

核子移行反応による 超重元素領域の 融合分裂反応機構の解明

近畿大学 大学院総合理工研究科

天野 翔太, 宮本 裕也, 有友 嘉浩

目次

- 導入
- 理論模型
 - 動力学模型
- 計算結果
 - mass-angle distribution of fission fragments
- まとめ
- 今後の課題
 - $^{48}\text{Ca}+^{248}\text{Cm}$ のTransfer reaction

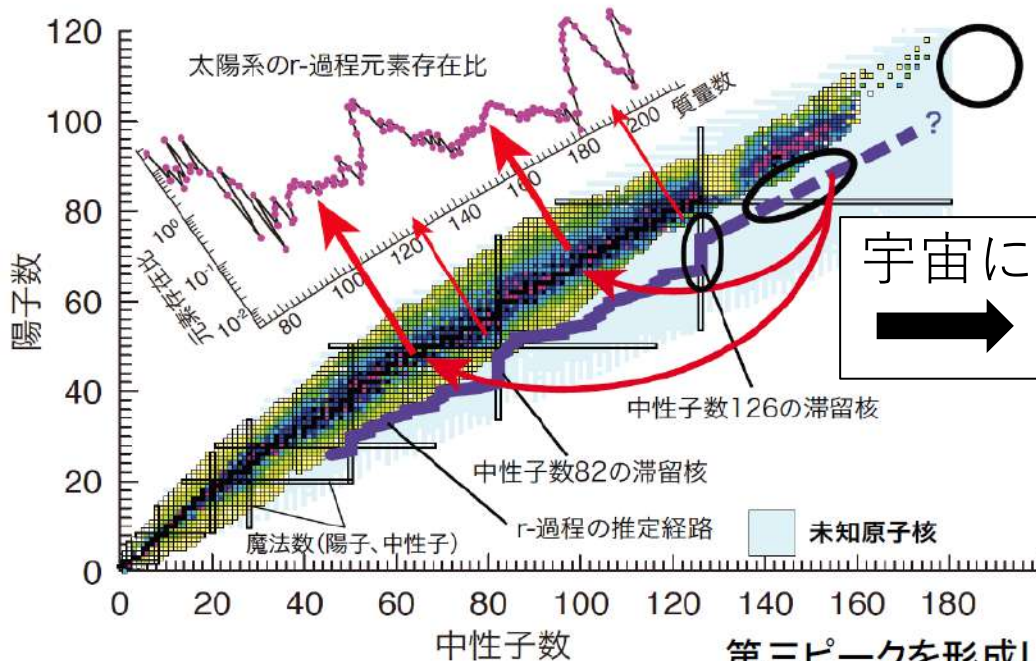
導入 r過程と中性子過剰核の生成

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



宇宙における元素合成の起源
➡ 中性子過剰核領域の研究が重要

第三ピークを形成した未知滞留核の特徴

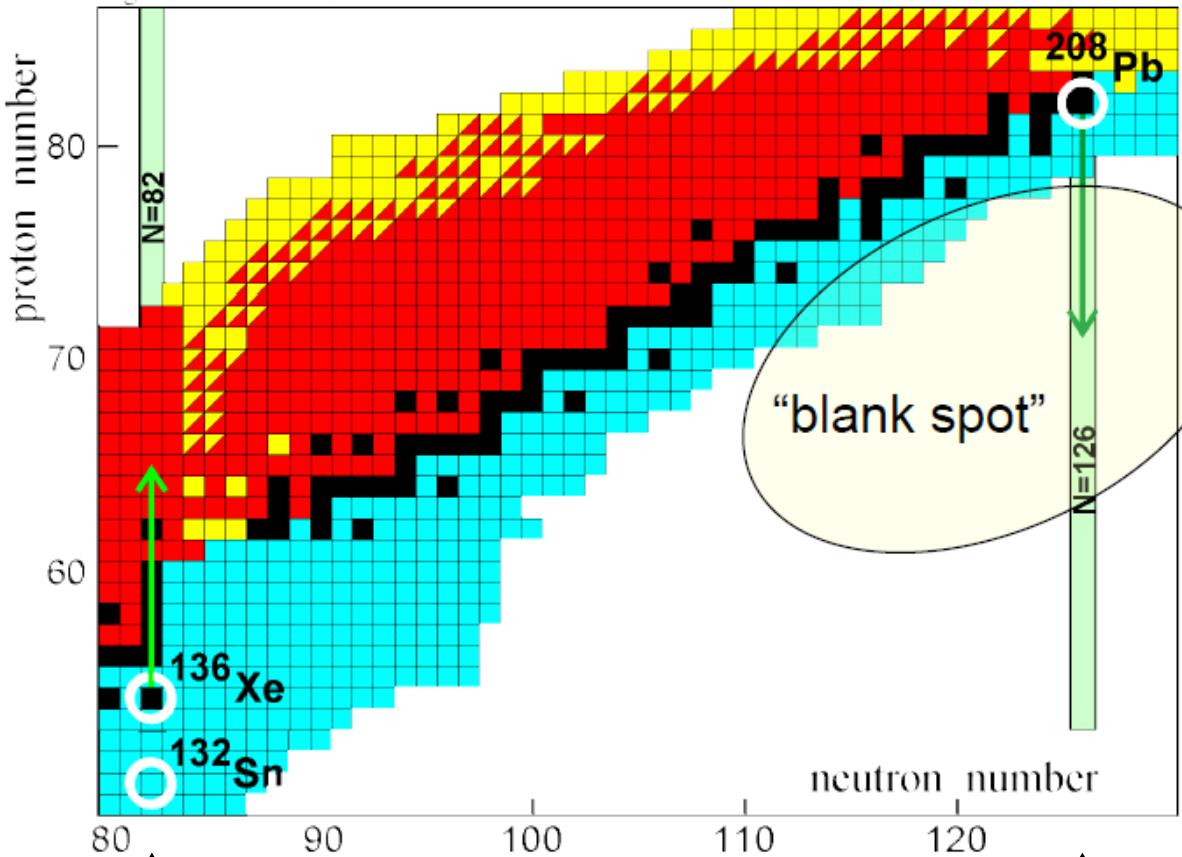
- 極端に金属の欠乏した初期世代星からも観測
- さらに重い元素(U, Th)生成のボトルネック
- すべてが未知核(BIGRIPS/RIBFで到達困難)

宮武さん

導入

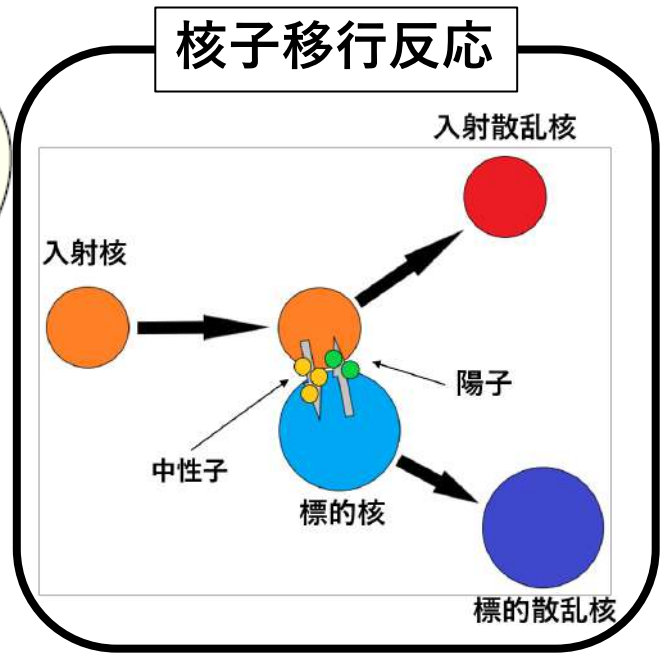
中性子過剰核の生成方法

Zagrebaev & Greiner, PRL 2008



中性子魔法数

中性子魔法数



目的

核子移行反応で生成される中性子過剰核の生成確率を評価



モデルに含まれる不定なパラメータが存在



適切なパラメータが必要



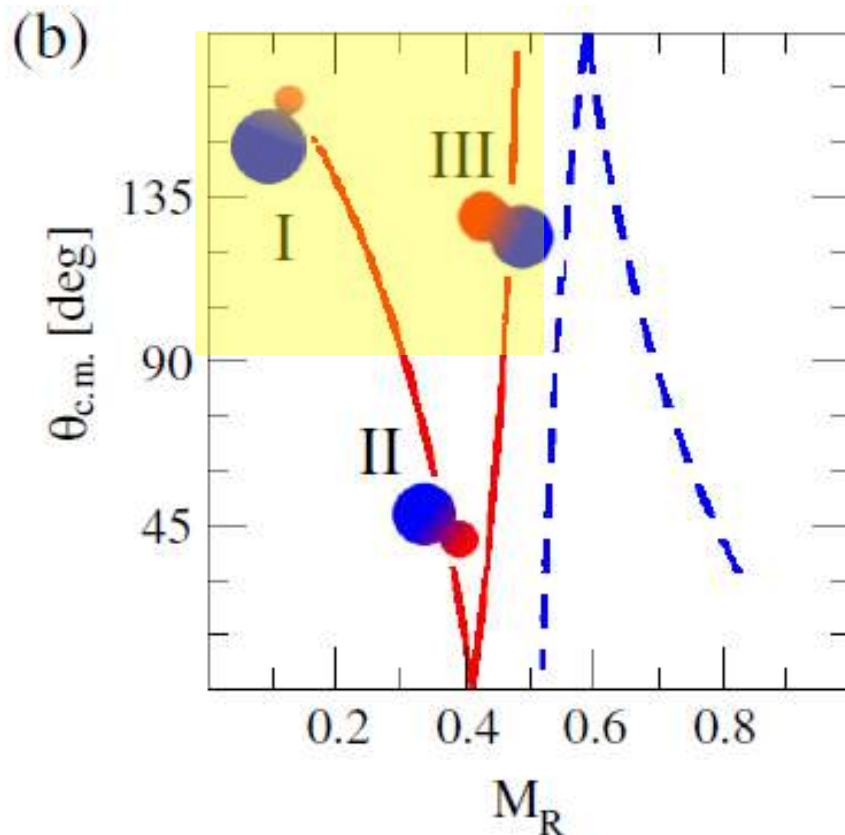
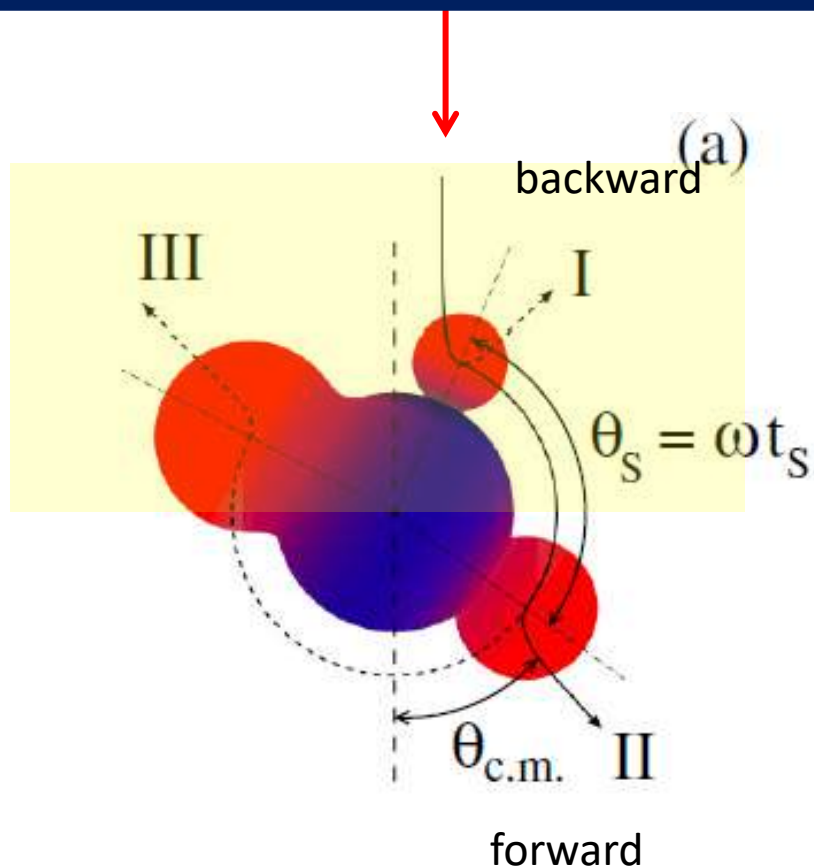
実験値と比較

