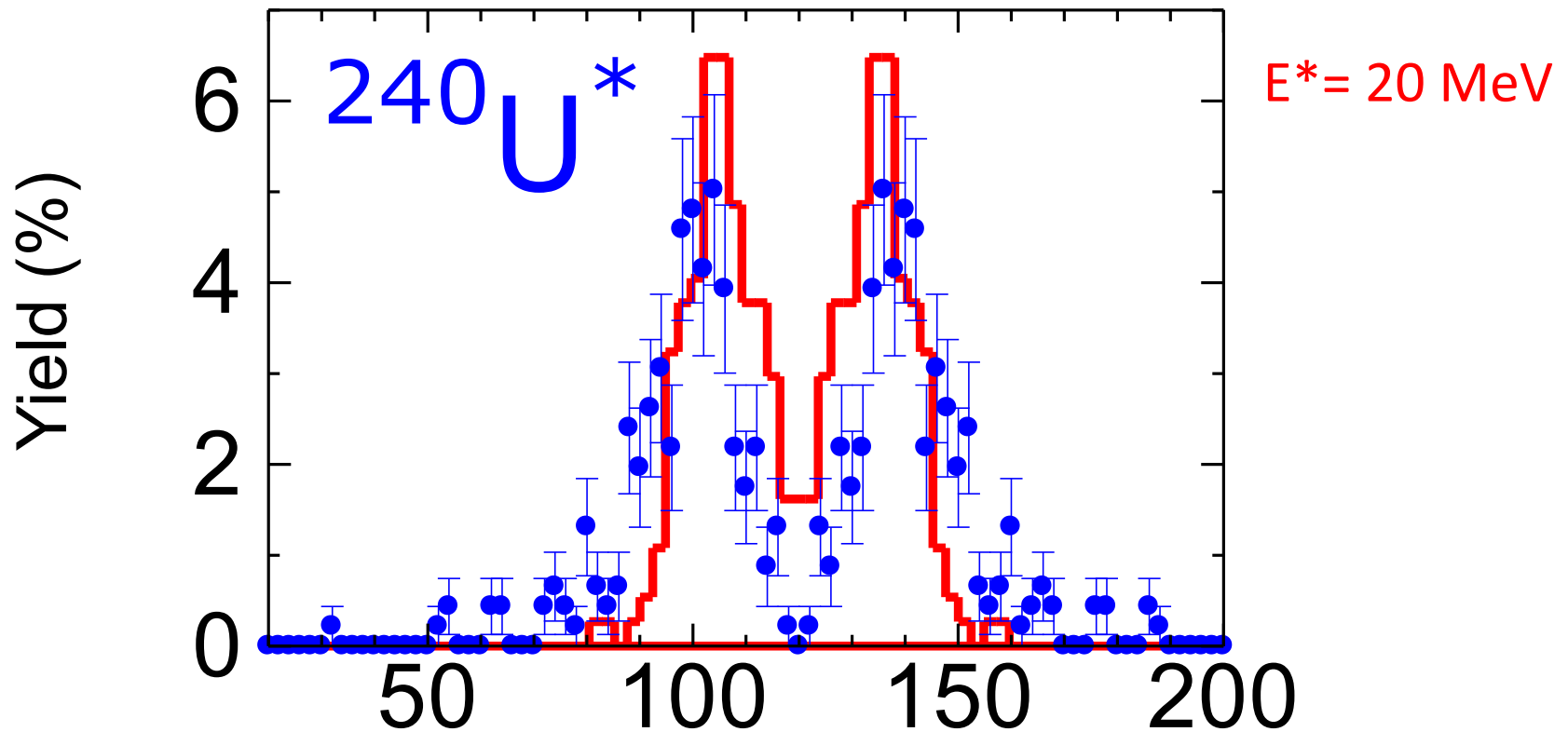
# 核分裂片質量数分布 : $E^* < 20 \text{ MeV}$ 西尾 et al.



$^{238}\text{U} + ^{18}\text{O}$ で代理(多核子移行)反応を用い、様々な核種の核分裂片質量分布を得た。



# 実験との比較（揺動散逸理論＋2中心殻模型）

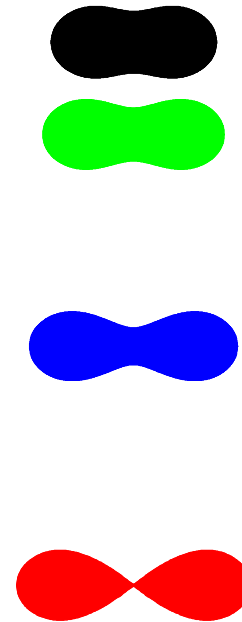
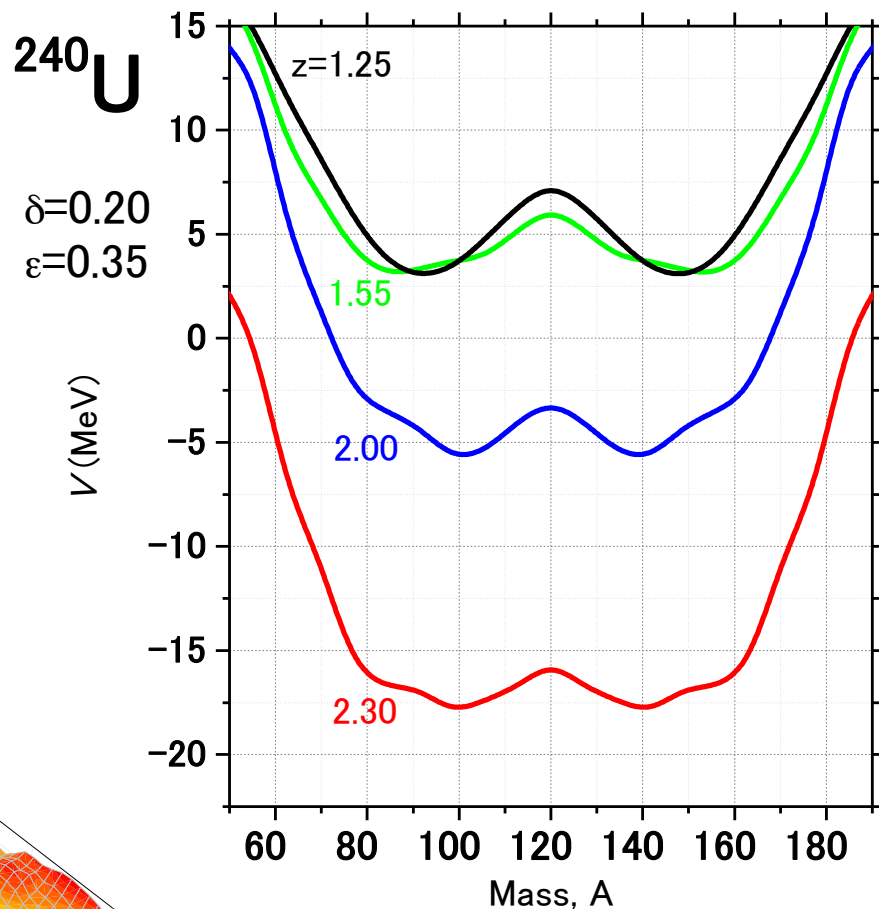


