

動力学模型を用いた重核および超重核形成における 質量角度分布の計算

近畿大学大学院 総合理工学研究科

天野翔太, 有友嘉浩



基研研究会 核力に基づいた原子核の構造と反応
京都大学基礎物理学研究所, 7-10, December 2021

目次

1. 背景と目的

2. 理論模型と計算方法

3. 計算結果および考察

^{234}Cm の質量角度分布

A_{CN} に応じた τ_{ε} 変化による質量と角度の相関

4. まとめ

目次

1. 背景と目的

2. 理論模型と計算方法

3. 計算結果および考察

^{234}Cm の質量角度分布

A_{CN} に応じた τ_{ε} 変化による質量と角度の相関

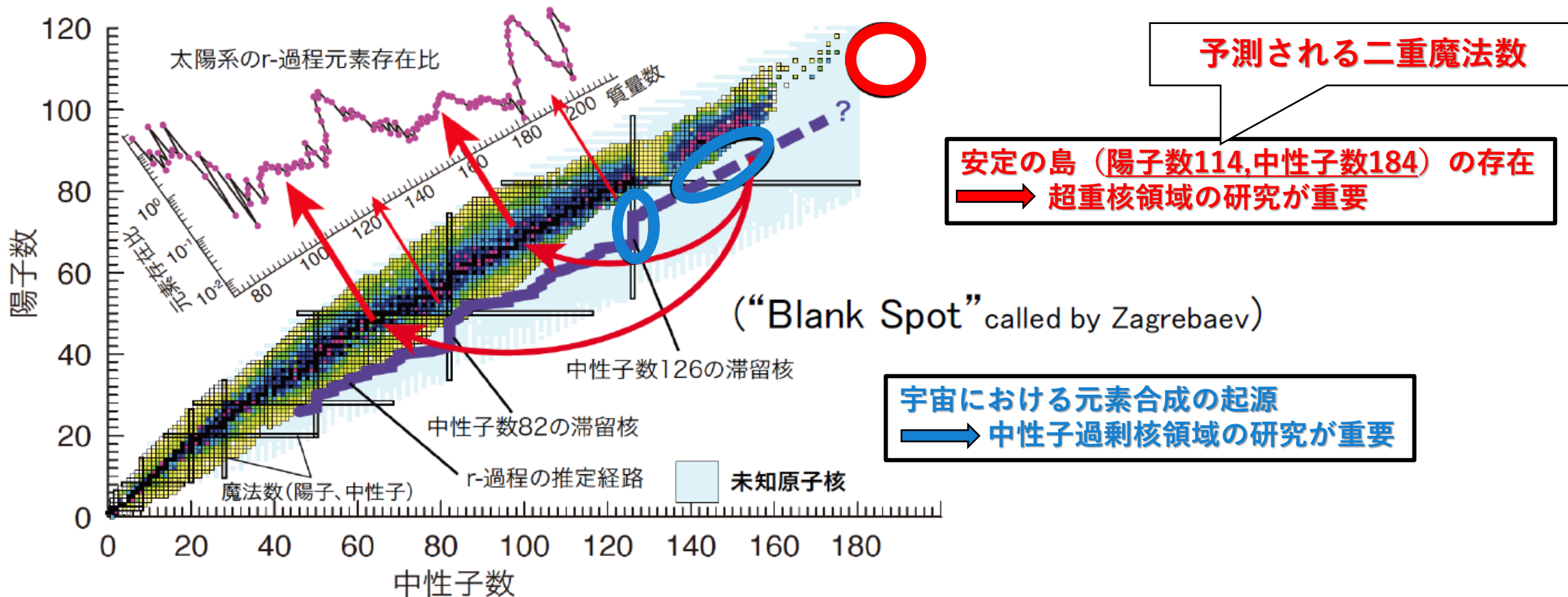
4. まとめ

超重元素と中性子過剰核の重要性

Rapid neutron capture(R-過程)の天体起源を探る -21世紀に持ち越された基礎物理重要課題の一つ-

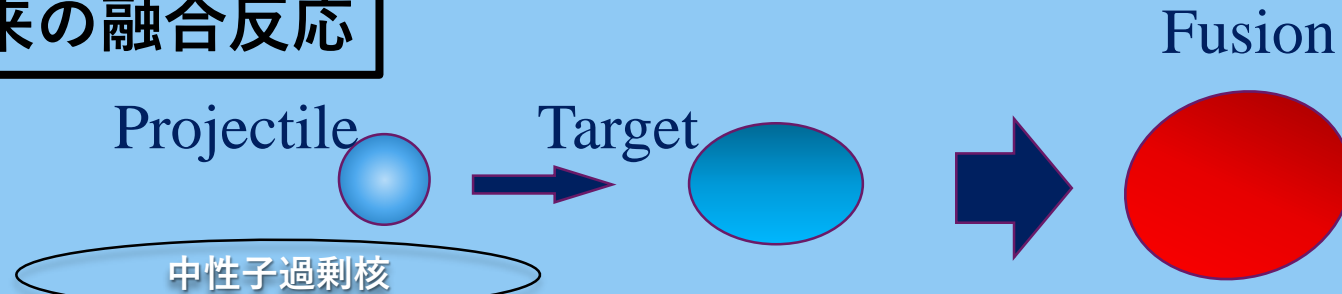


Motivation



新しい生成手法を用いた 超重元素や中性子過剰核の生成

従来の融合反応