Xe+Pt反応で中性子過剰核生成断面積を評価

(2019春の物理学会)

質量角度分布(ANU) について検討

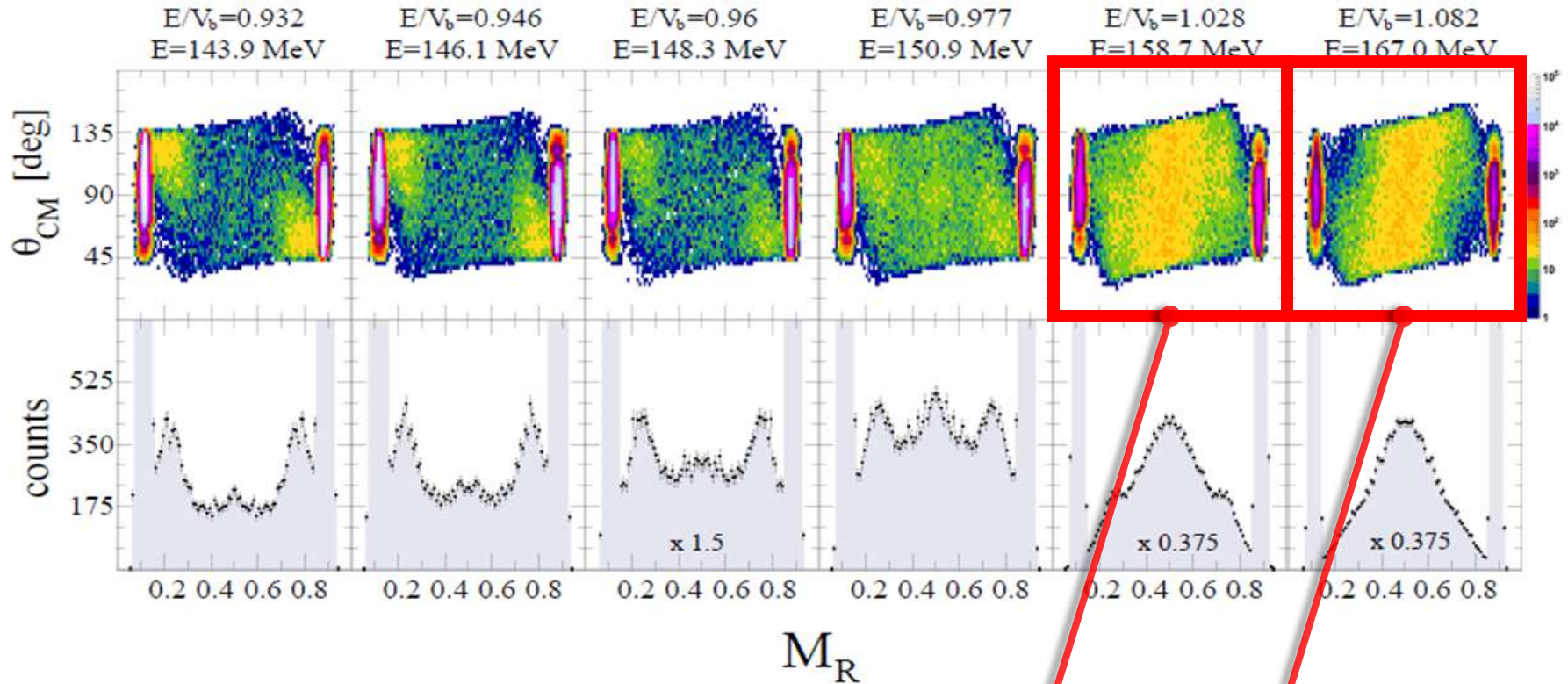
分裂片の質量比と放出角度の関係



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

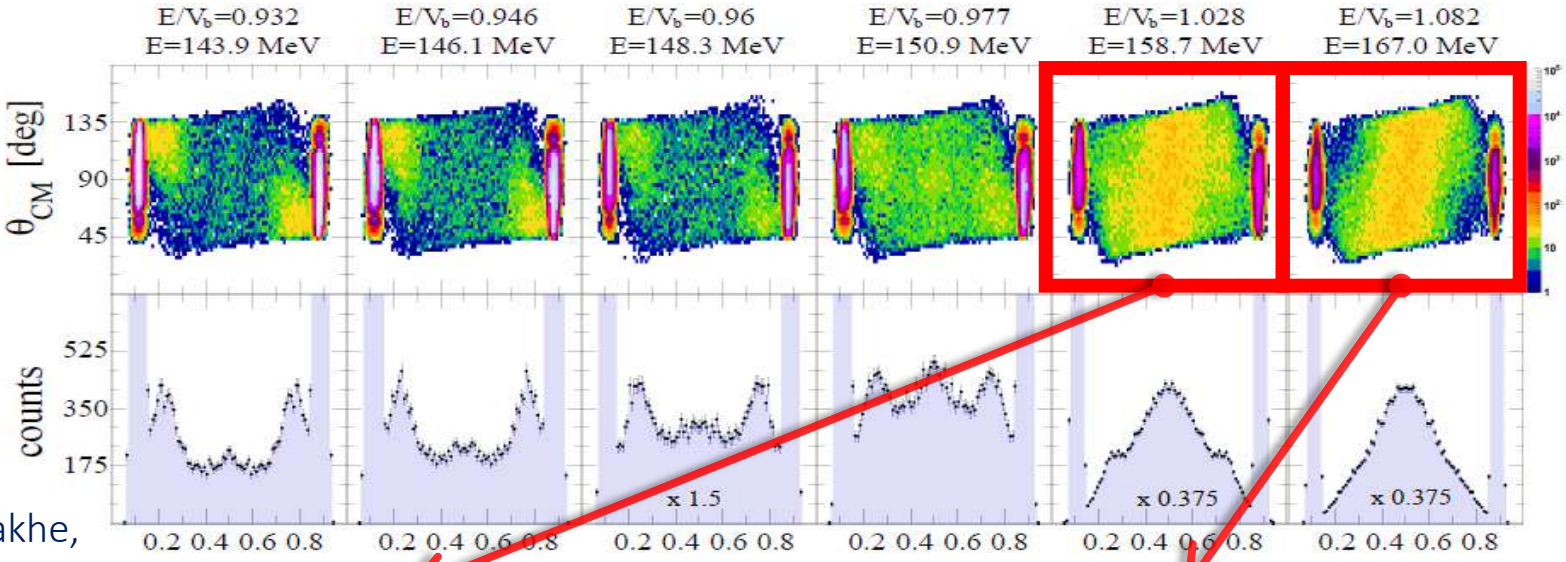
D.J. Hinde et al, PRL 101,092701 (2008)
 R.du Rietz et al, PRL 106, 052701 (2011)

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

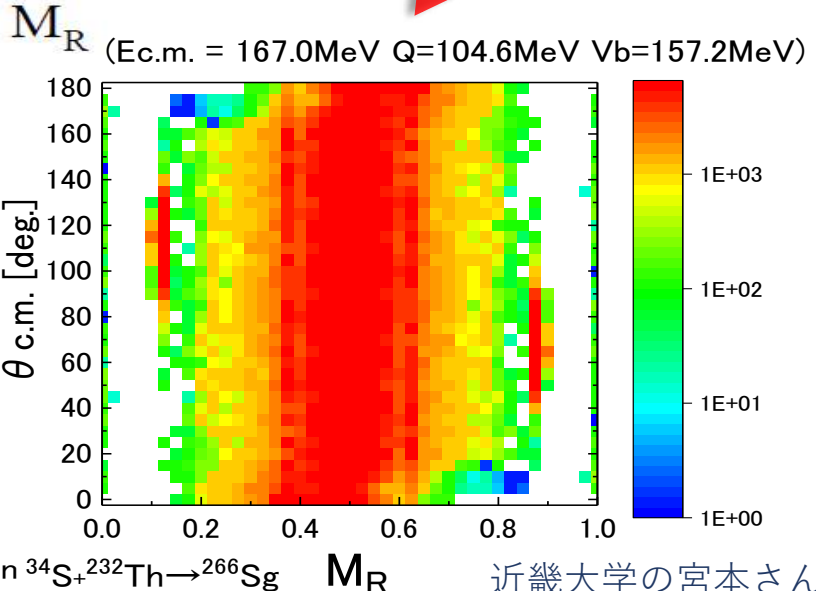
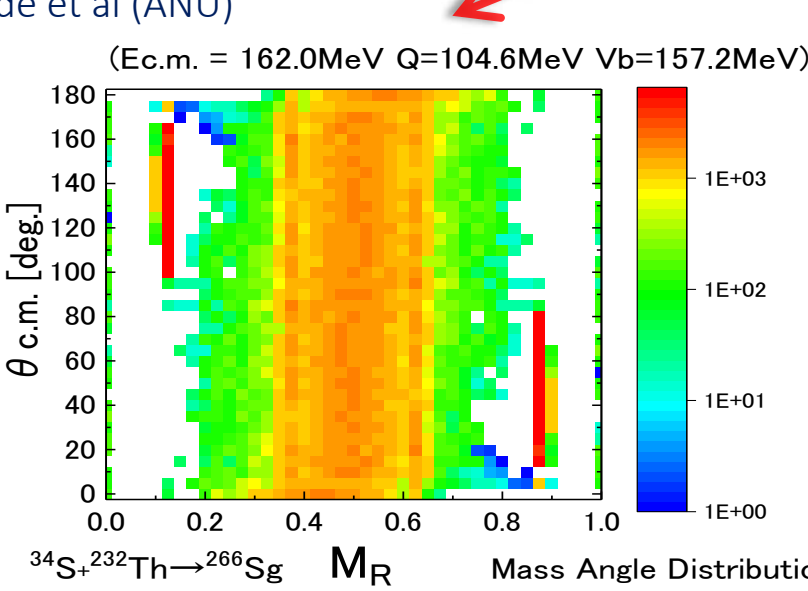
$^{34}\text{S}+^{232}\text{Th}$ 