Fragment Mass (u)

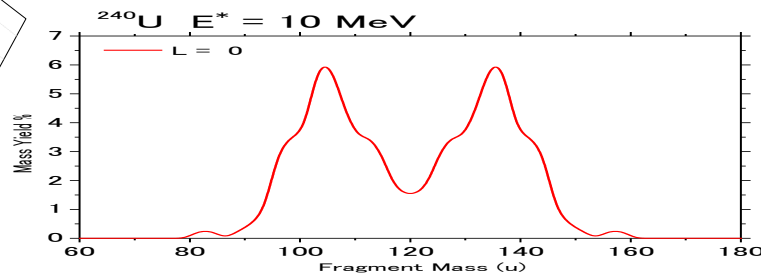
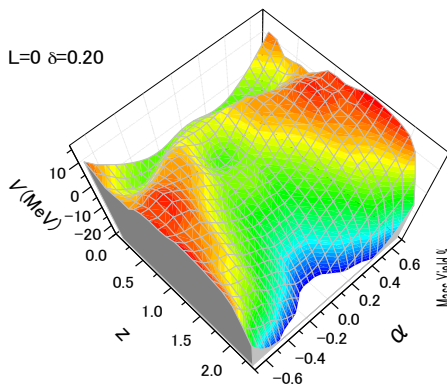
- 実験値：西尾 et.al.  
(原子力機構)
- 計算値

ピーク・幅ともによい一致を見せている (ずれ・幅の狭さはまだ残る)

# ポテンシャルの断面図

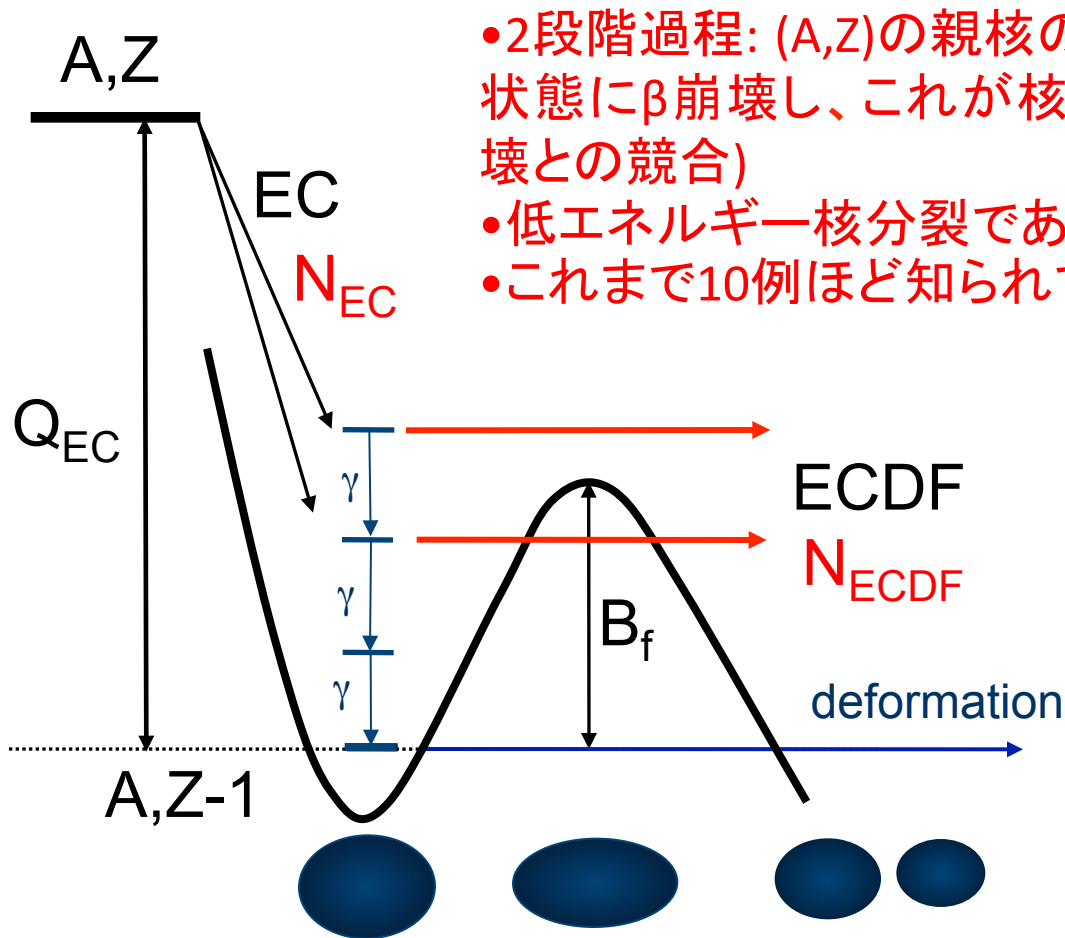


$^{240}\text{U}$ のポテンシャルエネルギー面を各 $z$ で切った断面図



ポテンシャル面の最小点が  
質量分布計算のピークと一致

# 低エネルギーベータ遅延核分裂



- 2段階過程:  $(A, Z)$ の親核の電子捕獲が $(A, Z-1)$ の娘核の励起状態に $\beta$ 崩壊し、これが核分裂を起こす(基底状態への $\gamma$ 崩壊との競合)
- 低エネルギー核分裂である ( $E^* \sim 3-12$  MeV)
- これまで10例ほど知られている (中性子欠損ウラン領域)

## 電子捕獲遅発分岐比

$$P_{ECDF} = \frac{N_{ECDF}}{N_{EC}}$$

$P_{ECDF}$  は以下の量に強く依存:

- 親核の $Q_{EC}$  値:  $Q_{EC}$  が大きいと $P_{ECDF}$  も大きい
- 娘核の $B_{fis}$  値:  $B_{fis}$  が小さいと $P_{ECDF}$  は大きい
- つまり  $Q_{EC} - B_{fis}$  重要

# $^{180}\text{Hg}$ の核分裂

PRL 105, 252502 (2010)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending  
17 DECEMBER 2010



## New Type of Asymmetric Fission in Proton-Rich Nuclei

A. N. Andreyev,<sup>1,2</sup> J. Elseviers,<sup>1</sup> M. Huyse,<sup>1</sup> P. Van Duppen,<sup>1</sup> S. Antalic,<sup>3</sup> A. Barzakh,<sup>4</sup> N. Bree,<sup>1</sup> T. E. Cocolios,<sup>1</sup> V. F. Comas,<sup>5</sup> J. Diriken,<sup>1</sup> D. Fedorov,<sup>4</sup> V. Fedosseev,<sup>6</sup> S. Franchoo,<sup>7</sup> J. A. Heredia,<sup>5</sup> O. Ivanov,<sup>1</sup> U. Köster,<sup>8</sup> B. A. Marsh,<sup>6</sup> K. Nishio,<sup>9</sup> R. D. Page,<sup>10</sup> N. Patronis,<sup>1,11</sup> M. Seliverstov,<sup>1,4</sup> I. Tsekhanovich,<sup>12,17</sup> P. Van den Bergh,<sup>1</sup> J. Van De Walle,<sup>6</sup> M. Venhart,<sup>1,3</sup> S. Vermote,<sup>13</sup> M. Veselsky,<sup>14</sup> C. Wagemans,<sup>13</sup> T. Ichikawa,<sup>15</sup> A. Iwamoto,<sup>9</sup> P. Möller,<sup>16</sup> and A. J. Sierk<sup>16</sup>

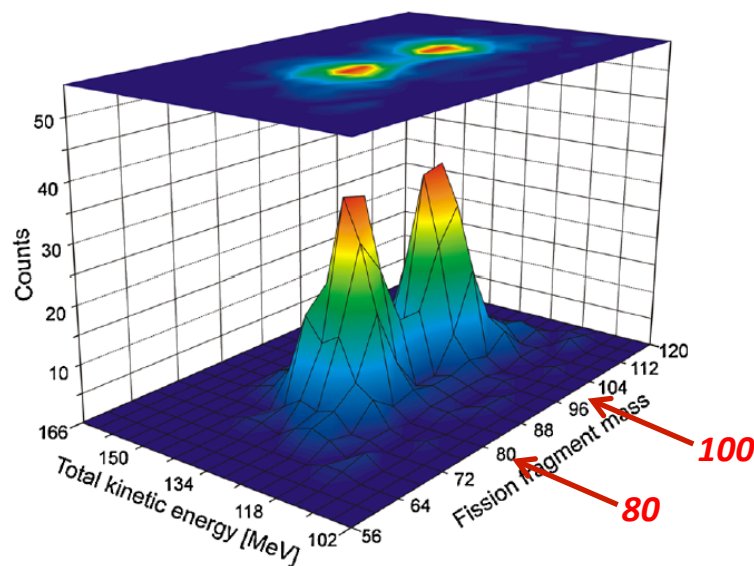
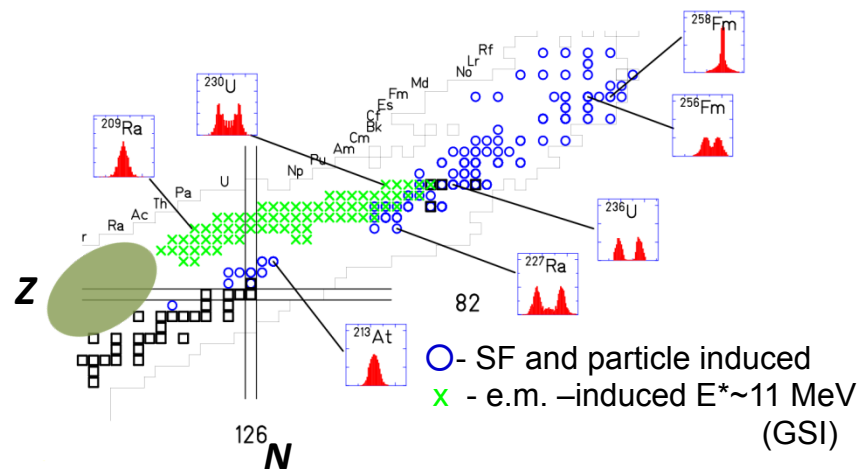
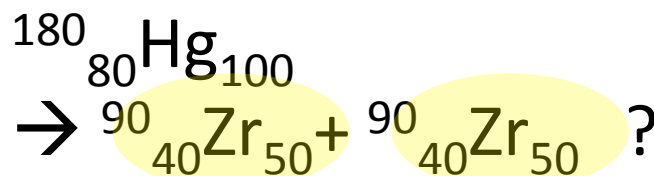