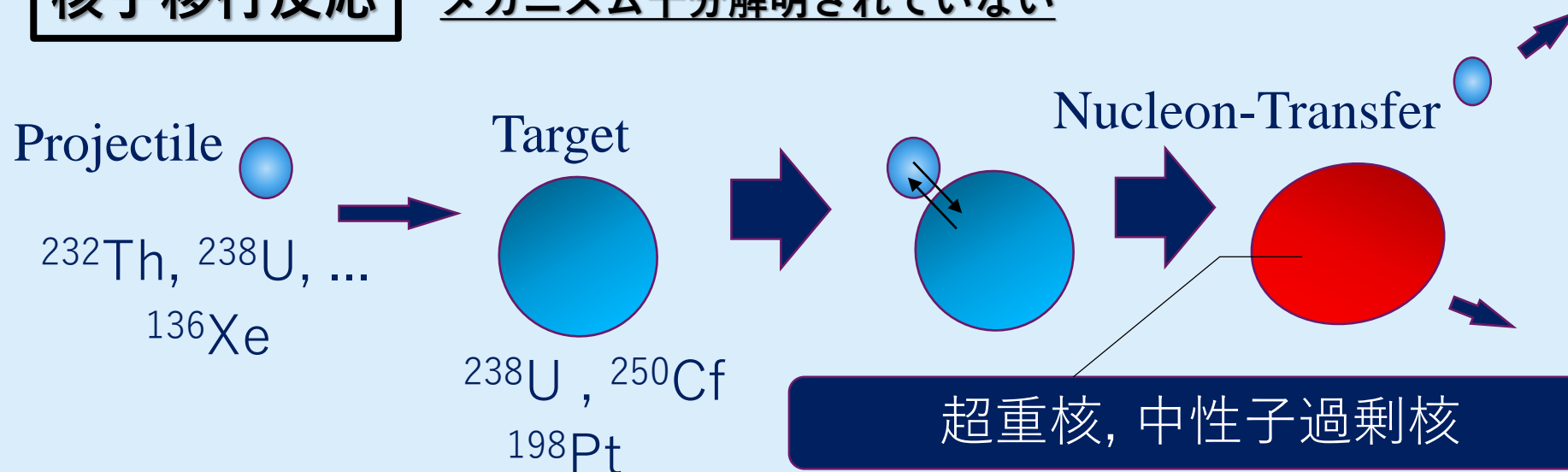


従来の融合反応では生成が困難

新手法が必要

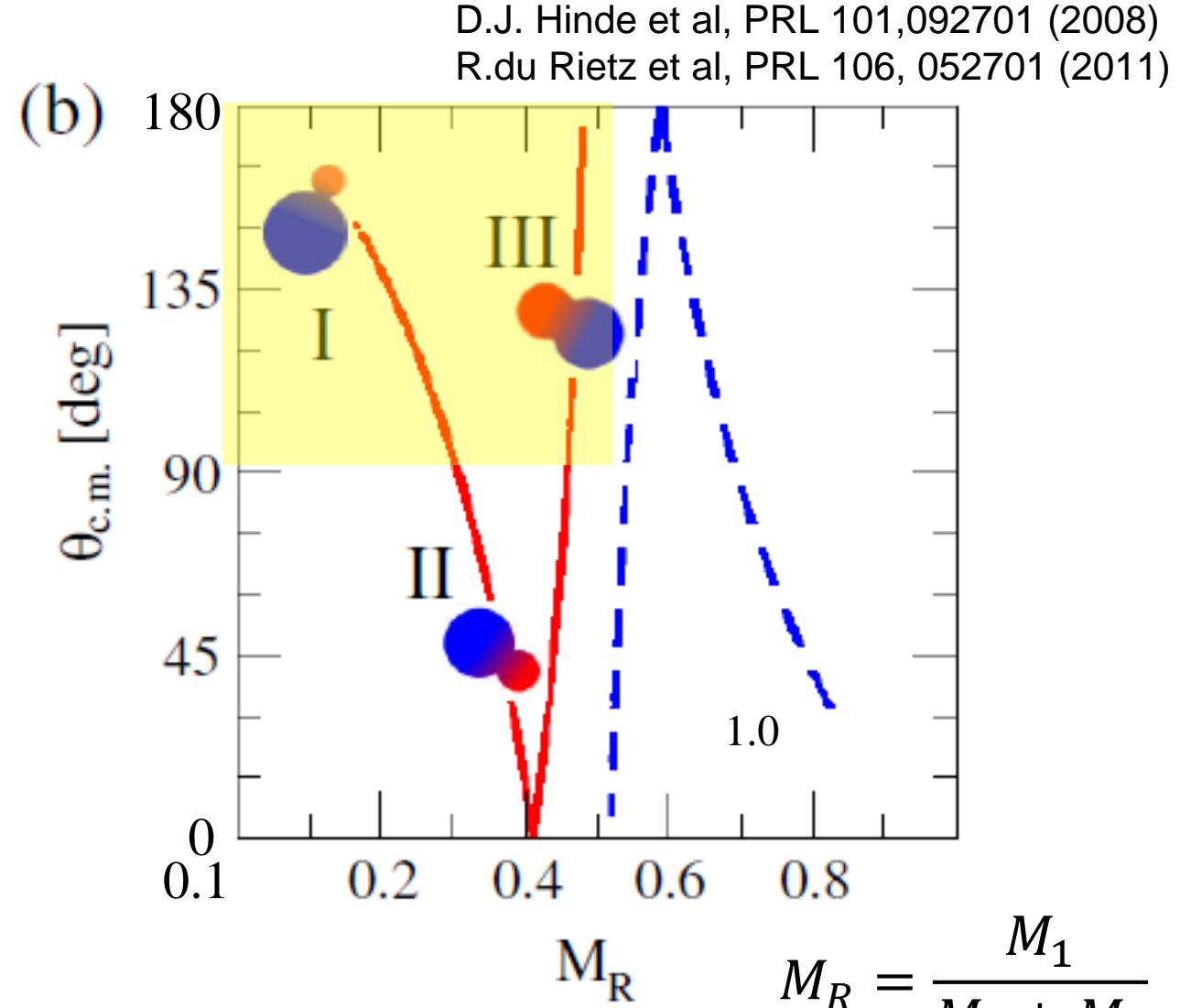
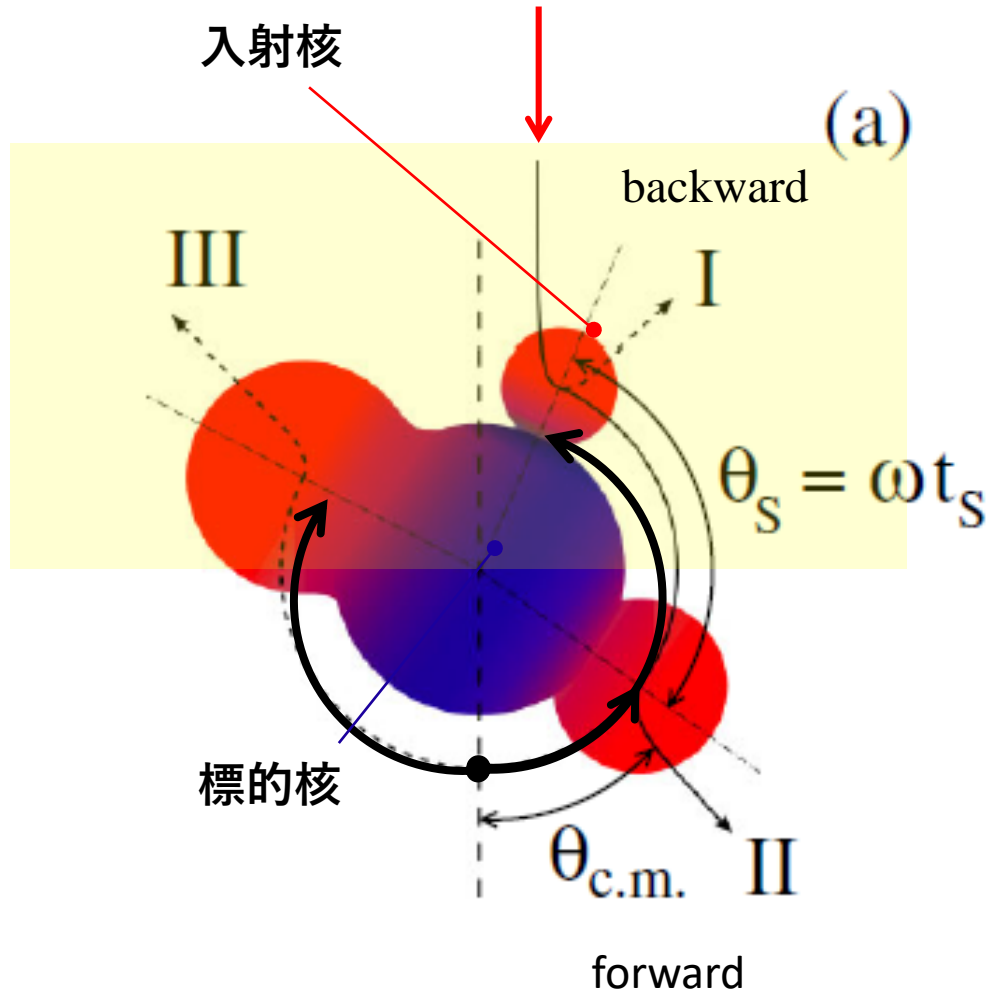
核子移行反応

メカニズム十分解明されていない



核子移行反応のメカニズムを解明するため

-分裂片の質量比と放出角度の関係-



D.J. Hinde et al, PRL 101,092701 (2008)
R.du Rietz et al, PRL 106, 052701 (2011)

融合分裂反応機構を解析
Quasi Fission, Fusion-Fission

$$M_R = \frac{M_1}{M_1 + M_2}$$

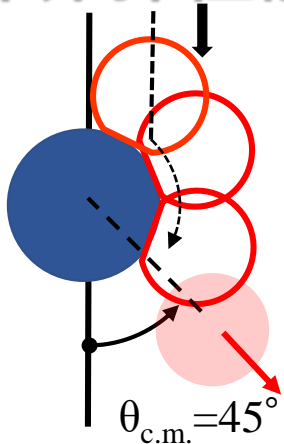
M_1 : 入射核の質量数 M_2 : 標的核の質量数

質量角度分布(MAD)の特徴

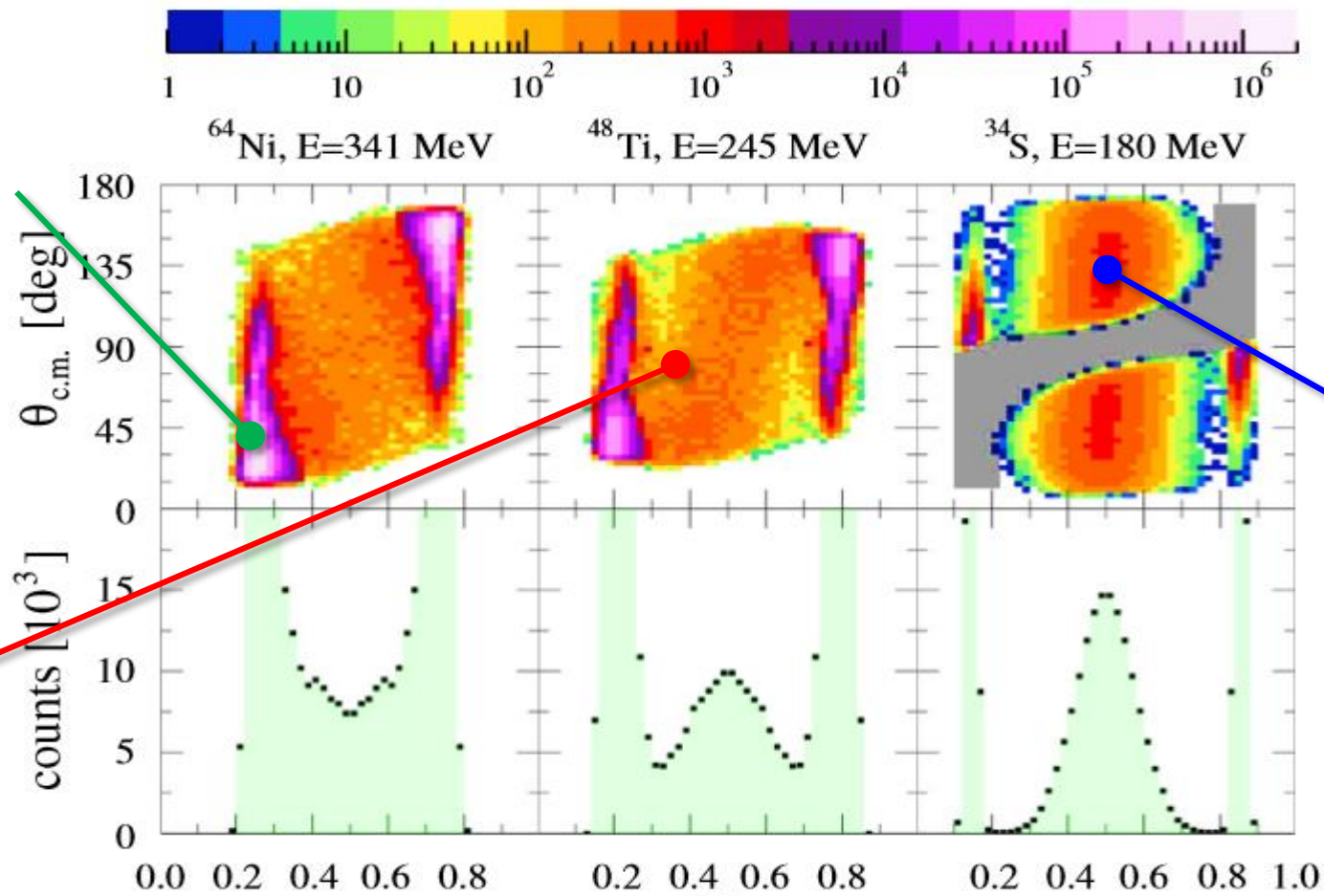
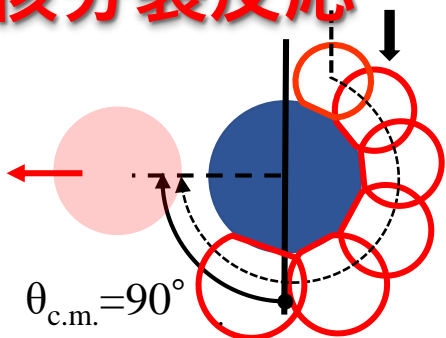
- 3つの反応過程 -