質量と角度に相関が出現

Mass Angle Distribution Langevin Calculation $^{34}\text{S}+^{232}\text{Th}$ Exp. Australian National University

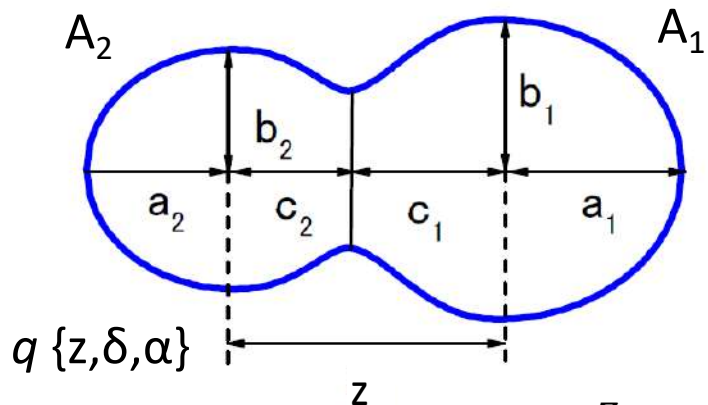


Exp. A.Wakhe,
D.J Hinde et al (ANU)



理論模型

二中心間模型



• 中心間距離 : $z = \frac{z_0}{BR}$

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

R : Radius of the spherical compound nucleus

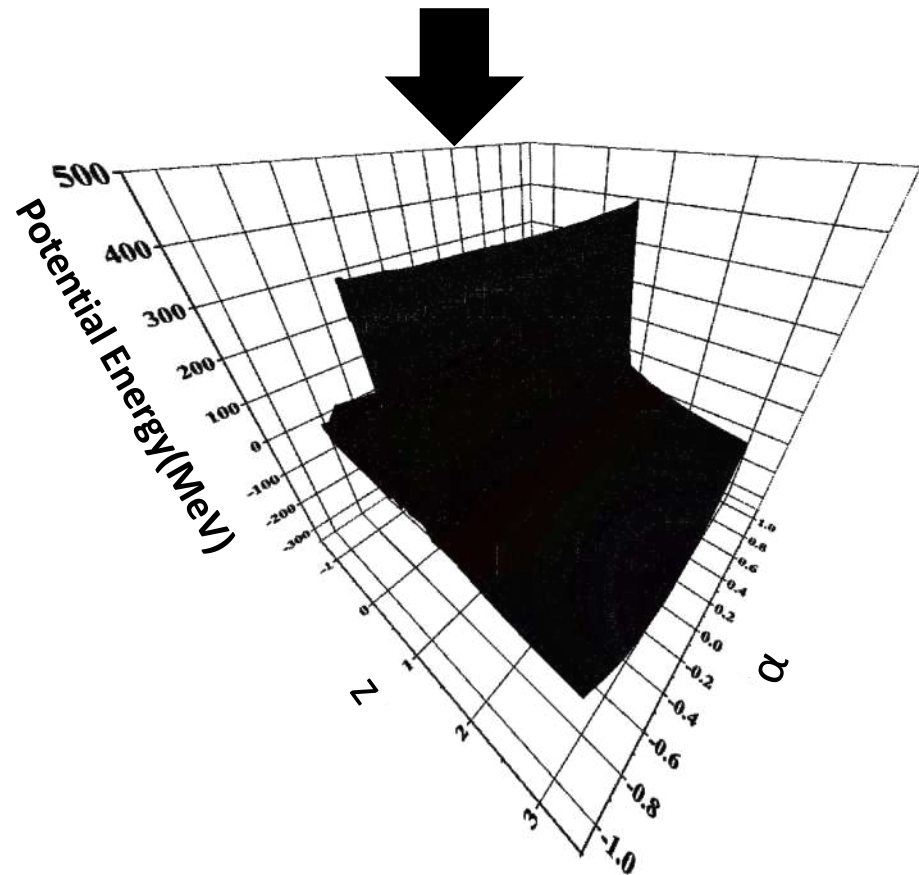
• 分裂片の変形度 : $\delta = \frac{3(a - b)}{2a + b}$
($\delta_1 = \delta_2$)

• 質量非対称度 : $a = \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2}$

ポテンシャルエネルギー

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

液滴模型 殻模型 回転エネルギー



理論模型

V.I. Zagrebaev and W. Greiner,
 J. Phys. G.31 825 (2005);
 G34 1 (2007); G34, 2265 (2007);
 G35 125103 (2008);
 PLC78 034610 (2008) etc.

多次元ランジュバン方程式

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

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

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{l}{\mu_R R^2},$$

$$\frac{d\varphi_1}{dt} = \frac{L_1}{\xi_1},$$

$$\frac{d\varphi_2}{dt} = \frac{L_2}{\xi_2},$$

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

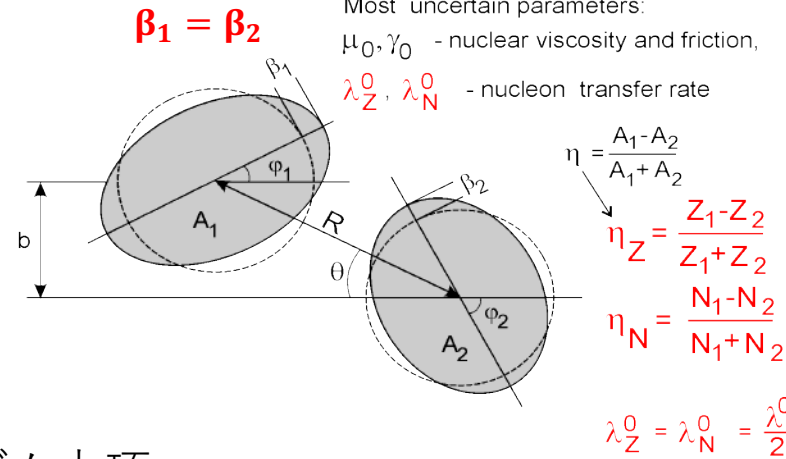
$$\frac{dl}{dt} = -\frac{\partial V}{\partial \theta} - \gamma_{tang} \left(\frac{l}{\mu_R R} - \frac{L_1}{\xi_1} a_1 - \frac{L_2}{\xi_2} a_2 \right) R + R g_{tang} R_{tang}(t),$$

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

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

$$a_{1,2} = \frac{R}{2} \pm \frac{(R_1 - R_2)}{2}$$

摩擦項 ランダム力項



R : 原子核の中心間距離
 $R_{1,2}$: 原子核の半径
 θ : 相対方向
 l : 相対角運動量
 $\varphi_{1,2}$: 回転角度
 $\xi_{1,2}$: 慣性モーメント
 $L_{1,2}$: 角運動量
 γ_{tang} : 接線方向の摩擦

γ_{ij} : Wall and Window dissipation (Friction) g_{ij} : Random force (fluctuation) $\sum_k g_{ik} g_{jk} = T \gamma_{ij}$: Einstein relation
 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)

理論模型

質量の移行

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{2}{A_{CN}} D^{(1)}(\alpha) + \frac{2}{A_{CN}} \sqrt{D^{(2)}(\alpha)} \Gamma(t)$$

$$\alpha = \frac{A_1 - A_2}{A_{CN}}$$

$$D^{(1)} = \lambda(A \rightarrow A+1) - \lambda(A \rightarrow A-1)$$

$$D^{(2)} = \frac{1}{2} [\lambda(A \rightarrow A+1) + \lambda(A \rightarrow A-1)]$$

$$\lambda^{(\pm)} = \lambda_0 \sqrt{\frac{\rho(A \pm 1)}{\rho(A)}} P_r(R; A \rightarrow A \pm 1)$$

$$\approx \lambda_0 \exp\left(\frac{V(R, \delta, A \pm 1) - V(R, \delta, A)}{2T}\right) P_r(R; A \rightarrow A \pm 1)$$

中性子と陽子の移行

$$\frac{d\alpha_N}{dt} = \frac{2}{N_{CN}} D_N^{(1)}(\alpha_N) + \frac{2}{N_{CN}} \sqrt{D_N^{(2)}} \Gamma(t),$$

$$\frac{d\alpha_Z}{dt} = \frac{2}{Z_{CN}} D_Z^{(1)}(\alpha_Z) + \frac{2}{Z_{CN}} \sqrt{D_Z^{(2)}} \Gamma(t),$$

$$\alpha_N = \frac{2N - N_{CN}}{N_{CN}},$$

$$\alpha_Z = \frac{2Z - Z_{CN}}{Z_{CN}},$$

Drift

Diffusion

$$D_{N,Z}^{(1)} = \lambda_{N,Z}(A \rightarrow A+1) - \lambda_{N,Z}(A \rightarrow A-1),$$

$$D_{N,Z}^{(2)} = \frac{1}{2} \{ \lambda_{N,Z}(A \rightarrow A+1) + \lambda_{N,Z}(A \rightarrow A-1) \}.$$

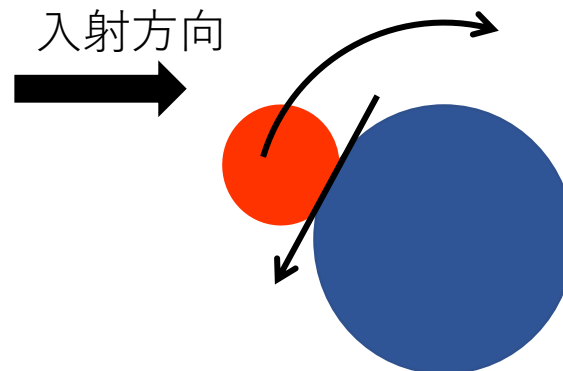
$$\lambda_{N,Z}^{(\pm)} = \lambda_{N,Z}^0 \sqrt{\frac{\rho(A \pm 1)}{\rho(A)}} P_{N,Z}^{tr}(z, \delta, A \rightarrow A \pm 1),$$

$$\lambda_0^N = \lambda_0^Z = \frac{\lambda^0}{2}.$$

パラメータ-現象学的な観点から

Tangential friction (γ_t)