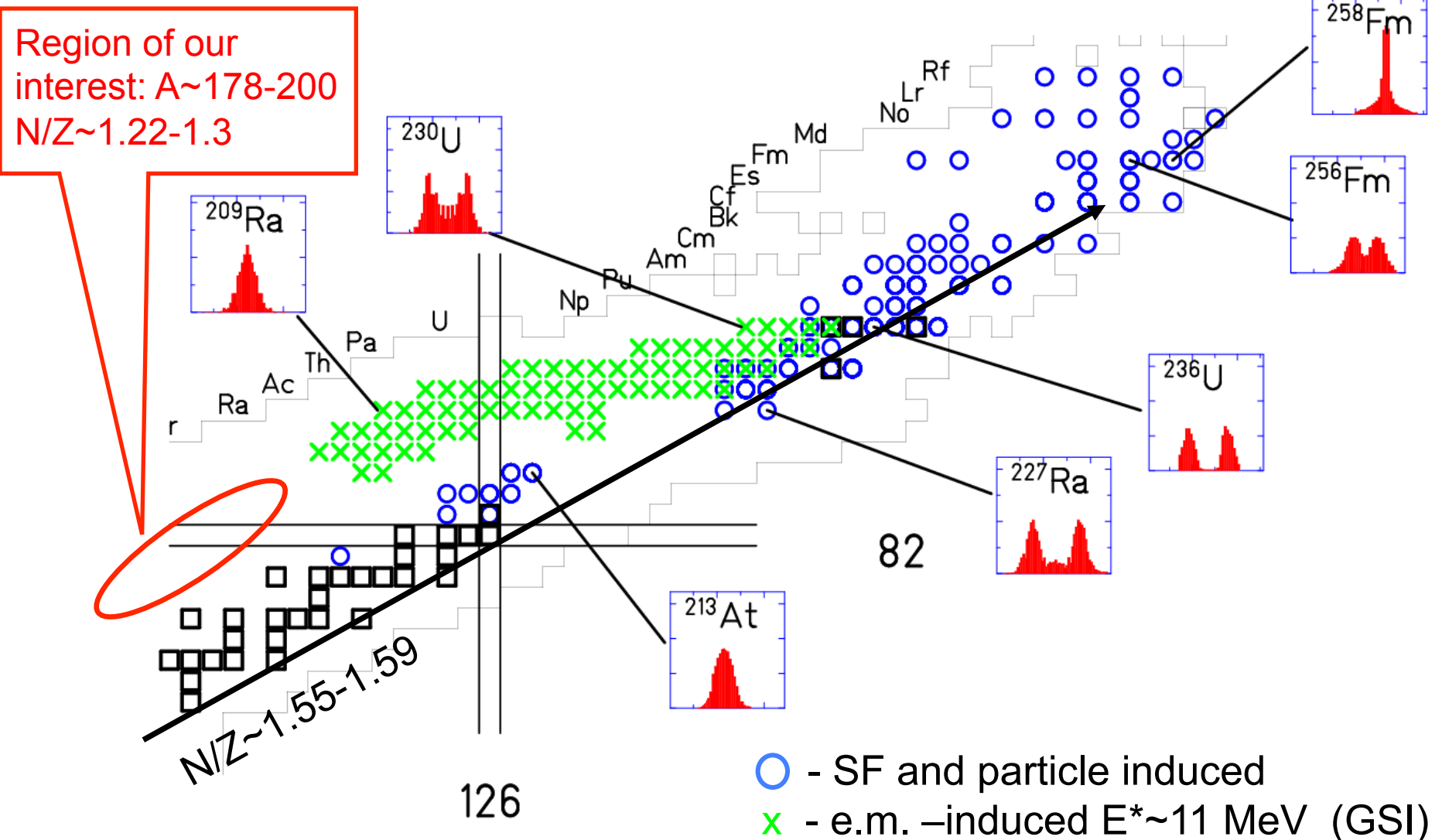
FIG. 4 (color online). The derived fission-fragment distribution of  $^{180}\text{Hg}$  as a function of the fragment mass and the total kinetic energy.