実験で測定された

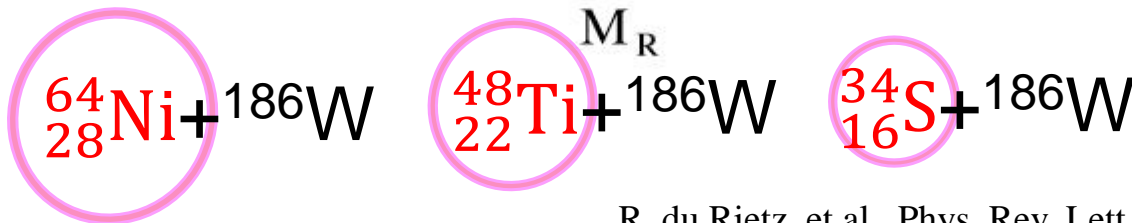
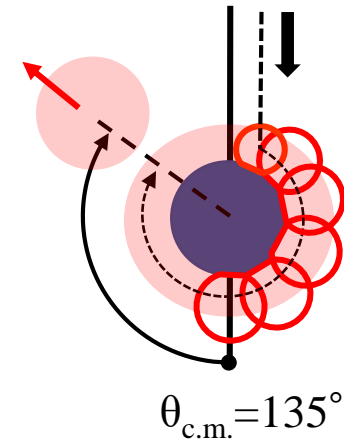
タイプ1
準弾性散乱・
深部非弾性散乱



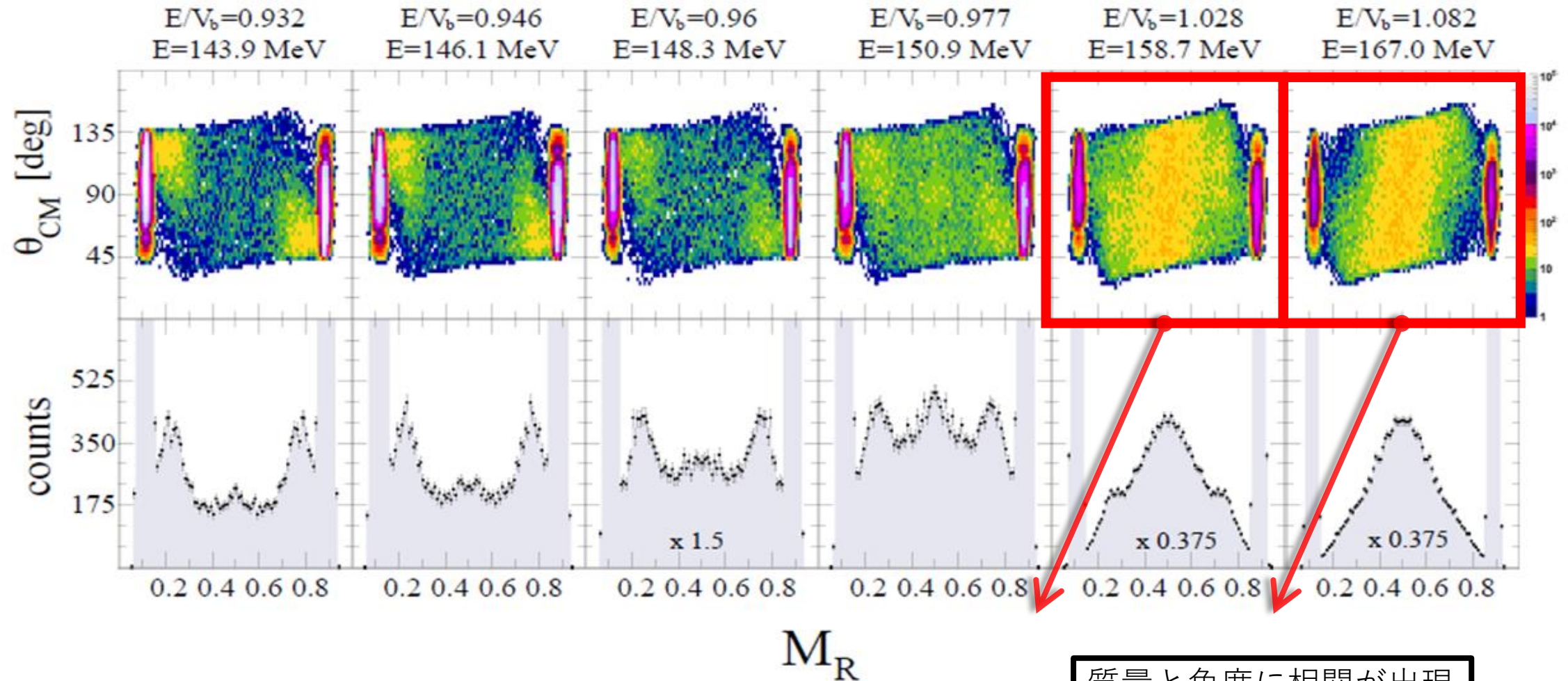
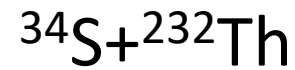
タイプ2
準核分裂反応



タイプ3
融合分裂反応

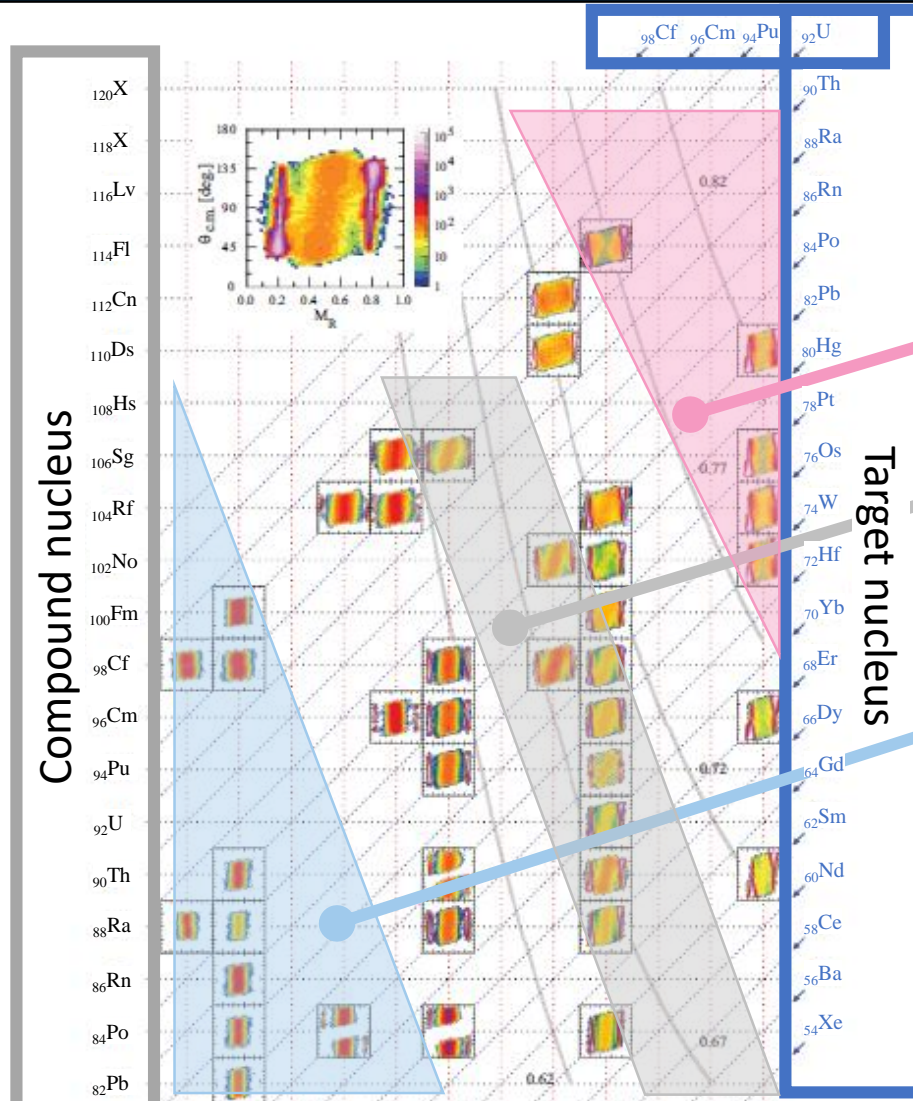


MADの入射エネルギー依存性



Mapping MADs (Mass Angle Distributions)

Exp.