原子核の接線方向の摩擦係数
核力・フラグメントの角運動量に影響



摩擦の大きさは温度依存性がある

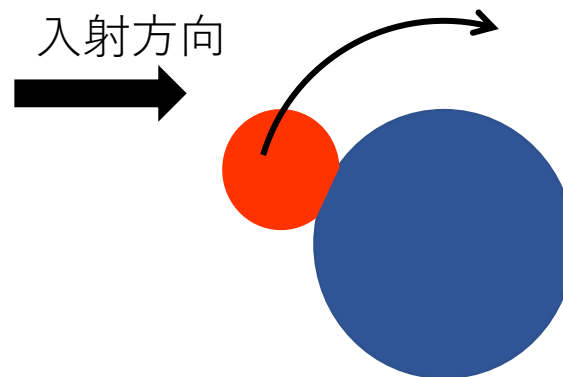
Deubler H H and Dietrich K 1977 *Nucl. Phys. A* 277 493

γ_t は入射チャンネルによって
変化させるべき

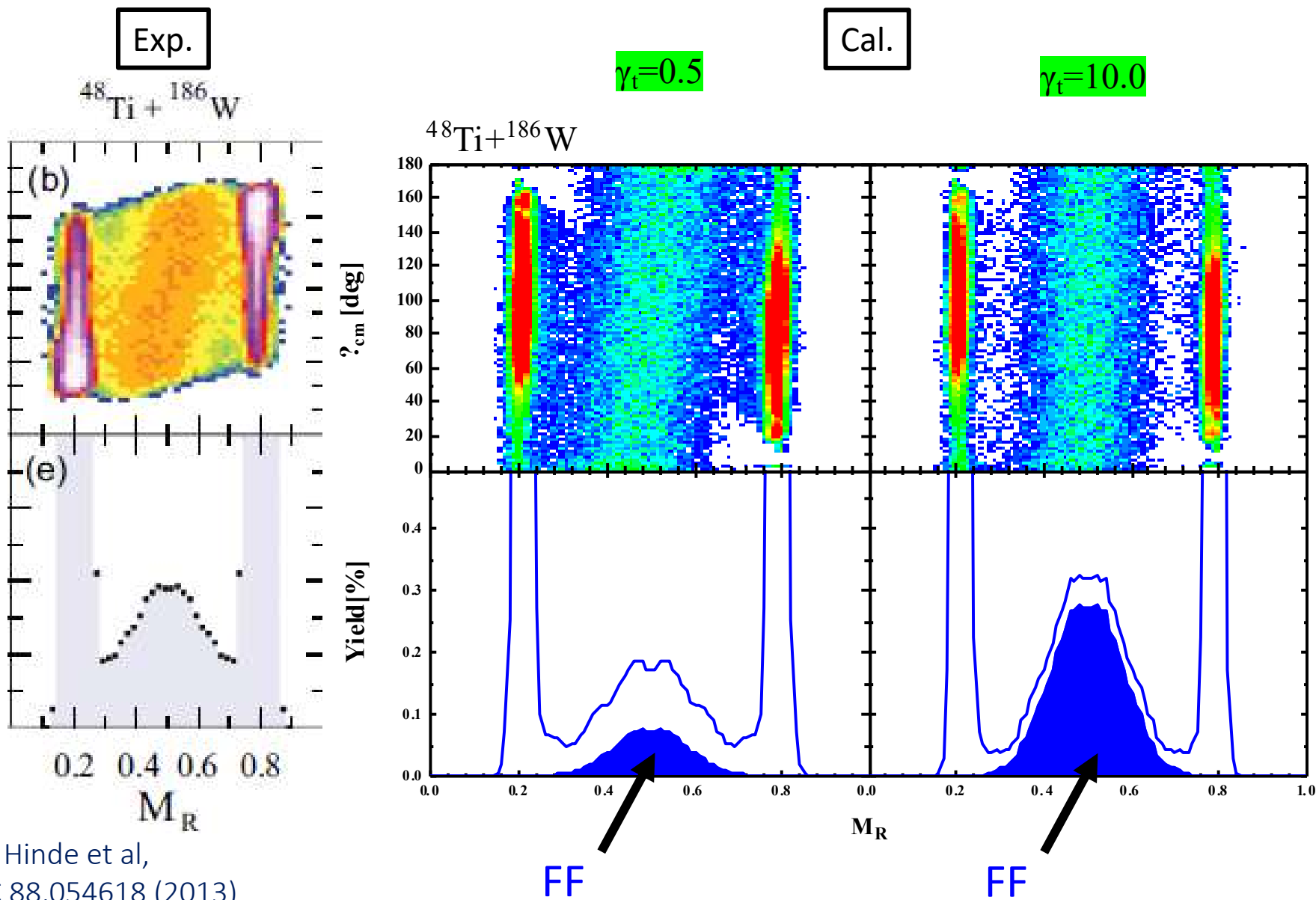
Fact_iner

剛体の慣性モーメントにfactorを掛ける
原子核の動きやすさに影響

原子核は超流動状態



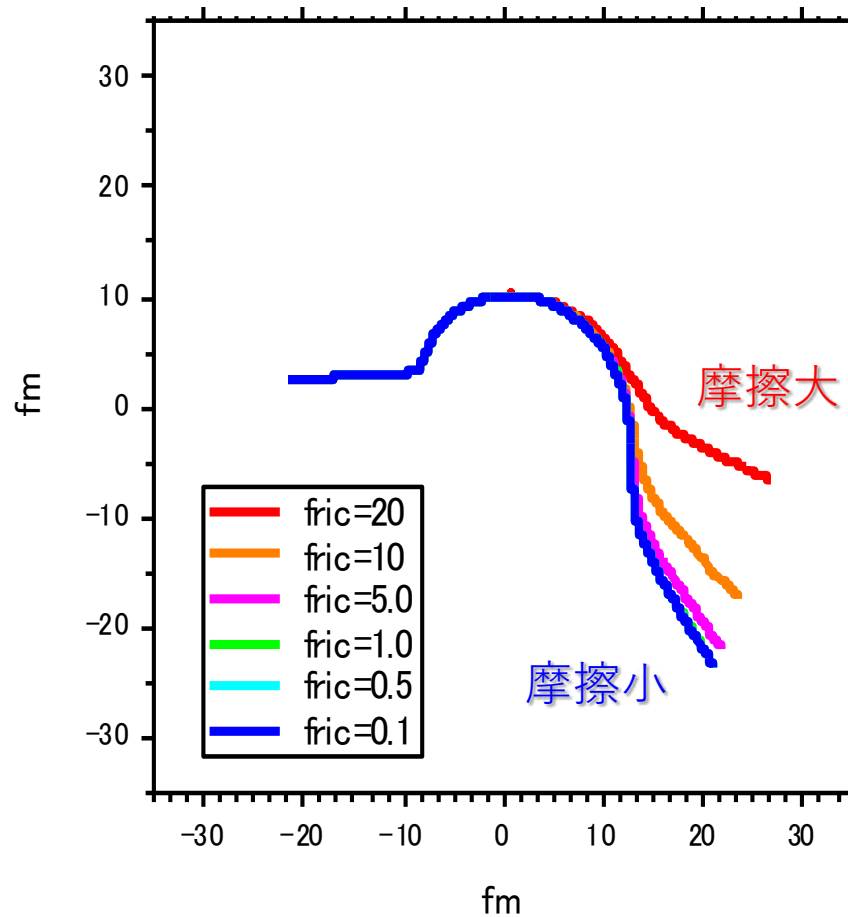
γ_t による質量角度分布



3. $^{86}\text{Kr}+^{166}\text{Er}$ の原子核の軌道 (frictionを 0.1~20.0 まで変化させた場合)