(電子捕獲を利用した)低エネルギー核分裂で  
非対称核分裂を起こした

Tl  
EC-delayed fission

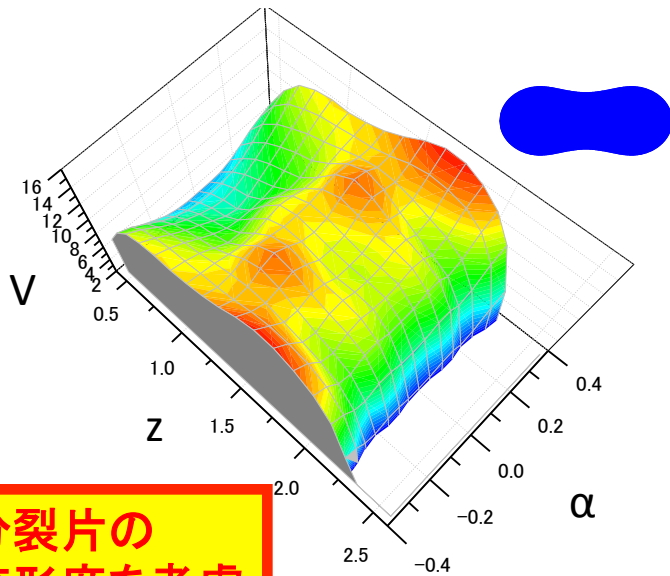


# 低エネルギー核分裂の実験からの情報

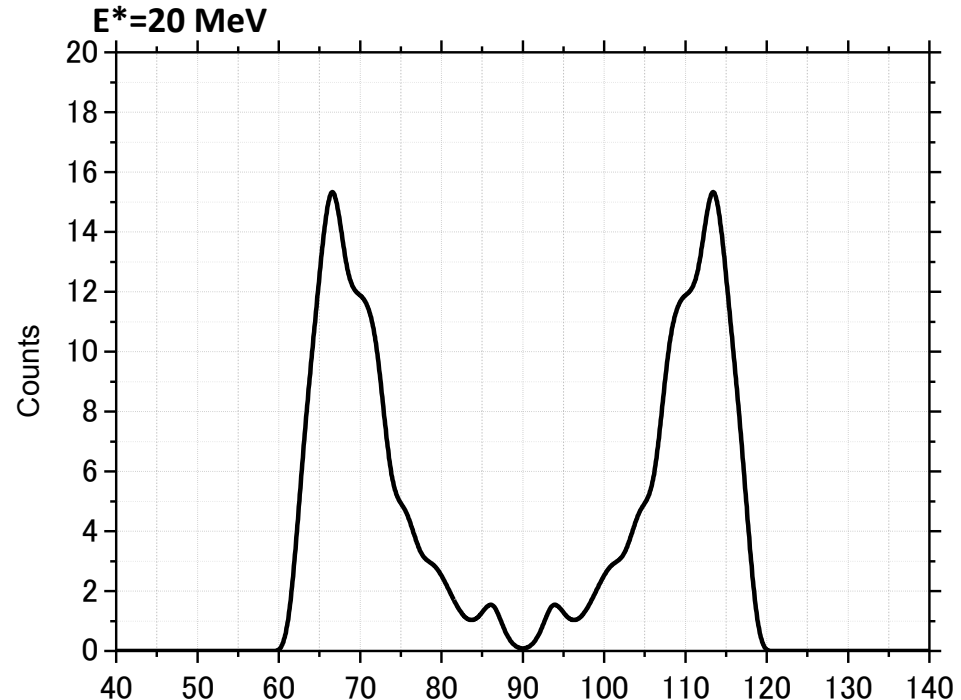


# $^{180}\text{Hg}$ の核分裂片の質量分布 理論計算の結果

$^{180}\text{Hg}$   $\varepsilon=0.35$   $\delta=0.22$



分裂片の  
変形度を考慮



↑ Mass ↑  
実験値のピーク

100:80  $\alpha=0.11$   
110:70  $\alpha=0.22$

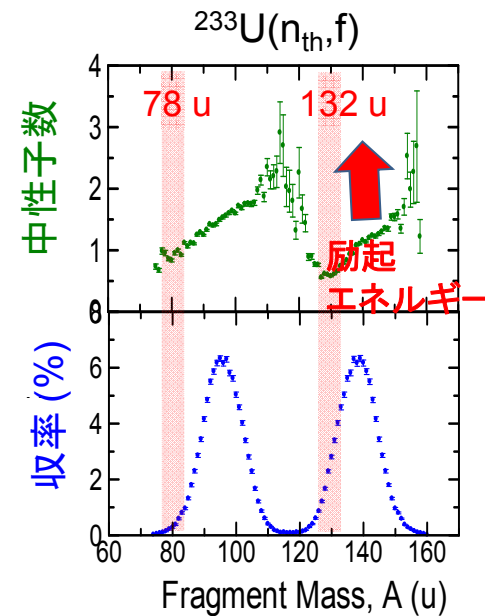
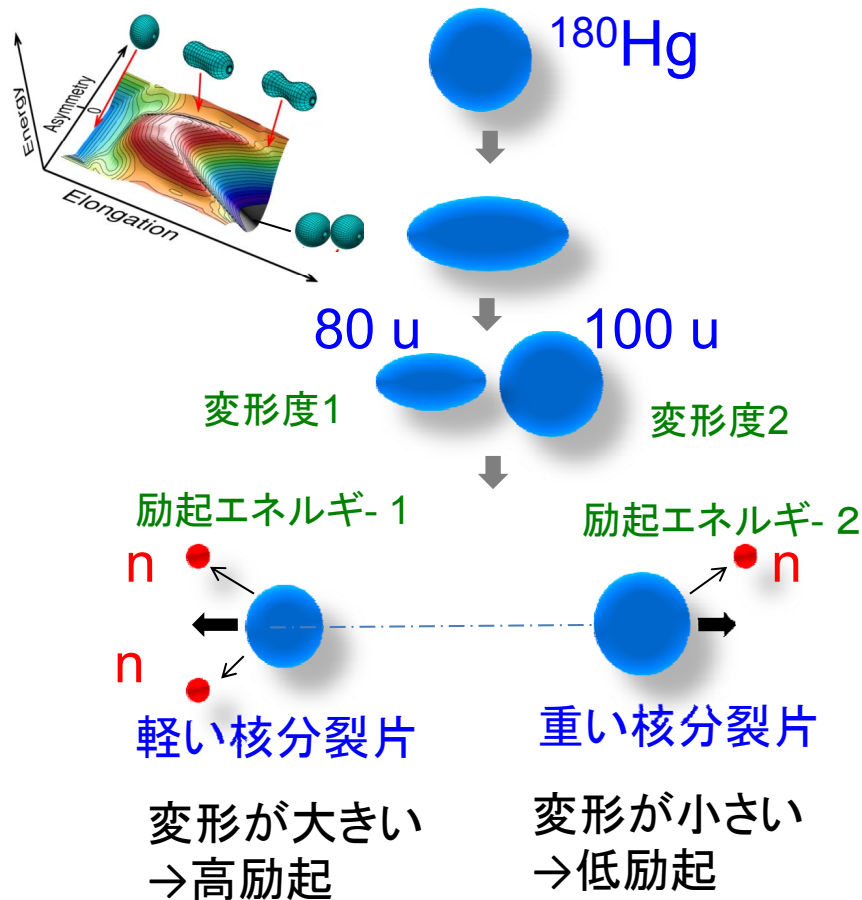
改良すべき点 - ポテンシャルの計算

1. 原子核の形状を現すパラメーター  
左右のフラグメントの変形度を独立に  
扱うパラメータを変数として導入
2. 微視的模型による輸送係数の導入

非対称分裂であることは示すことが出来た。  
ピーク的位置はうまく再現できていない

# 中性子放出多重度と核分裂片の質量分布

核分裂片からの中性子を測定することで、scission での核分裂片の変形度がわかる。→ ポテンシャル構造を反映



実験データ

2量の相関を見るには3次元変形(2分裂片の変形度が等しい)では不十分  
→ 変形空間の4次元化(2分裂片の変形度を別々にする)が必要

# 今後の発展1:変形自由度の多次元化

- 3次元→4次元

- 左右同じ変形→左右異なる変形。質量分布の再現性が良くなると期待できる。
- 中性子多重放出度(まだ理論予測には十分ではない)と質量分布の関係の明確さに期待

$$z = \frac{z_0}{BR}$$

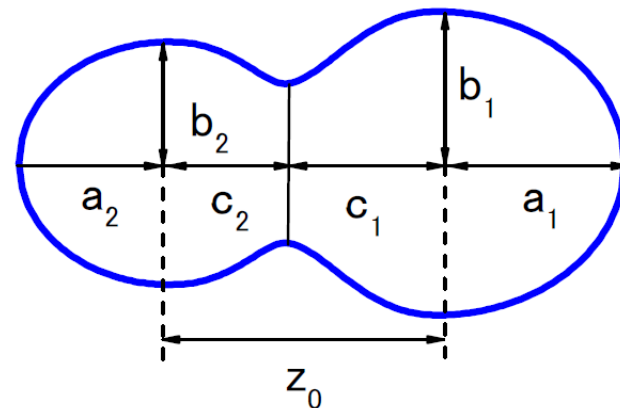
$$B = \frac{B_1 + B_2}{2}$$

$$B_i = \frac{3 + \delta_i}{3 - 2\delta_i}, (i = 1, 2)$$

$R$ : Radius of the spherical compound nucleus

$$\delta_i = \frac{3(a_i - b_i)}{2a_i + b_i}, (i = 1, 2) \quad \leftarrow \text{異なる変形}$$