MAD1 (QE, DIC)

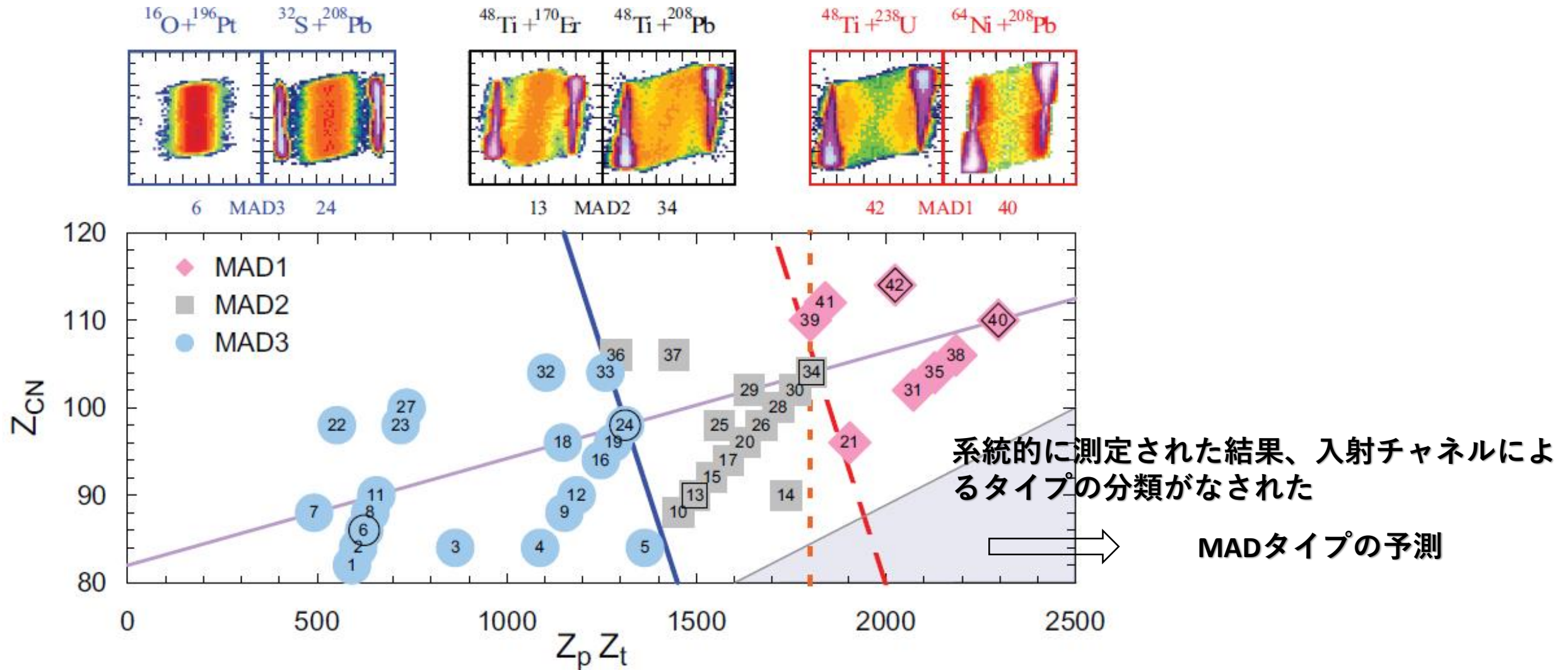
MAD2 (QF)

MAD3 (FF)

${}^6\text{C}$ ${}^8\text{O}$ ${}^{10}\text{Ne}$ ${}^{12}\text{Mg}$ ${}^{14}\text{Si}$ ${}^{16}\text{S}$ ${}^{18}\text{Ar}$ ${}^{20}\text{Ca}$ ${}^{22}\text{Ti}$ ${}^{24}\text{Cr}$ ${}^{26}\text{Fe}$ ${}^{28}\text{Ni}$

Projectile nucleus

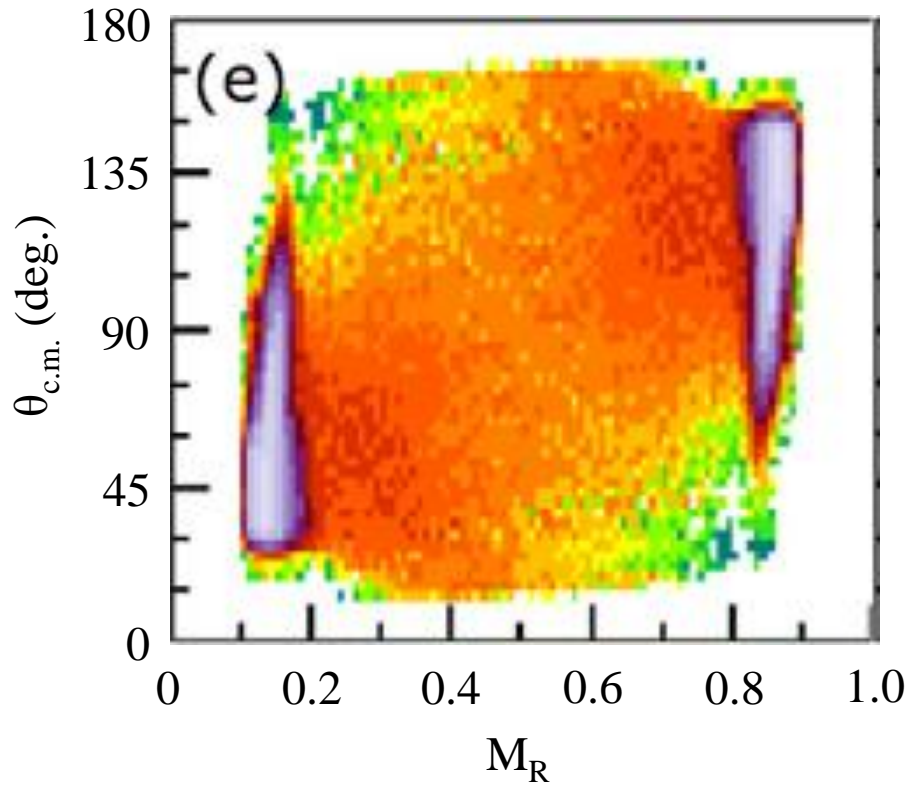
The analysis of mapping MADs (Mass Angle Distributions)



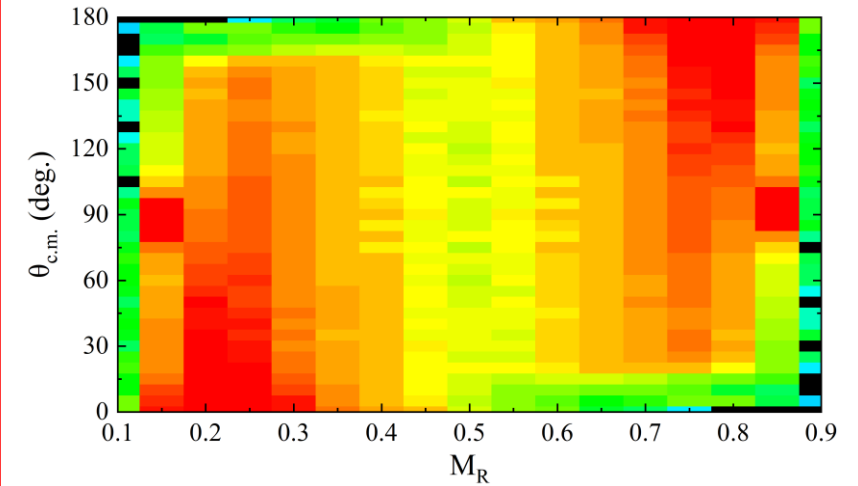
Mass angle distribution

Langevin cal. and TDHF cal.

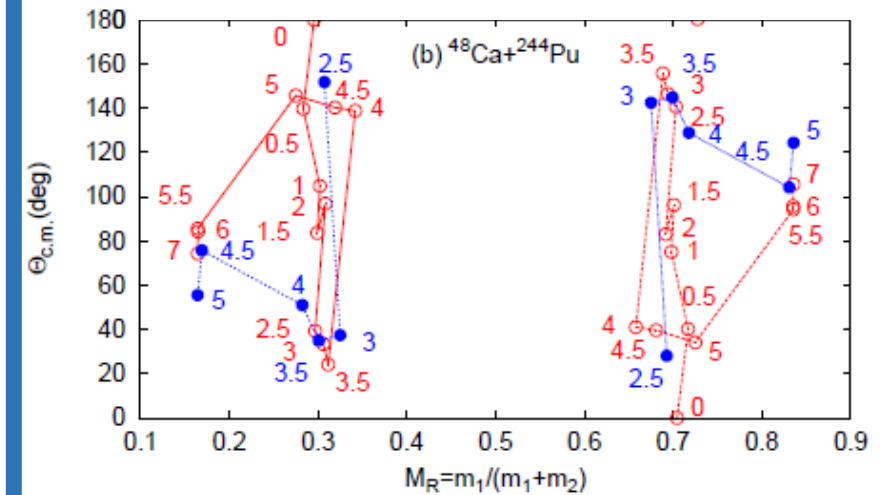
Exp.



Langevin cal.