Fact_iner = 1.5
L=80
Tadi=1.0E-21

$E_{cm}=464.0\text{MeV}$



揺動項なし

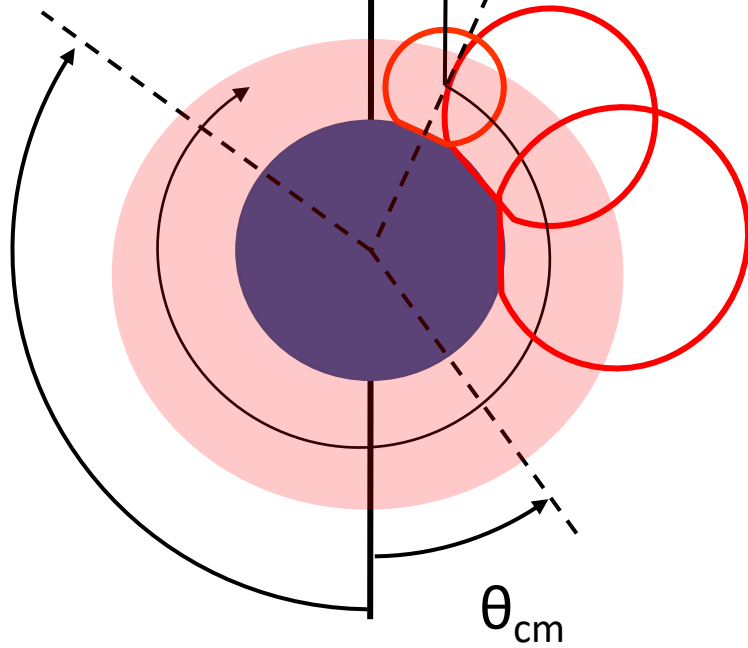
γ_t の違いにおける反応概要図

入射方向



移行核子数増
擦り込み小

一体になった後 質量対称分裂を起こす

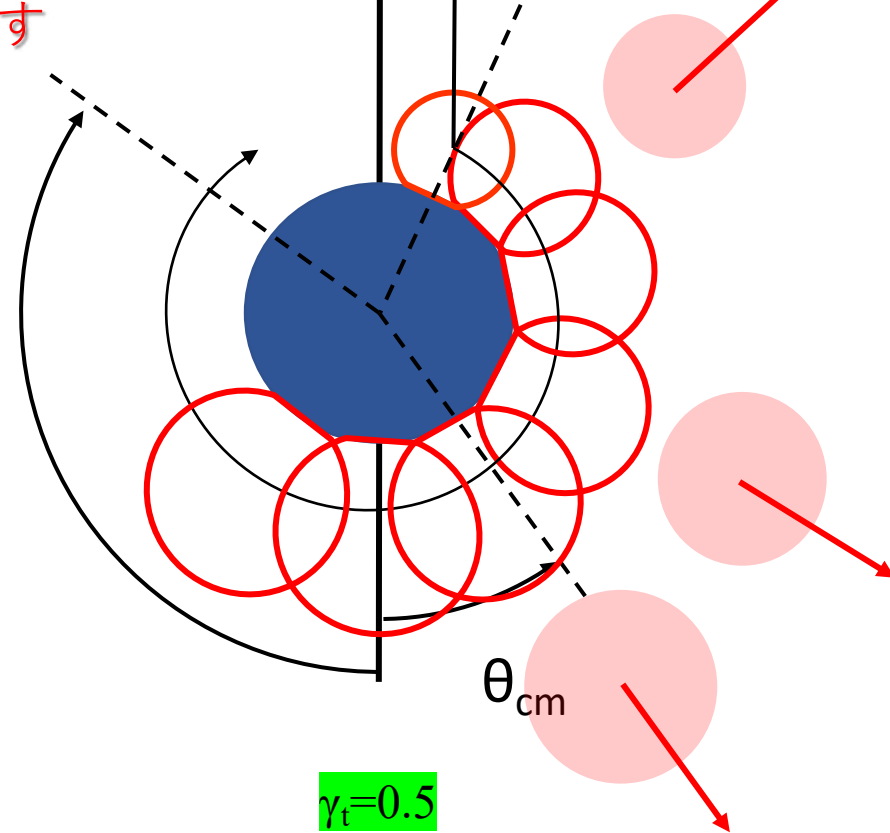


$\gamma_t=10$

入射方向



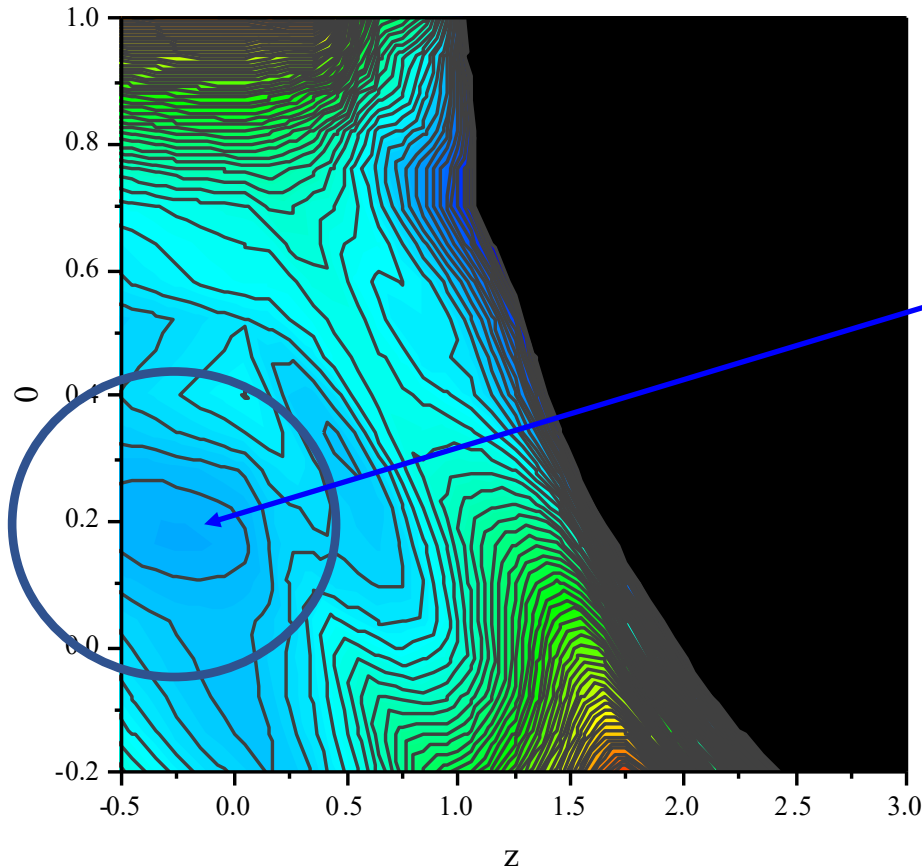
移行核子数減
擦り込み大



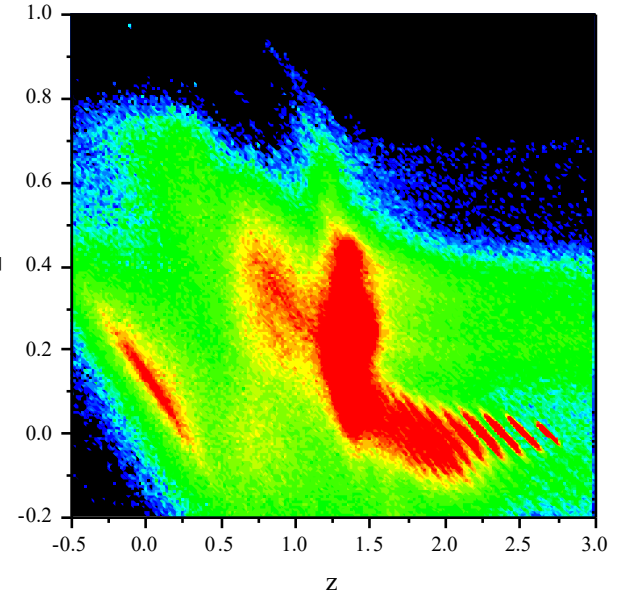
$\gamma_t=0.5$

斜めの相関が出るときの違いは
軌道の振る舞いから発見できるのか？

$\alpha=0$

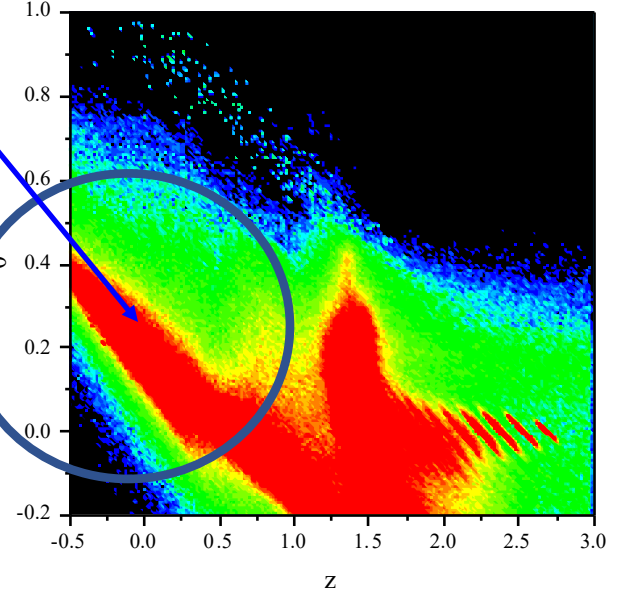


$\gamma_t=0.5$



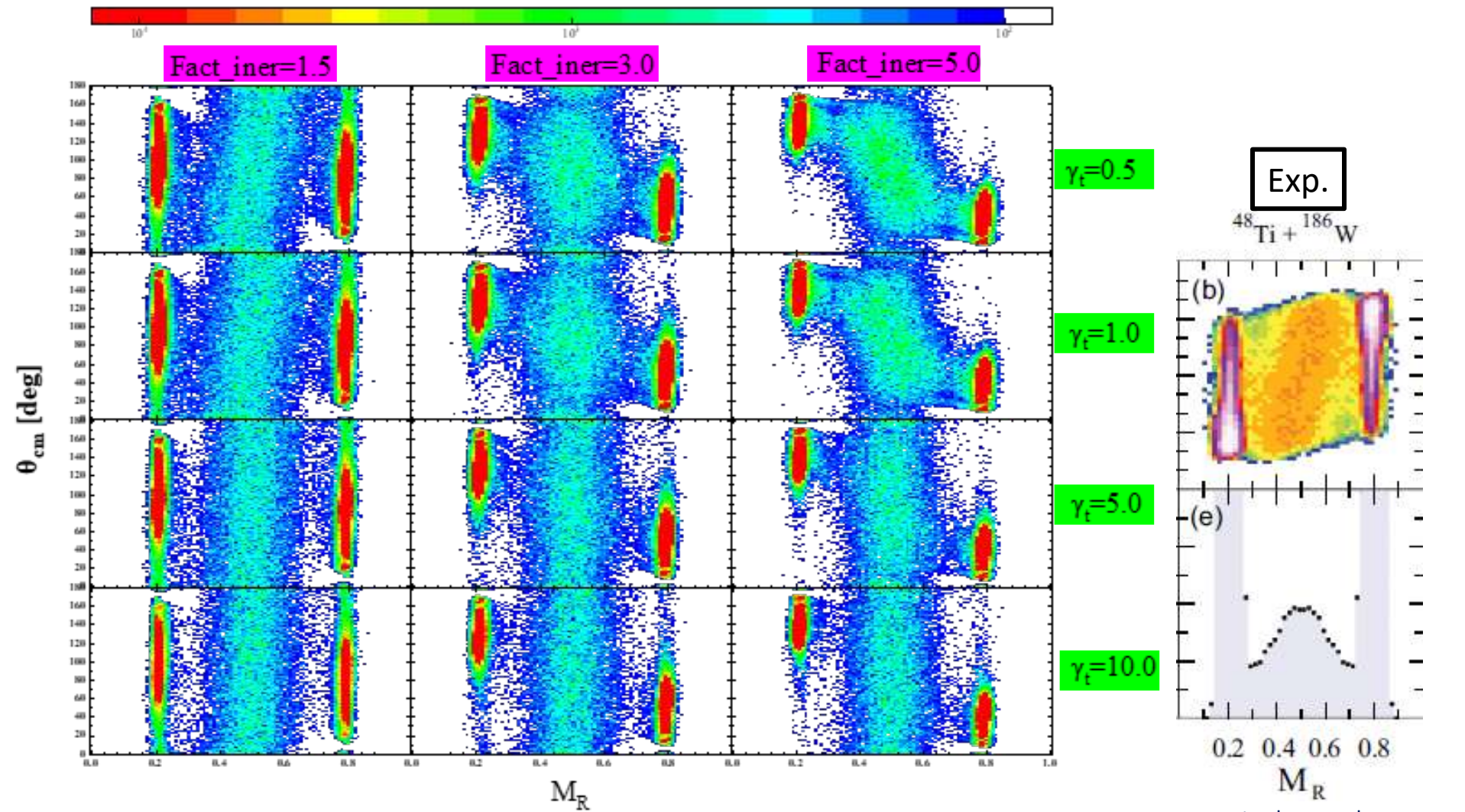
複合核領域

$\gamma_t=10$



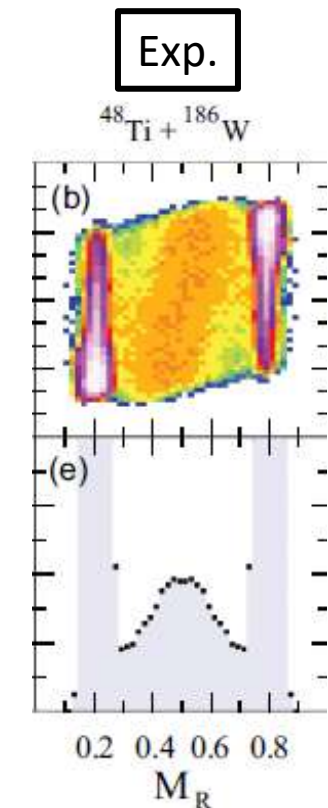
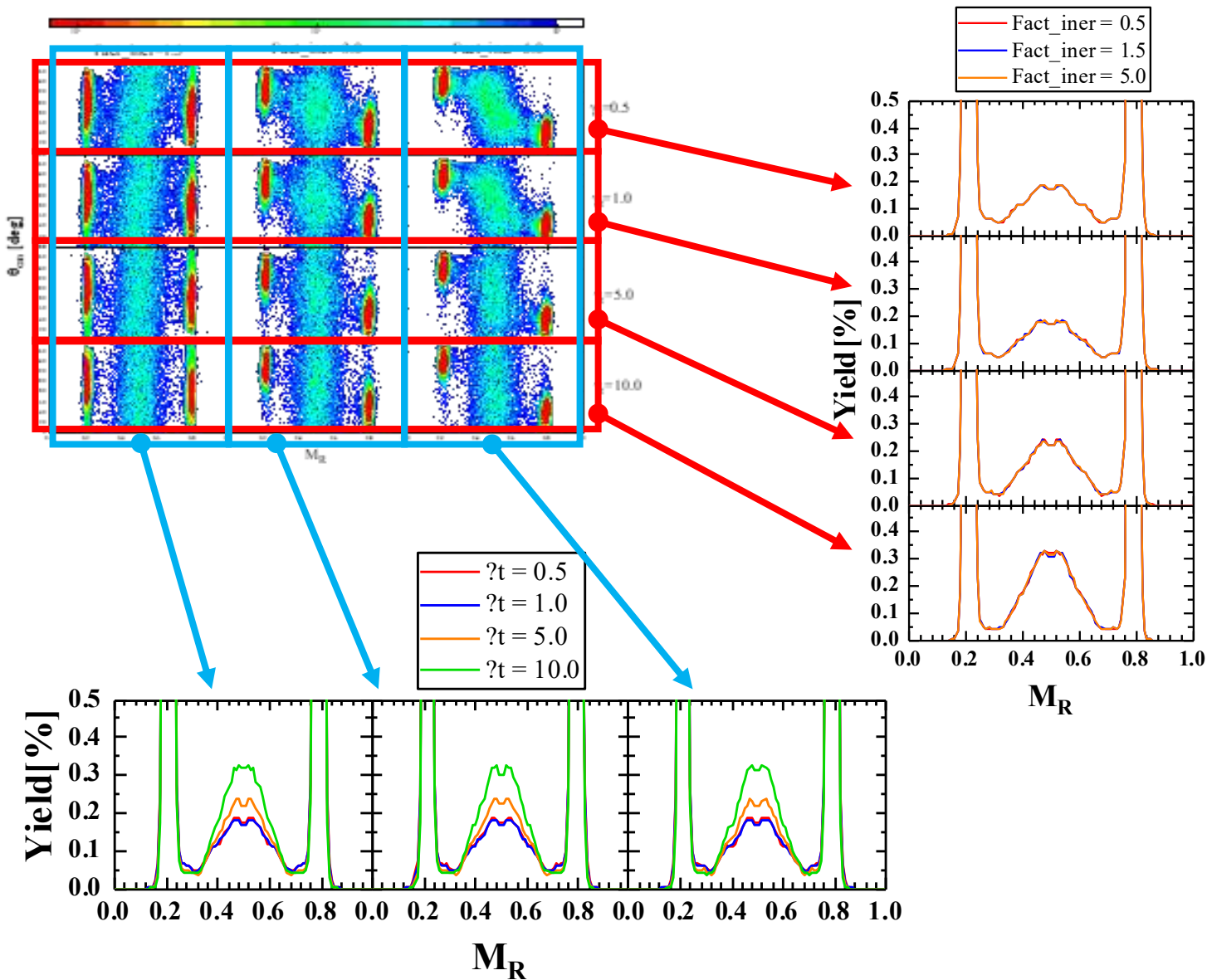