$$\alpha = \frac{A_1 + A_2}{A_{\text{CN}}}$$

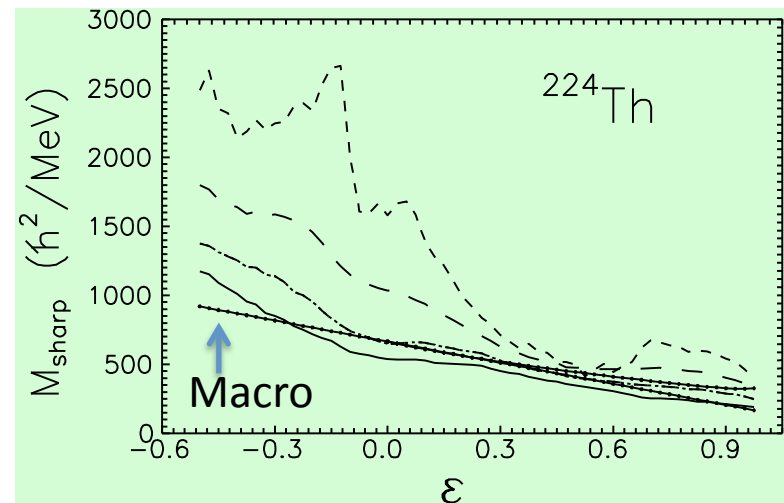
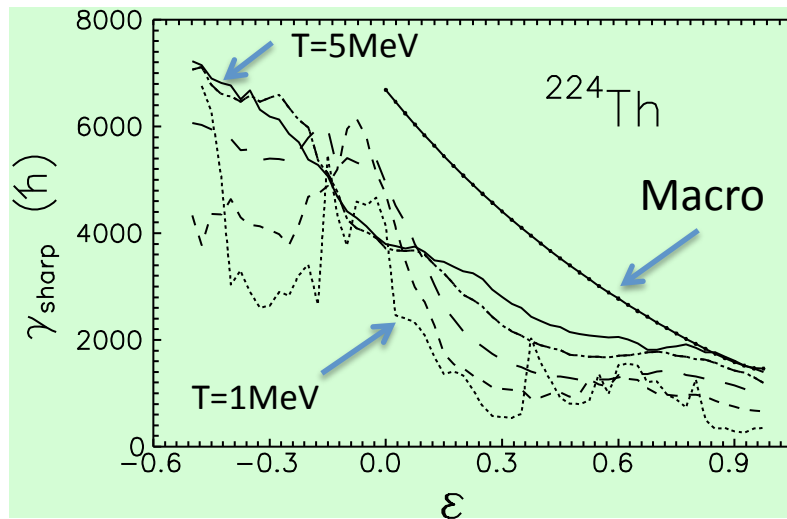


左右の分裂片を異なるパラメータ $\delta_1, \delta_2$ として可変にする



# 今後の発展2: 輸送・摩擦における微視的効果

- 線形応答理論による微視的計算
  - 摩擦・慣性質量に殻構造を反映させる
- 温度依存も反映:
  - 温度 $\rightarrow$ 大  $\Rightarrow$  摩擦 $\rightarrow$ 大
  - 準位密度 $\rightarrow$ 大  $\Rightarrow$  摩擦 $\rightarrow$ 大
- 低エネルギーで重要



F. A. Ivanyuk, H. Hofmann, V. V. Pashkevich and S. Yamaji, Phys. Rev. C 55 (1997) 1730

散逸揺動計算の精密化

## 2.核分裂の系統的性質

- 核図表上での系統的性質を見る
  - 1) 核分裂障壁のLandscape
  - 2) 対称・非対称を決める物理
  - 3) 応用:r過程元素合成における核分裂
  - 4) 原子核の存在領域を決める

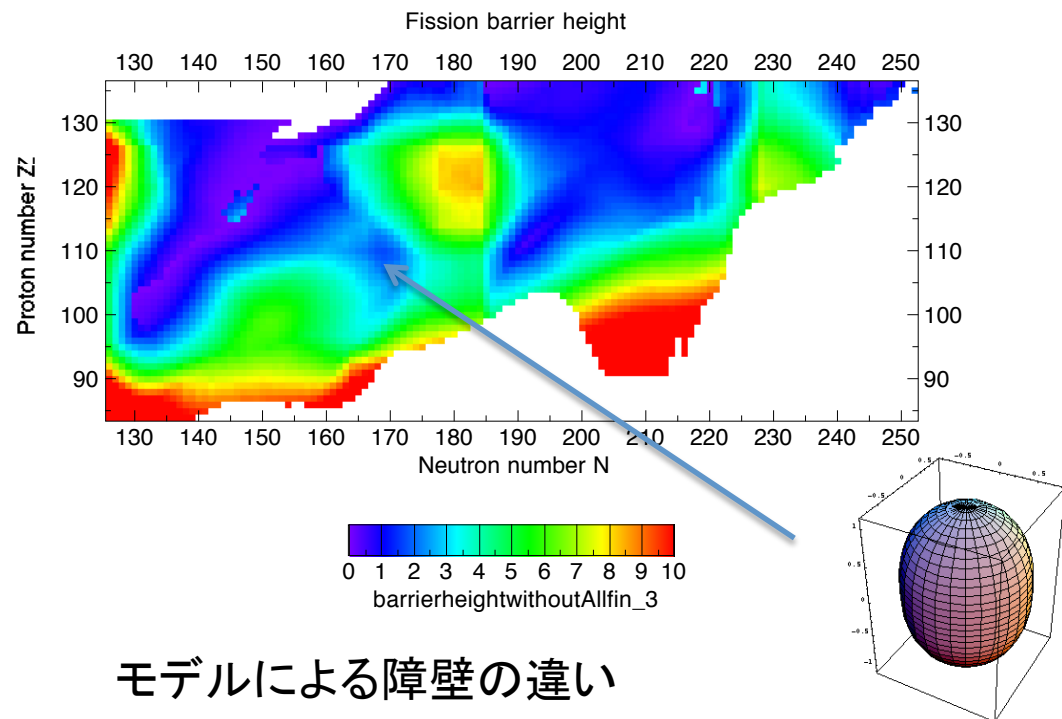
→未知核種への理論予測

手法:主として巨視的+微視的模型を用いる

- ・2中心殻模型
- ・KTUY質量公式の球形基底の方法

# (1)核分裂障壁のLandscape

球形基底法 (KUTY)