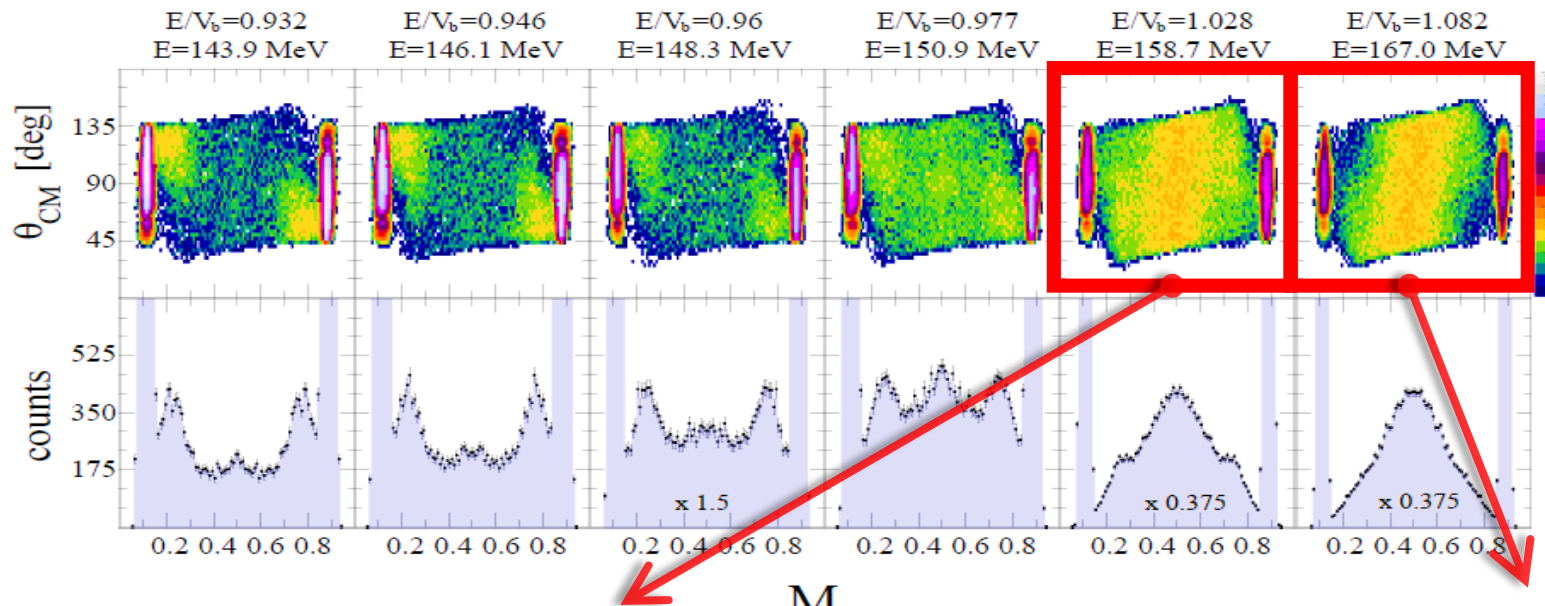


TDHF cal.



Mass Angle Distribution Langevin Calculation

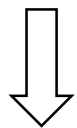
$^{34}\text{S}+^{232}\text{Th}$ Exp. Australian National University



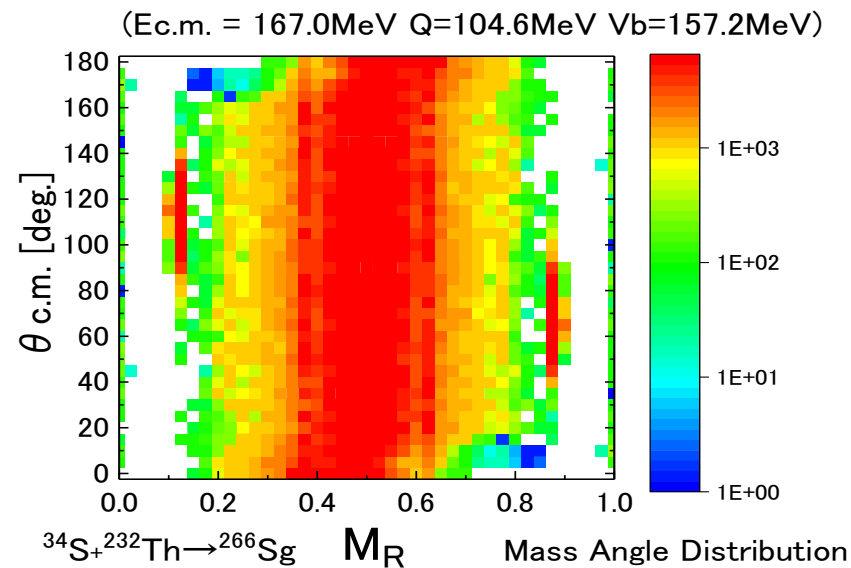
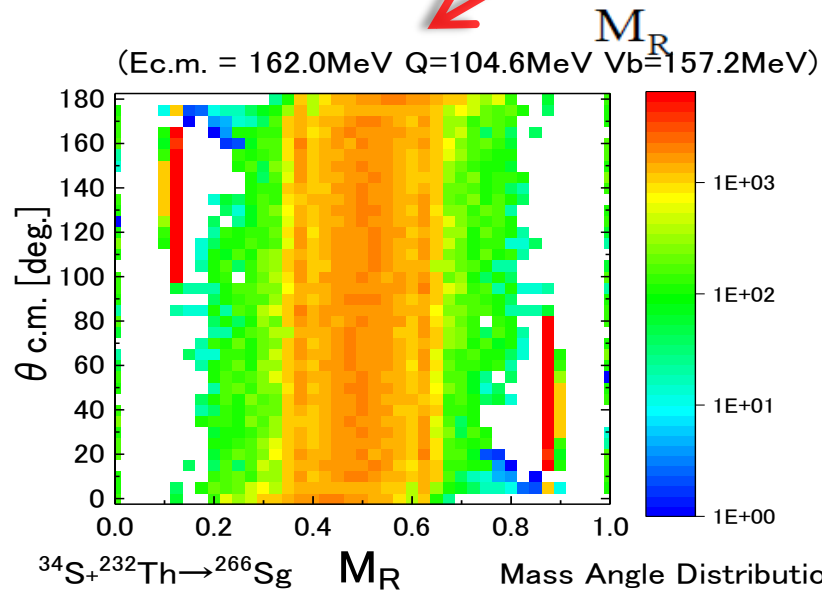
Exp. A.Wakhe,
D.J Hinde et al (ANU)

問題点

質量と角度の相関
を再現できない



相関に重要な因子は？



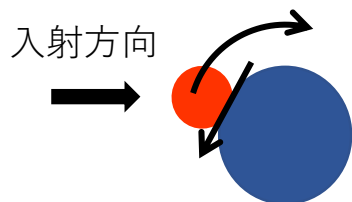
Previous study (MADtype2)-key factor

接線方向の摩擦 (γ_t^0)

- 原子核の接線方向の摩擦を補正するパラメータ
- 核力・フラグメントの角運動量に影響

$$\gamma_{tang} \times \gamma_t^0$$

γ_{tang} : 接線方向の摩擦



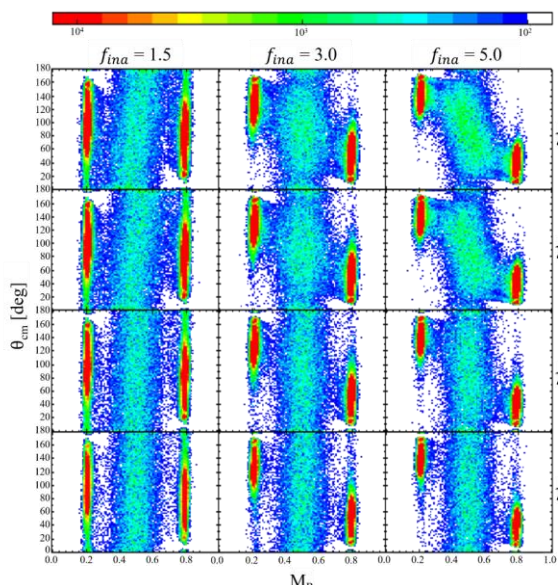
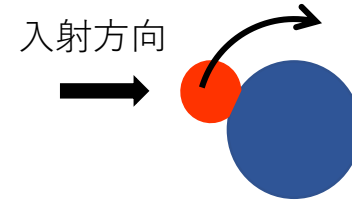
慣性モーメント (f_{ina})