Mass Angle Distribution Langevin Calculation

$^{48}\text{Ti} + ^{186}\text{W}$ Exp. Australian National University

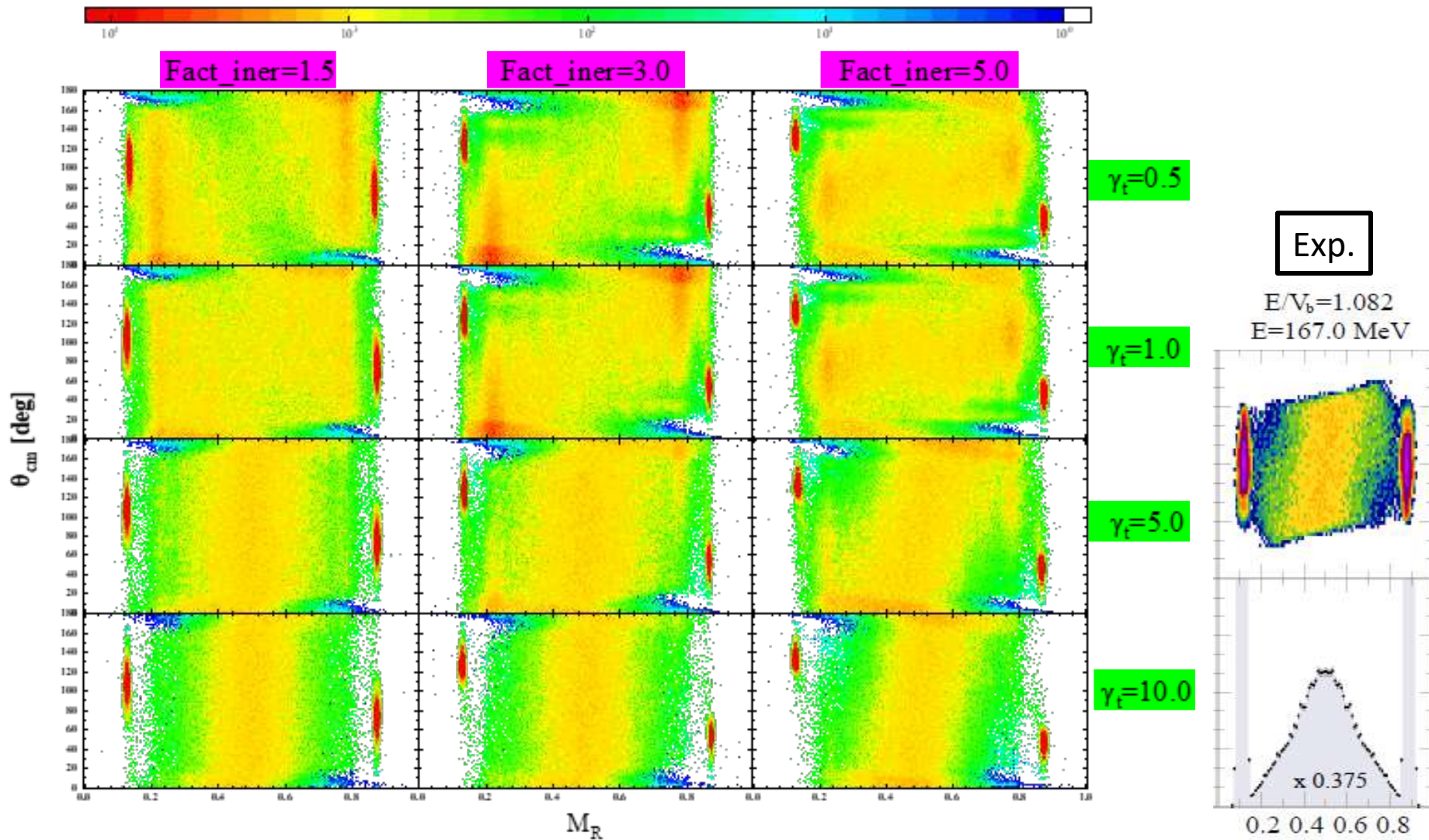


$E_{\text{cm}}=187.87\text{MeV}$

パラメータによる質量分布への影響



Mass Angle Distribution Langevin Calculation $^{34}\text{S}+^{232}\text{Th}$ Exp. Australian National University



E_{cm}=168.75MeV

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

まとめ

☑我々のモデル内で質量角度分布の実験結果の再現性

□未知核の生成におけるパラメータの検討

今後の課題

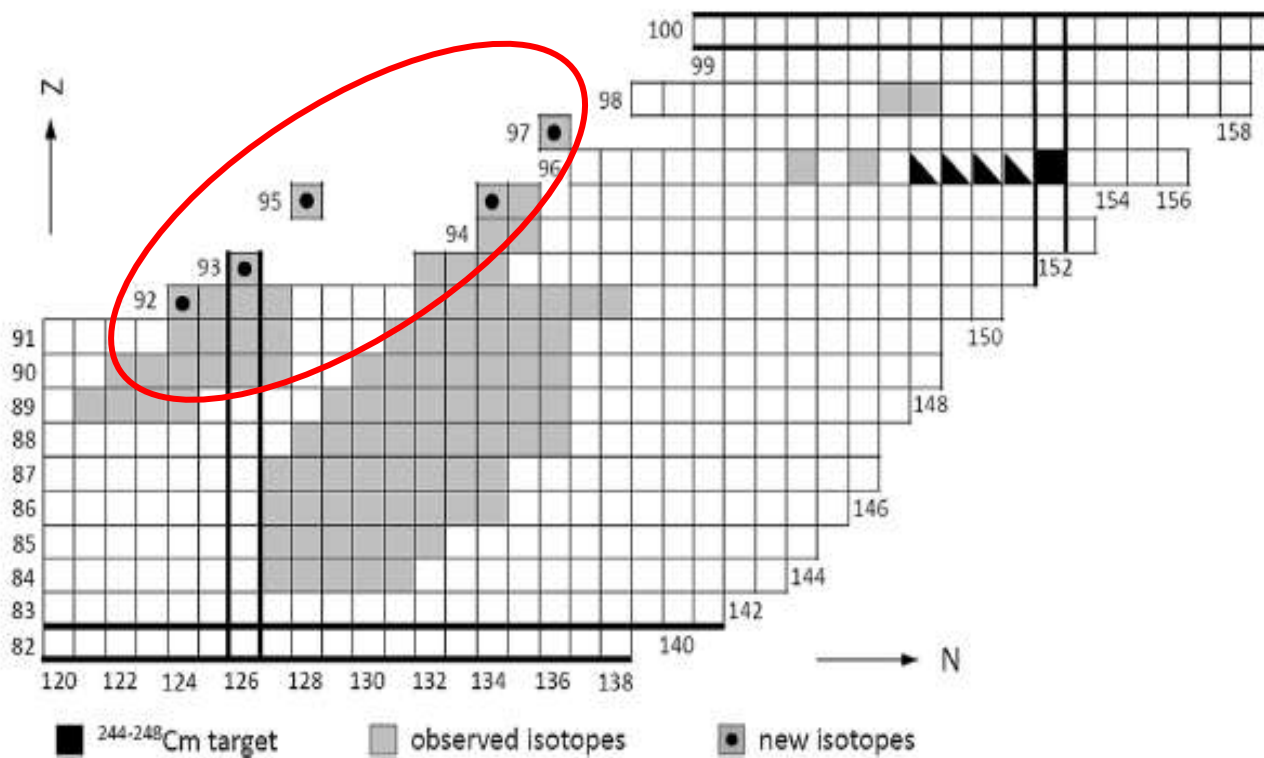
- 反応系とパラメータに相関があると仮定して計算を進める
- 融合確率の評価方法
 - 質量と放出角度の情報を合わせることで融合確率にアプローチできないか