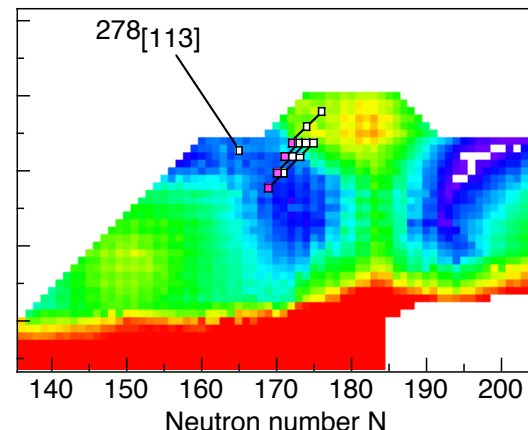


モデルによる障壁の違い

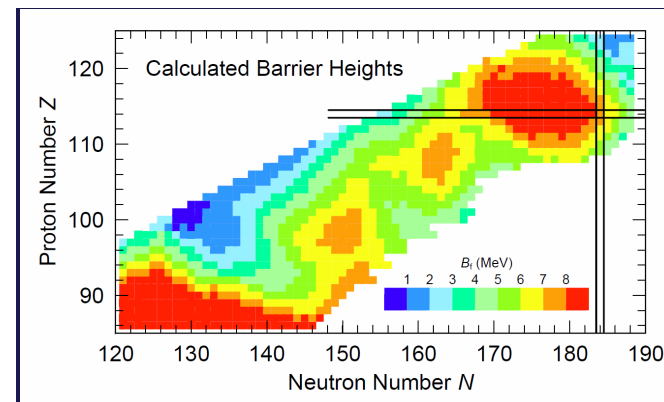
$^{208}\text{Pb}$ コア+バレンスの配位で盆地が生じている(KTUYの描像)

ETFSI ( $\beta_2, \beta_4, \beta_6$  deformation)

Mamdouh, et al NPA679 (2001)



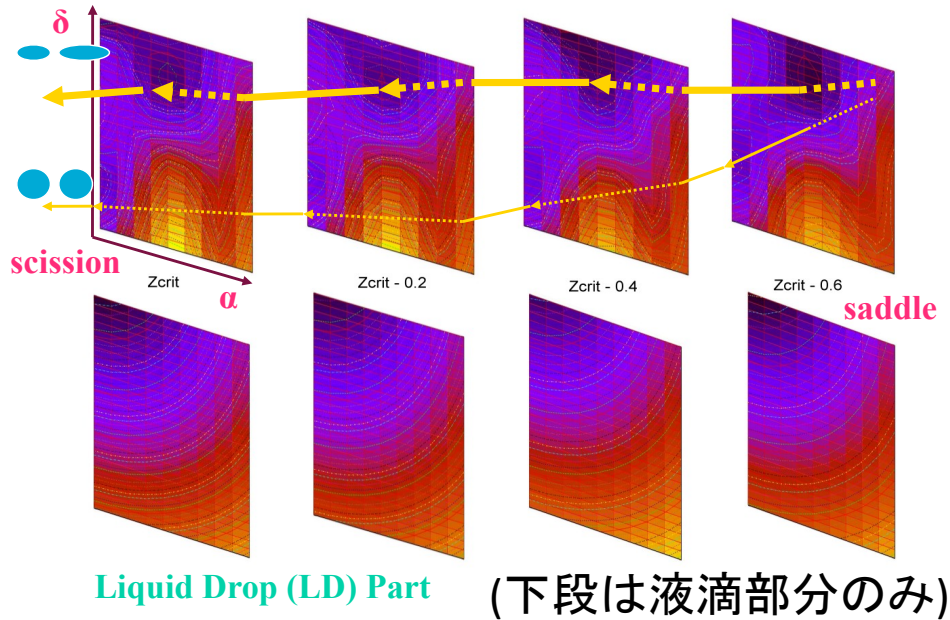
FRLDM



核分裂障壁は  
原子核の合成のしやすさに影響し、原子核の存在領域の範囲を決定する  
超重元素の合成(生き残り確率)、崩壊様式の核分裂優勢確率

# (2)対称・非対称を決める物理

## 3次元変形空間における分裂片の経路



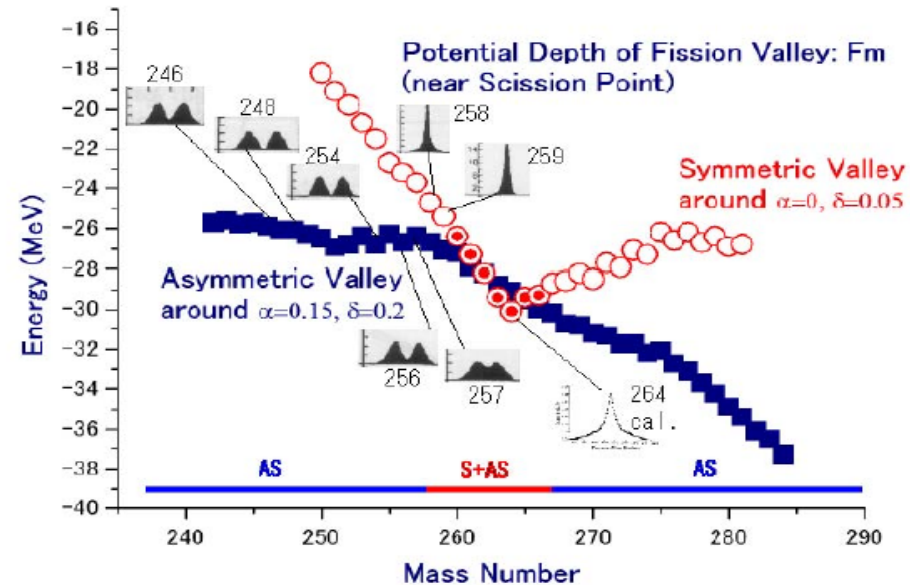
切断点 ← (核分裂への成長) — 鞍点

連続的につながる2つの経路を追った例  
(2中心殻模型。Langevin計算せず)

非対称分裂障壁と対称分裂障壁の競合  
系統的に調べることでその起源を理解する

Fm同位体での対称障壁と非対称障壁の競合  
(2中心殻模型)