超流動状態

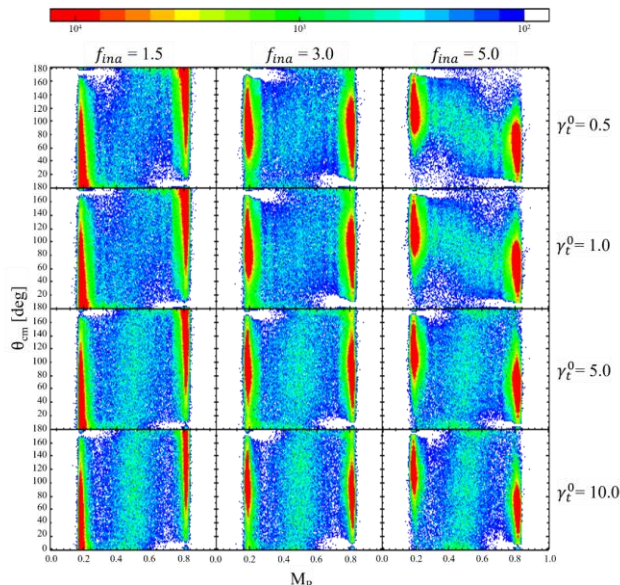
- 剛体の慣性モーメントを補正するパラメータ
- 原子核の動きやすさに影響

$$\frac{\hbar^2 L(L+1)}{2\mathcal{I}(q) \times f_{ina}}$$

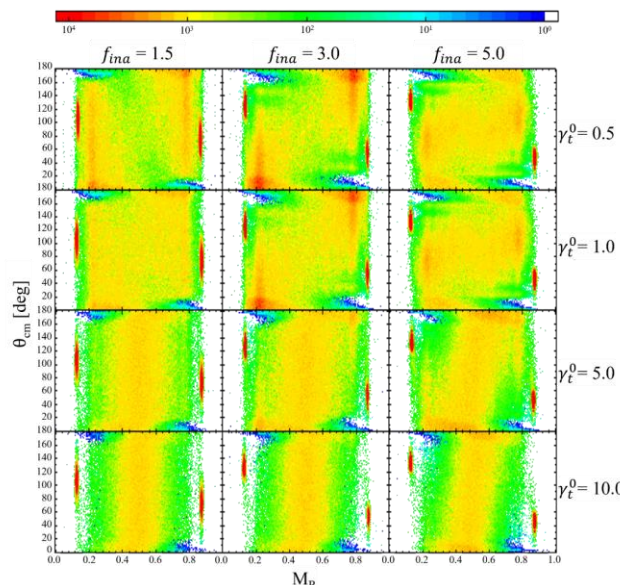
$\mathcal{I}(q)$: 剛体の慣性モーメント



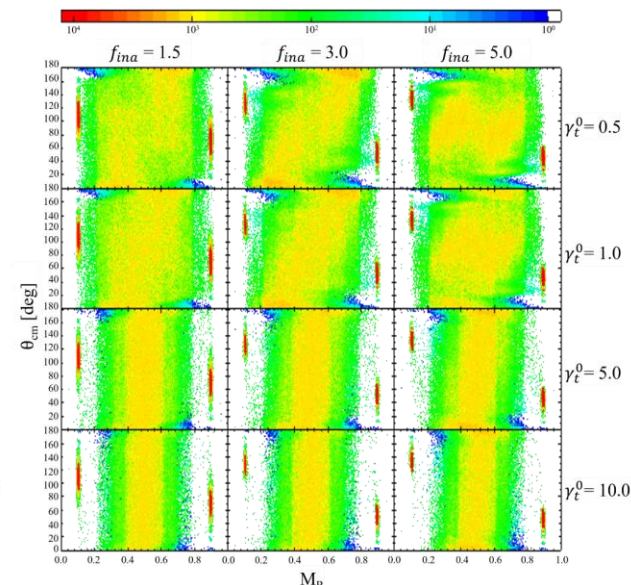
$^{48}\text{Ti} + ^{186}\text{W}$, $E_{c.m.} = 187.87\text{MeV}$



$^{48}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb}$, $E_{c.m.} = 228.95\text{MeV}$



$^{34}\text{S} + ^{232}\text{Th}$, $E_{c.m.} = 168.75\text{MeV}$



$^{28}\text{Si} + ^{238}\text{U}$, $E_{c.m.} = 149.96\text{MeV}$

核分裂反応における原子核のネック(ϵ value)の重要性

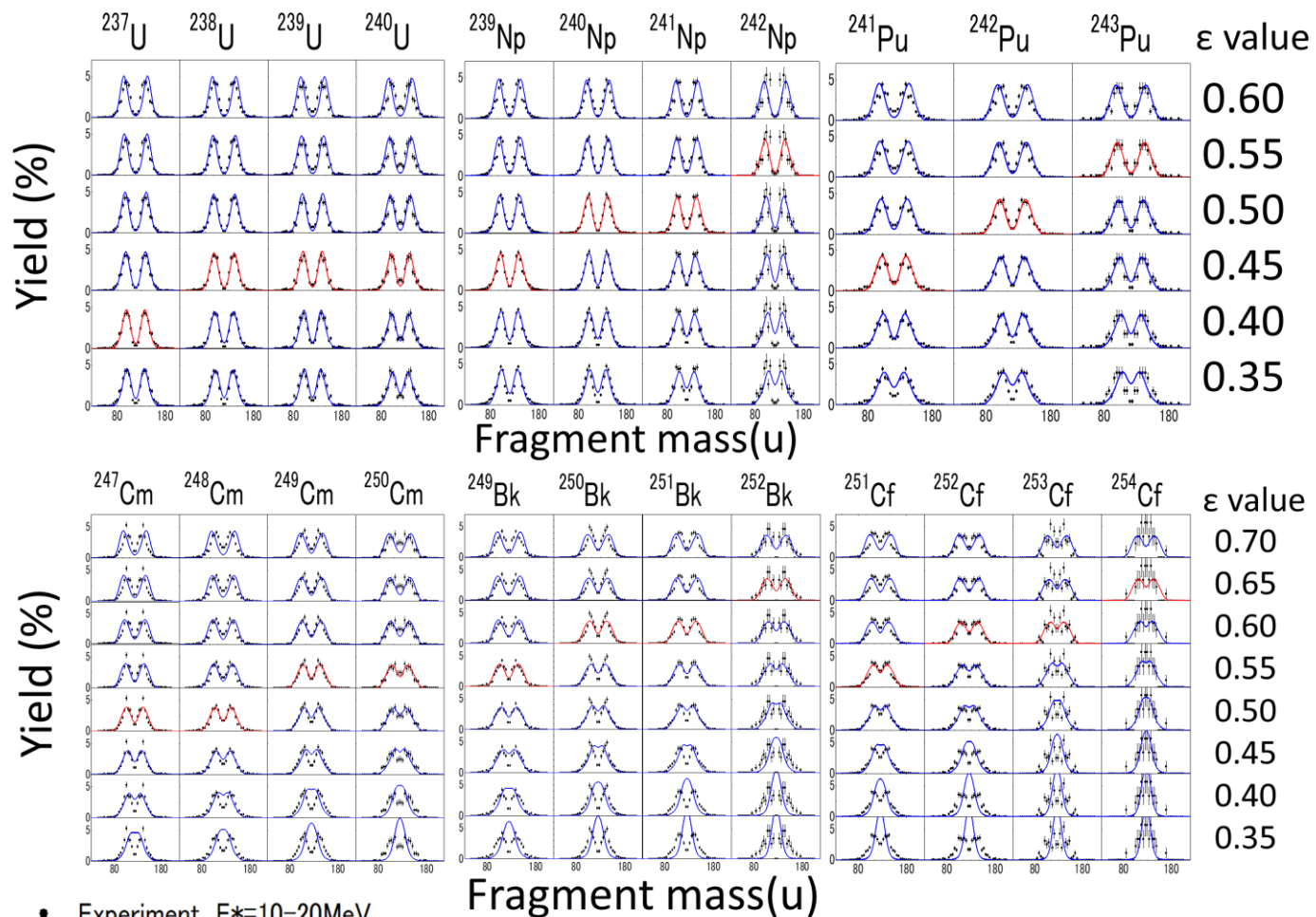
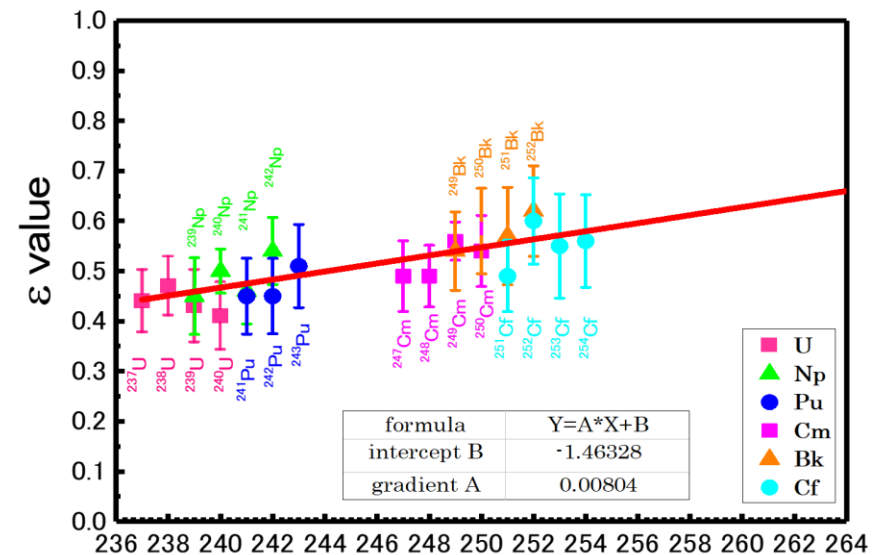


Fig. 4. (Color online) Experimental FFMDs (points with error bars) of the U, Np, Pu, Cm, Bk, and Cf isotopes. The experimental FFMDs are compared with Langevin calculations and their dependence on ϵ parameter in the range of $\epsilon = 0.35\text{--}0.60$ (U, Np, Pu) and $\epsilon = 0.35\text{--}0.70$ (Cm, Bk, Cf).



Mass of fissioning nucleus
Fig. 5. The optimum ϵ value research each actinide isotopes by using Chi squared calculation. The straight line is approximated by least-squares method.

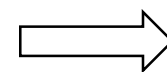
核分裂する原子核の質量数と ϵ value には
相関が存在する

➡ 融合分裂反応にも適用可能か？

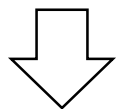
本研究の目的

研究背景

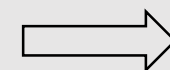
質量と角度の相関の再現には融合反応におけるダイナミクスを適切に表現することが重要である



原子核のネック(ε値)の重要性？

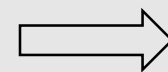


εの緩和時間による ^{234}Cm 形成のMADの変化を調べる



MADの3種類のタイプに対する変化

εの緩和時間による
① $^{48}\text{Ti} + ^{162}\text{Dy} \rightarrow ^{210}\text{Ra}$,
② $^{48}\text{Ti} + ^{186}\text{W} \rightarrow ^{234}\text{Cm}$,
③ $^{48}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{256}\text{Rf}$



複合核の質量数に対する変化

のMAD(type2)の変化を調べる

目次

1. 背景と目的

2. 理論模型と計算方法

3. 計算結果および考察

^{234}Cm の質量角度分布

A_{CN} に応じた τ_{ε} 変化による質量と角度の相関

4. まとめ

理論模型と計算方法

Two center shell model

$q \{z, \delta, \alpha\}$
 A_2 A_1
 $z = \frac{z_0}{BR}$ $\delta = \frac{3(a-b)}{2a+b}$ $\alpha = \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2}$
 $B = \frac{3 + \delta}{3 - 2\delta}$
 z : elongation δ : deformation α : mass asymmetry