$^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm}$ を用いた核子移行反応

S.Heinz(GSI, 2016)の実験

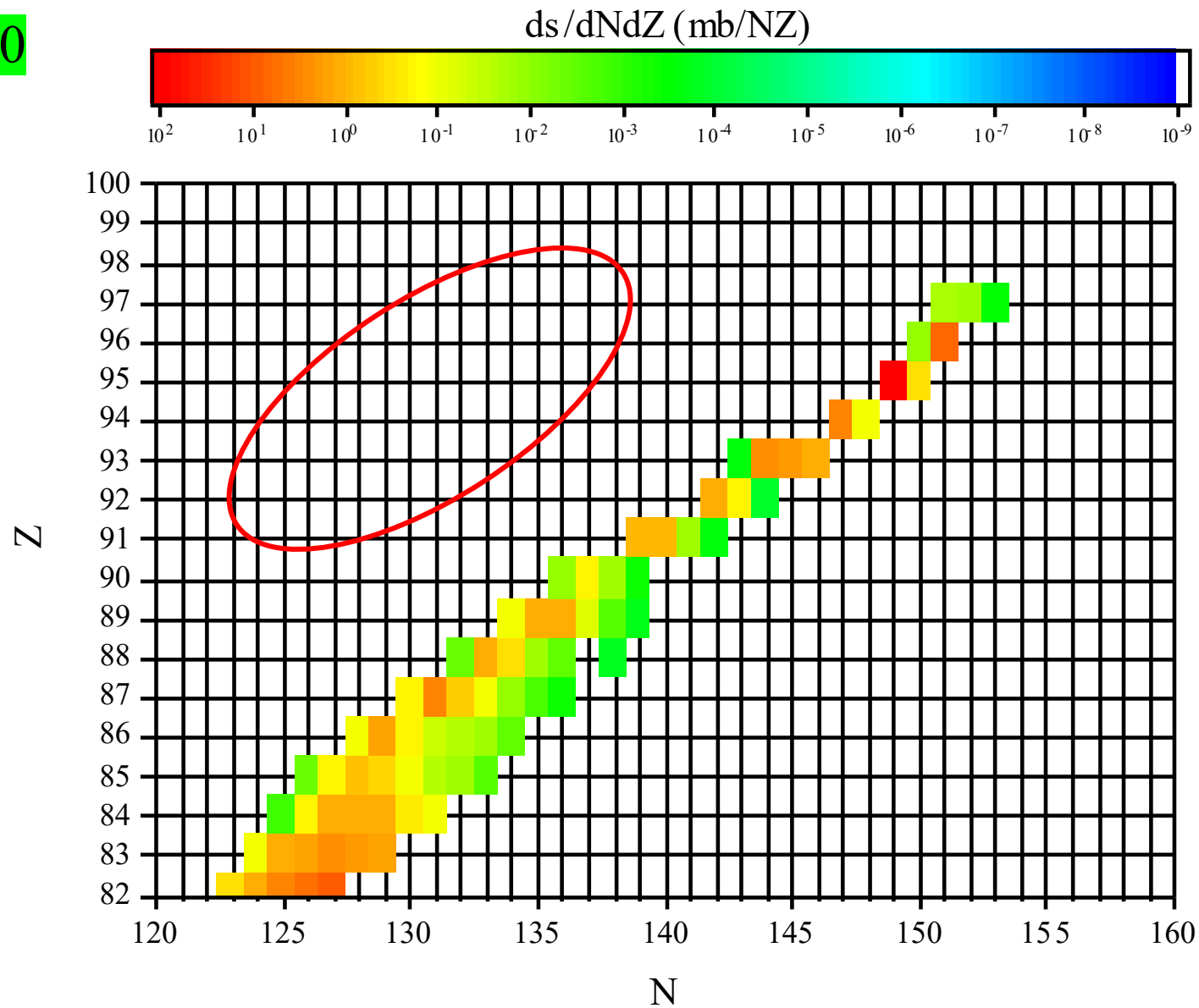
- Transactinide-nuclei の生成

新しい中性子欠乏核が生成された



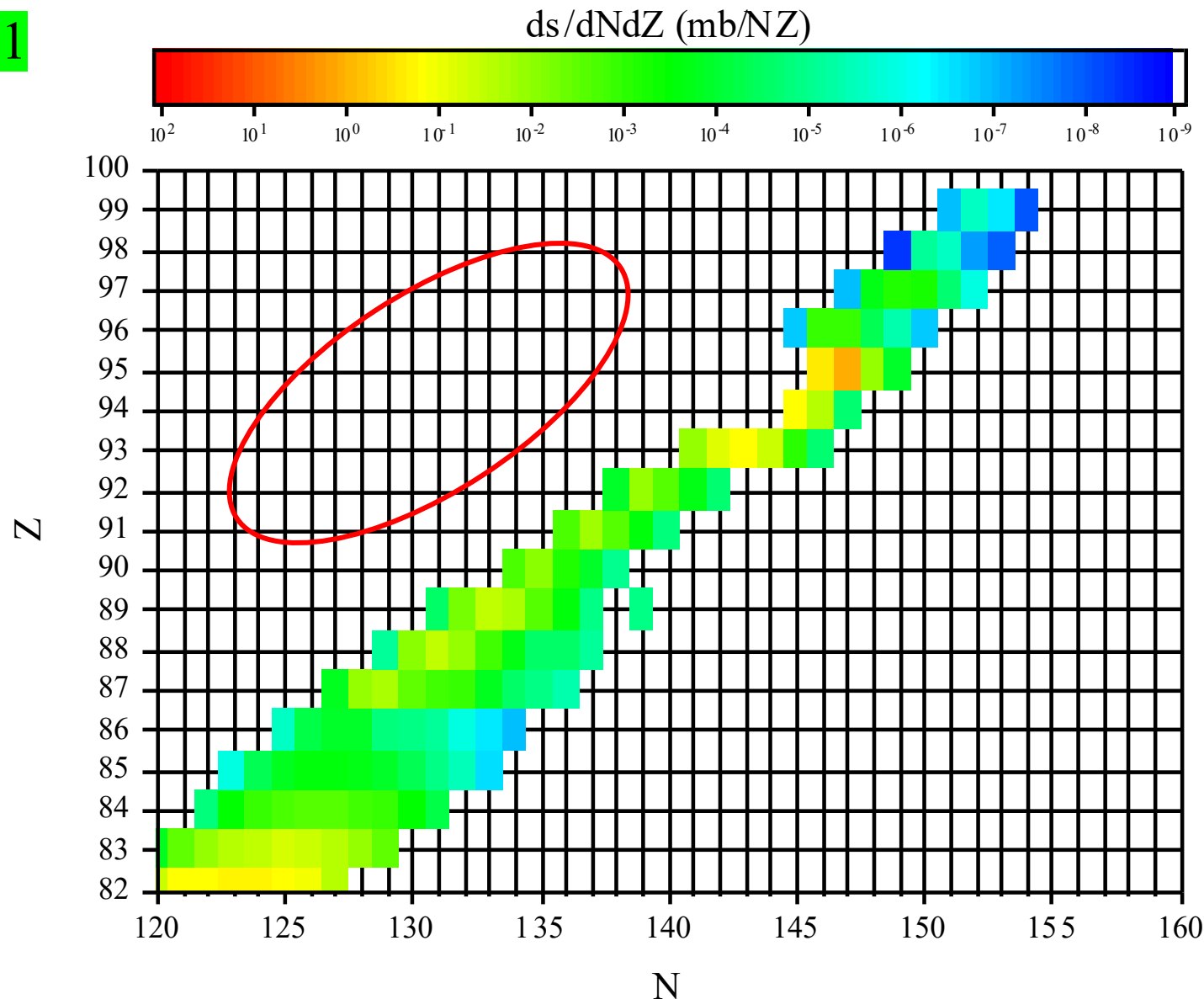
Neutron-Proton contour map

$\gamma_t = 5.0$



Neutron-Proton contour map

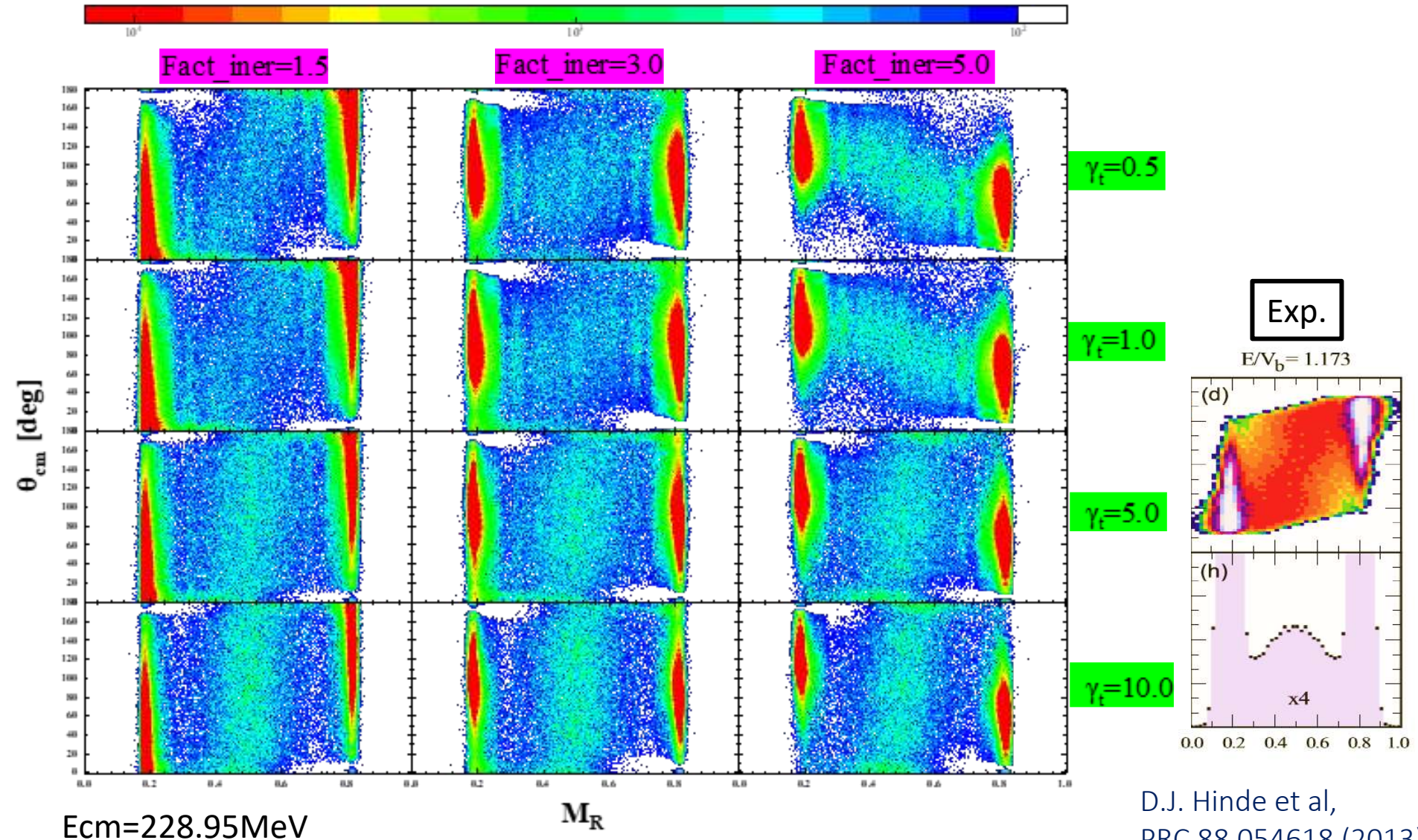
$\gamma_t = 0.1$



ご清聴ありがとうございました

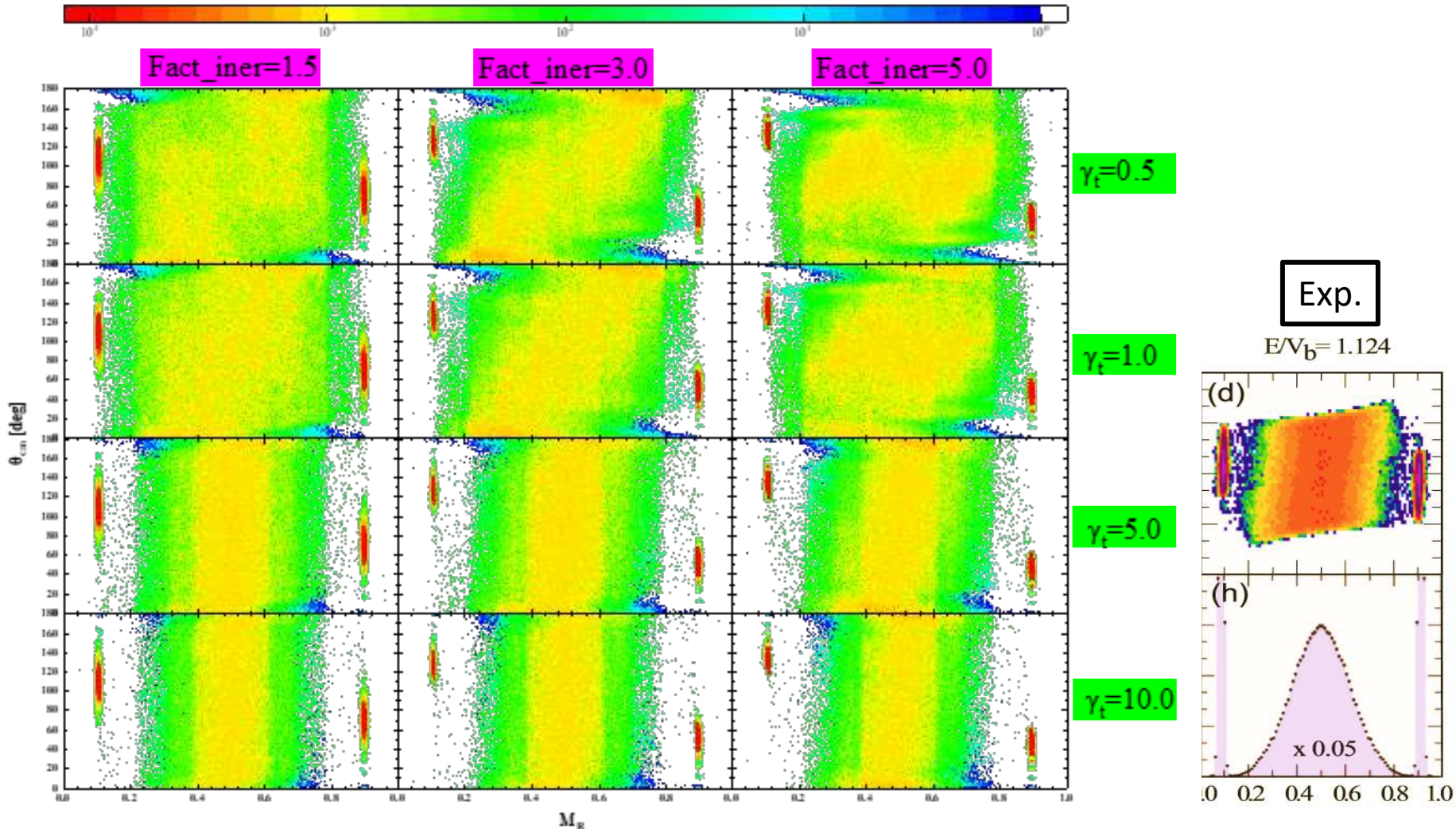
Mass Angle Distribution Langevin Calculation