## Analysis of PES near Scission Point for Fm isotopes



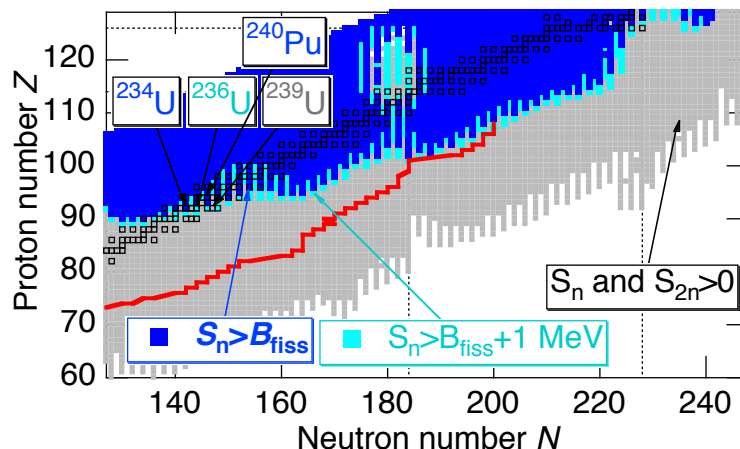
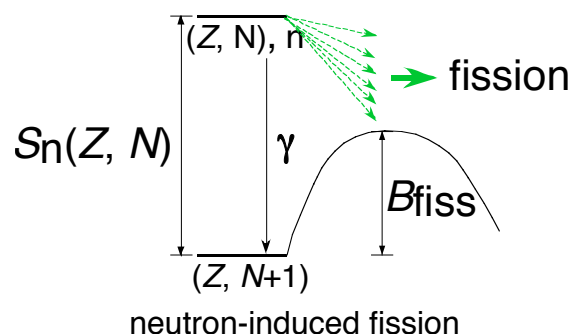
対称・非対称の障壁の交差が生じている  
(更なる解析が必要)

核図表上に存在する対称・非対称核分裂の起源を調べ、その境界を予測する

# (3)r過程元素合成における核分裂

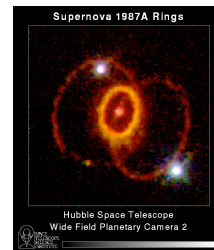
r過程元素合成は未知中性子過剰核を合成しながら、超重核領域で核分裂すると考えられる

## 中性子誘起核分裂



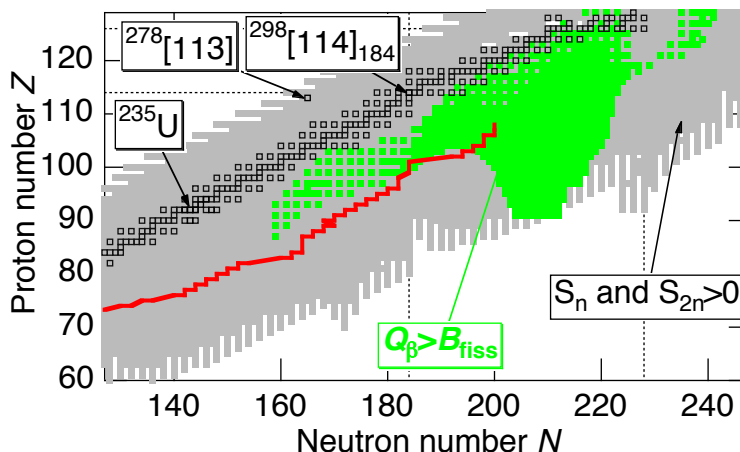
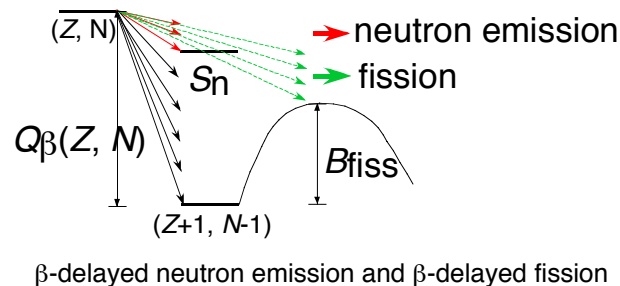
$$S_n > B_{fiss}$$

235, 238U等の  
既知核はよく  
再現



SN1987A

## β崩壊遅延核分裂



$$Q_{\beta} > B_{fiss}$$

図中の緑領域  
は全て未知核

図中赤線:r過程  
経路の一例

中性子誘起核分裂:r過程元素合成における終端領域を与える(上図)。  
β崩壊遅延核分裂:超重核の生成量が核分裂片領域に積み重ねられる。

→ r過程計算への  
影響を調べる

# (4)原子核の存在領域を決める

自発核分裂の短寿命性による線

閉殻構造による原子核  
の存在領域の“半島”

実験グループで  
探索中

$^{220}\text{Pu}$

$^{278}_{113}\text{[113]}_{165}$

$^{208}\text{Pb}$

$^{235}\text{U}$

$^{294}\text{Ds}_{184}$

$^{298}_{114}\text{[114]}_{184}$

$^{132}\text{Sn}$

- $\alpha$ 崩壊優勢
- $\beta$ 崩壊優勢
- 自発核分裂優勢
- 陽子放出優勢
- KTUY公式による  
陽子ドリップ線
- KTUY公式による  
 $\beta$ 安定核
- 既知核種(2000年)

1ナノ秒の寿命  
を持つと予想さ  
れる原子核の  
優勢崩壊様式

小浦等, 日本物理学会誌(2005)

超重・陽子ドリップ線側(色図の右上側)は自発核分裂の短寿命  
の効果で領域が定まる。(上図は対称分裂とした場合の計算)

→

原子核の存在領域計  
算への影響を調べる

# その他：核分裂の形状依存性

- 原子核の核分裂が成長するにつれ変形自由度が大きくなる。その自由度の研究
  - (1)Hyper deformationに代表される分裂直前の準安定状態
  - (2)核分裂の切断面での振る舞いはレイリー不安定性を示す(突然ネックが切断する)ことが予想される。その性質を調べる。
  - (3)クラスター崩壊、3体崩壊



### 3.核構造的アプローチ (新現象の発見をめざす)

- 微視的殻模型的観点からその性質を調べ、核分裂における殻構造の影響に関する研究を行う。
  - LS力は安定核から離れるにつれてその性質(強さ)が有意に変化する可能性が大きい
- $\Lambda$ ハイパー核の核分裂\*  $\rightarrow$   $\Lambda$ 粒子を介して核分裂の性質を知る
  - 分裂片のどちらに偏位するか。一粒子軌道の解析。等

\*F. Minato and S. Chiba, Nucl. Phys. **A 831**, 150-162 (2009), **A 856**, 55-67 (2011).



# まとめ

- 動的性質：
  - 揺動散逸理論を用いた(古典的)動力学計算→質量分布や中性子放出多重度などの精度の高い再現性+予測を目指す。
- 系統的性質：
  - 核図表上の核分裂障壁のLandscapeの理解。対称・非対称質量分布が生じることの解明。r過程元素合成、存在領域への応用。
- 微視的殻模型からの殻構造の理解と核分裂現象への適用