Potential energy

$V_{\text{fus-fis}}(q, t) = V_{\text{diab}} \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{\text{relax}}}\right) + V_{\text{adiab}}(\varepsilon, t) \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{\text{relax}}}\right)\right]$ $V = V_{\text{LDM}}(q) + V_{\text{SH}}(q, T)$
 $V_{\text{rot}} = \frac{\hbar^2 L(L+1)}{2J(q)}$
 $V_{\text{adiab}} = V + V_{\text{rot}}$
 L : angular momentum T : nuclear temperature
 J : moment of inertia for rigid body $\tau_{\text{relax}} = \sim 10^{-22}$

Multi-dimensional Langevin equation

$$\frac{dq_i}{dt} = (m^{-1})_{ij} p_j, \quad \frac{d\theta}{dt} = -\frac{l}{\mu_R R^2},$$

$$\frac{d\varphi_1}{dt} = \frac{L_1}{\xi_1}, \quad \frac{d\varphi_2}{dt} = \frac{L_2}{\xi_2}, \quad a_{1,2} = \frac{R}{2} \pm \frac{(R_1 - R_2)}{2}$$

$$\frac{dp_i}{dt} = -\frac{\partial V_{\text{fus-fis}}}{\partial q_i} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial q_i} (m^{-1})_{jk} p_j p_k - \gamma_{ij} (m^{-1})_{jk} p_k + g_{ij} R_j(t),$$

$$\frac{dl}{dt} = -\frac{\partial V_{\text{fus-fis}}}{\partial \theta} - \gamma_{\text{tang}} \left(\frac{l}{\mu_R R} - \frac{L_1}{\xi_1} a_1 - \frac{L_2}{\xi_2} a_2 \right) R + R g_{\text{tang}} R_{\text{tang}}(t),$$

$$\frac{dL_1}{dt} = -\frac{\partial V_{\text{fus-fis}}}{\partial \varphi_1} + \gamma_{\text{tang}} \left(\frac{l}{\mu_R R} - \frac{L_1}{\xi_1} a_1 - \frac{L_2}{\xi_2} a_2 \right) a_1 - a_1 g_{\text{tang}} R_{\text{tang}}(t),$$

$$\frac{dL_2}{dt} = -\frac{\partial V_{\text{fus-fis}}}{\partial \varphi_2} + \gamma_{\text{tang}} \left(\frac{l}{\mu_R R} - \frac{L_1}{\xi_1} a_1 - \frac{L_2}{\xi_2} a_2 \right) a_2 - a_2 g_{\text{tang}} R_{\text{tang}}(t)$$

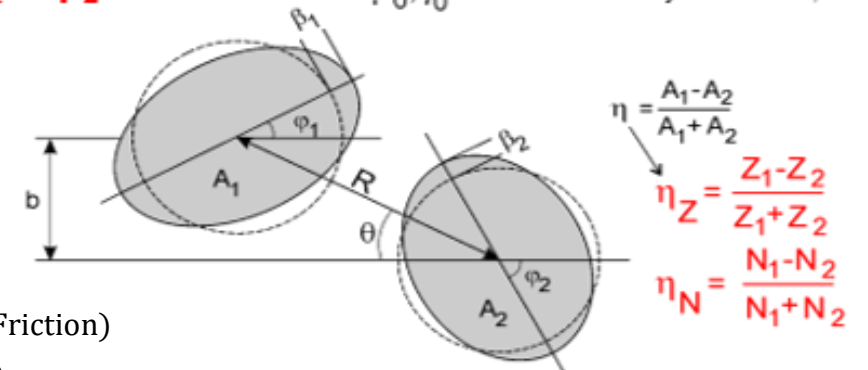
R : centre of distance
 $R_{1,2}$: nuclear radius
 θ : relative angle
 l : relative angular momentum
 $\varphi_{1,2}$: rotation angle
 $\xi_{1,2}$: moment of inertia
 $L_{1,2}$: angular momentum
 γ_{tang} : tangential friction

γ_{ij} : Wall and Window dissipation (Friction)
 m_{ij} : Hydrodynamical mass (Inertia)
 $\langle R_i(t) \rangle = 0, \langle R_i(t_1) R_j(t_2) \rangle = 2\delta_{ij} \delta(t_1 - t_2)$: White noise (Markovian process)
 g_{ij} : Random force (fluctuation) $\sum_k g_{ik} g_{jk} = T \gamma_{ij}$: Einstein relation

Variables: $\{R, \theta, \varphi_1, \varphi_2, \beta_1, \beta_2, \eta_Z, \eta_N\}$

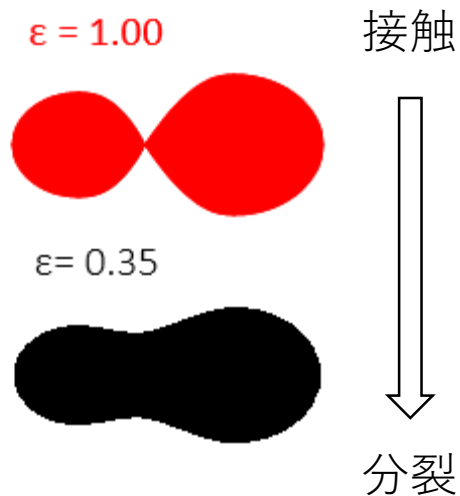
$$\beta_1 = \beta_2$$

Most uncertain parameters:
 μ_0, γ_0 - nuclear viscosity and friction,



融合反応における原子核のネック形成（計算方法）

ε値による原子核の形状例



$$V_{\text{adiab}} = V_{\text{adiab}}(\varepsilon = 1) \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_\varepsilon}\right) + V_{\text{adiab}}(\varepsilon_{\text{out}}) \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_\varepsilon}\right)\right]$$

$\varepsilon_{\text{out}}=0.35$

τ_ε : εの緩和時間

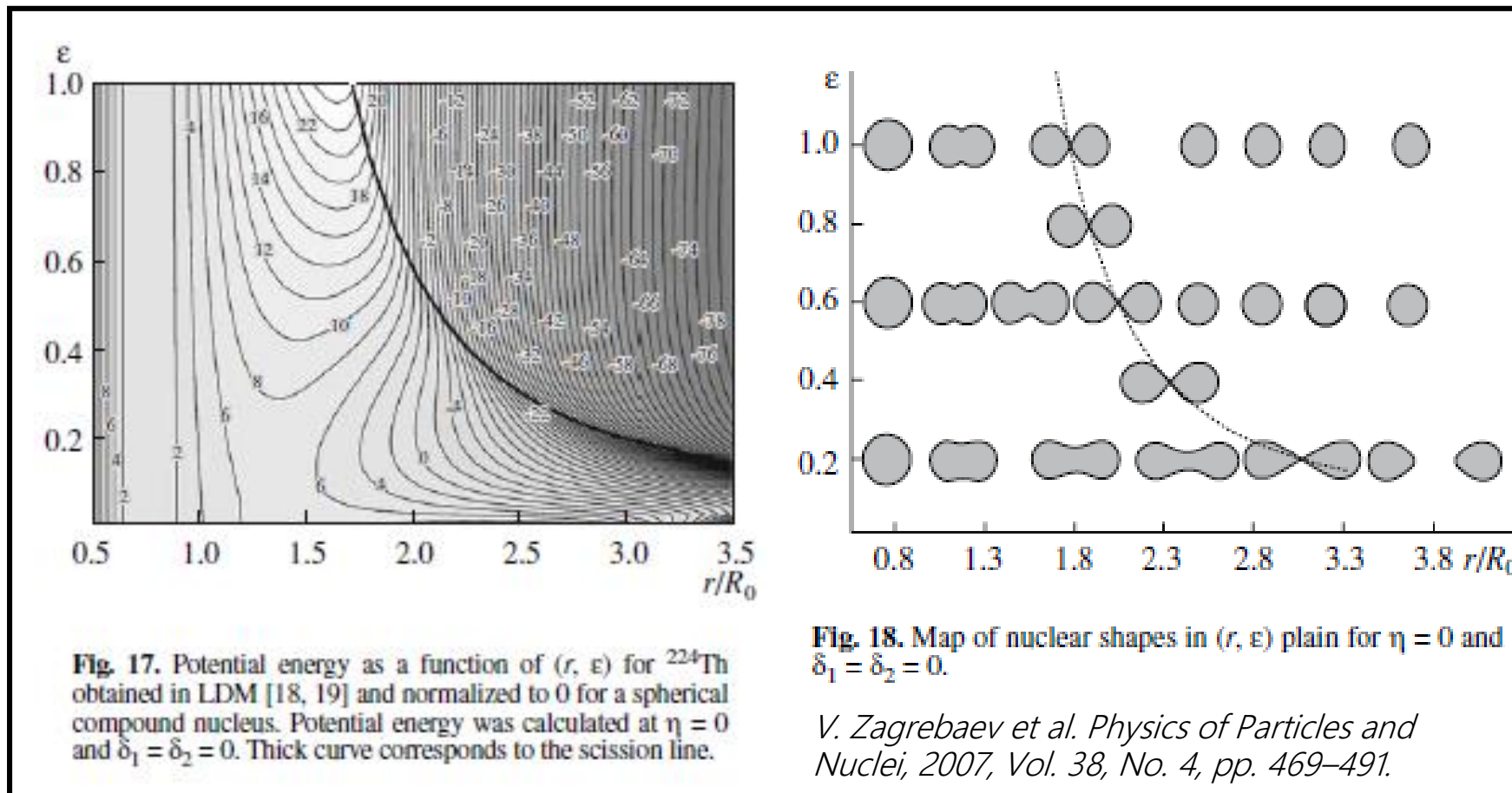


Fig. 17. Potential energy as a function of (r, ε) for ^{224}Th obtained in LDM [18, 19] and normalized to 0 for a spherical compound nucleus. Potential energy was calculated at $\eta = 0$ and $\delta_1 = \delta_2 = 0$. Thick curve corresponds to the scission line.

Fig. 18. Map of nuclear shapes in (r, ε) plain for $\eta = 0$ and $\delta_1 = \delta_2 = 0$.

V. Zagrebaev et al. *Physics of Particles and Nuclei*, 2007, Vol. 38, No. 4, pp. 469–491.

入射核と標的核が接触してから分裂までの原子核のネック（くびれ）形成が質量と角度の相関に与える影響を調べる

目次

1. 背景と目的

2. 理論模型と計算方法

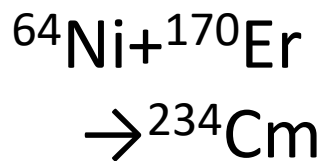
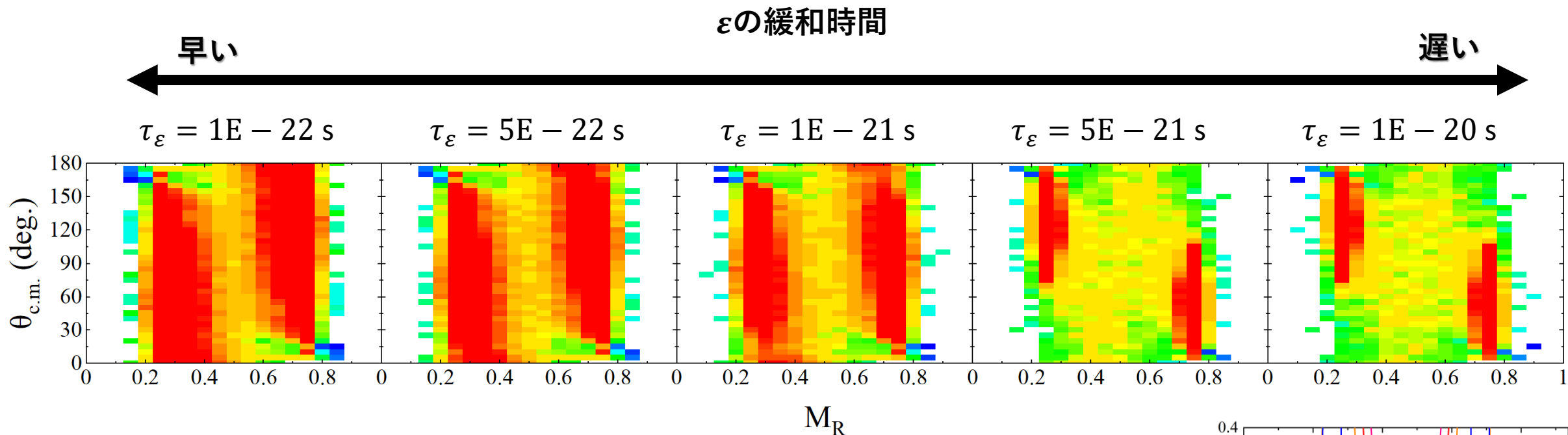
3. 計算結果および考察

^{234}Cm の質量角度分布

A_{CN} に応じた τ_{ε} 変化による質量と角度の相関

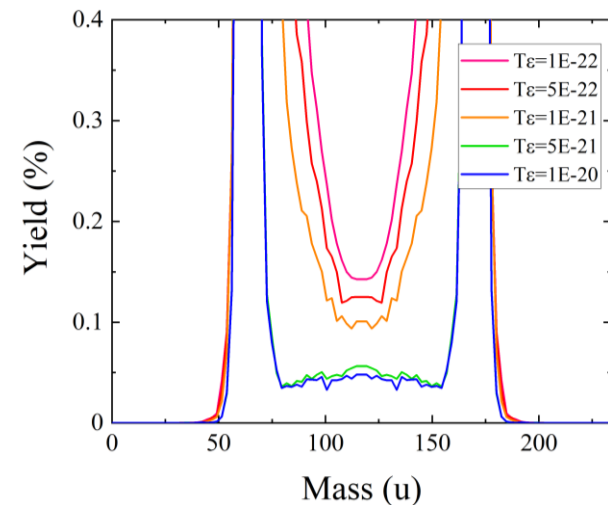
4. まとめ

ε の緩和時間による MADの変化 – type1(QE,DIC)



$E_{c.m.} = 216.2\text{ MeV}$
 $E_{bass} = 206.6\text{ MeV}$
 $E_{c.m.}/E_{bass} = 1.052$

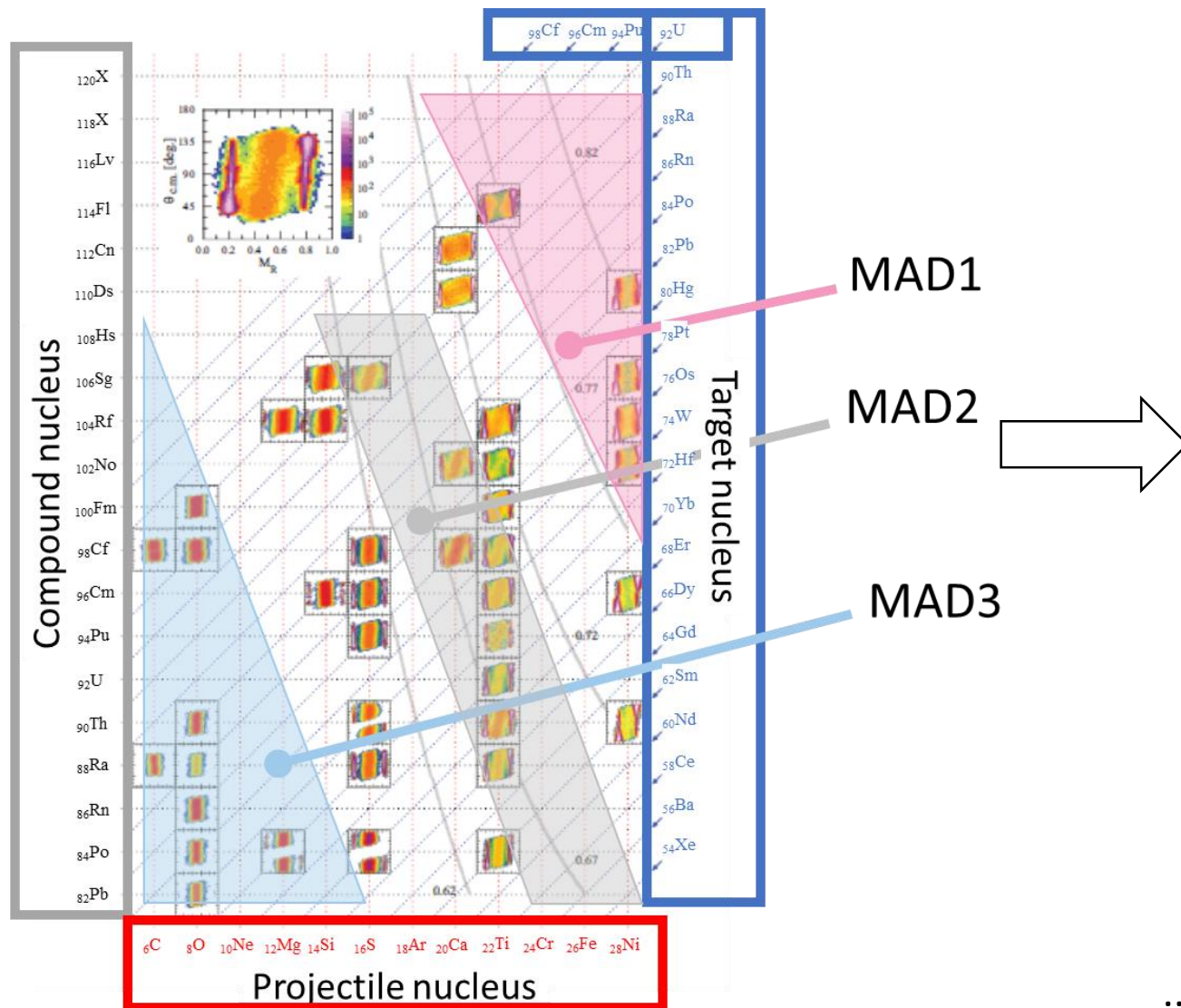
- 準弾性散乱・深部非弾性散乱が支配的
- ε の緩和時間に遅延が発生
 \rightarrow 質量非対称な分裂幅が狭くなる
- MADの特徴は $\tau_\varepsilon = 1E - 21 \sim 5E - 21\text{ s}$ で切り替わる



次のステップとして.....

Exp.

Cal.



.....我々のモデルでも系統的に計算し再現を試みる

目次

1. 背景と目的

2. 理論模型と計算方法

3. 計算結果および考察

^{234}Cm の質量角度分布

A_{CN} に応じた τ_{ε} 変化による質量と角度の相関

4. まとめ

まとめ

これまで.....

質量角度分布において γ_t^0 と f_{ina} パラメータのバランスが重要であることがわかっていたが、系統性が見いだせなかった

- ☑ ネット形成が質量と角度の相関を特徴づける
- ☑ 複合核の質量数 A_{CN} に応じた ϵ valueの選定が必要？

原子核のネックの成長速度に違いがある $\implies \tau_\epsilon$ の依存性？

ϵ_{out} を0.35から系に応じた値に変化させる $\implies \epsilon_{out}$ の依存性？

質量と角度の相関には融合分裂や準核分裂の特徴を再現する必要がある
→分裂に向かうexitチャネルの影響が重要

Thank you for listening