$^{48}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb}$ Exp. Australian National University



Mass Angle Distribution Langevin Calculation

$^{28}\text{Si}+^{238}\text{U}$ Exp. Australian National University



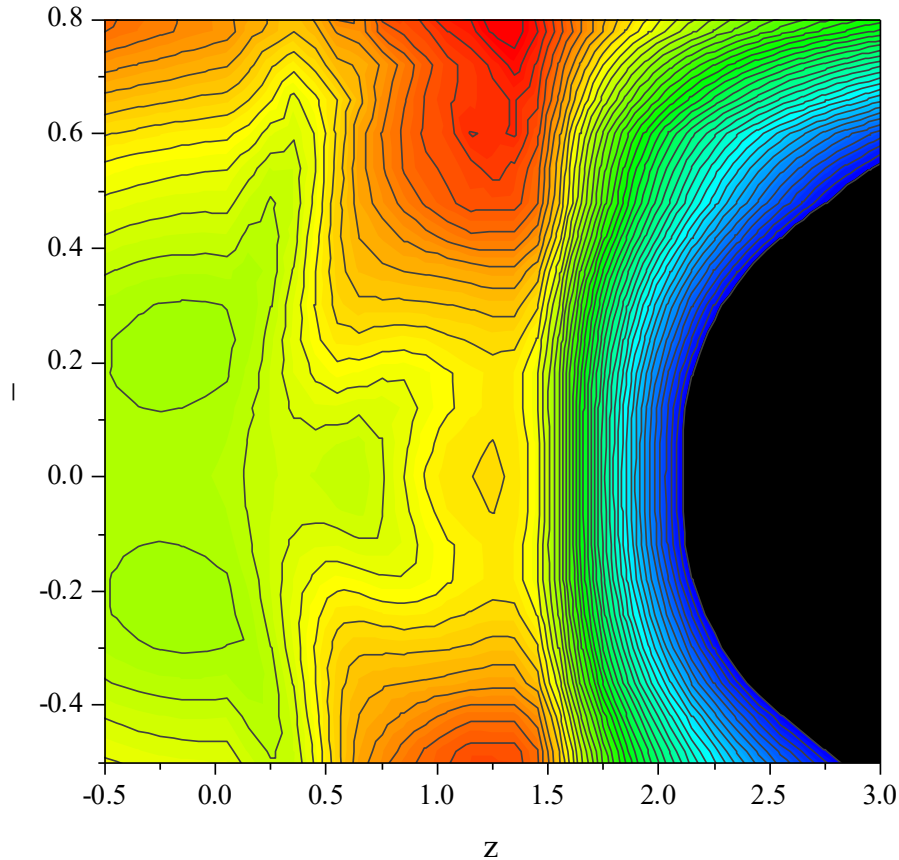
$E_{cm}=149.96\text{MeV}$

D.J. Hinde et al,
PRC 88,054618 (2013)

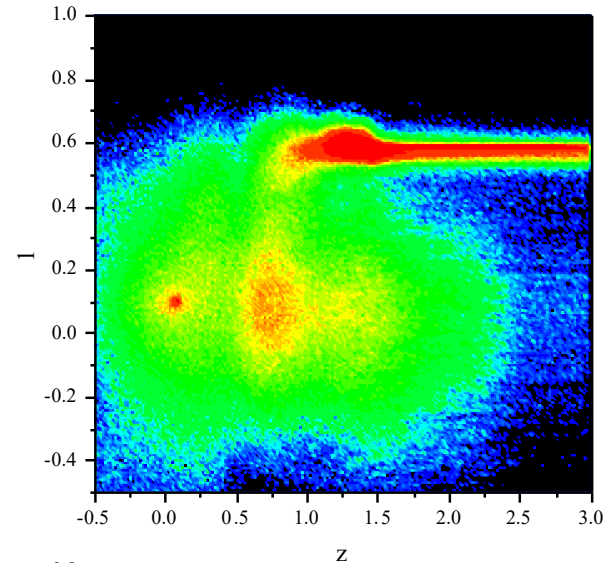
z - α distribution in the reaction $^{48}\text{Ti}+^{186}\text{W}$ at different tangential frictions

斜めの相関が出るときの違いは
軌道の振る舞いから発見できるのか？

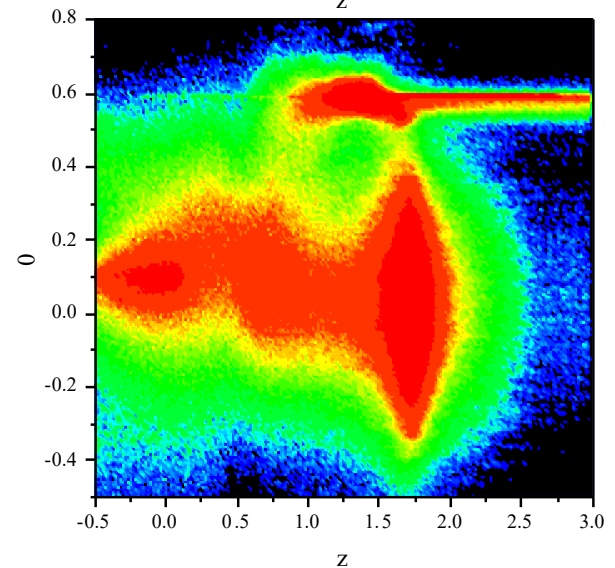
$\delta=0.22$



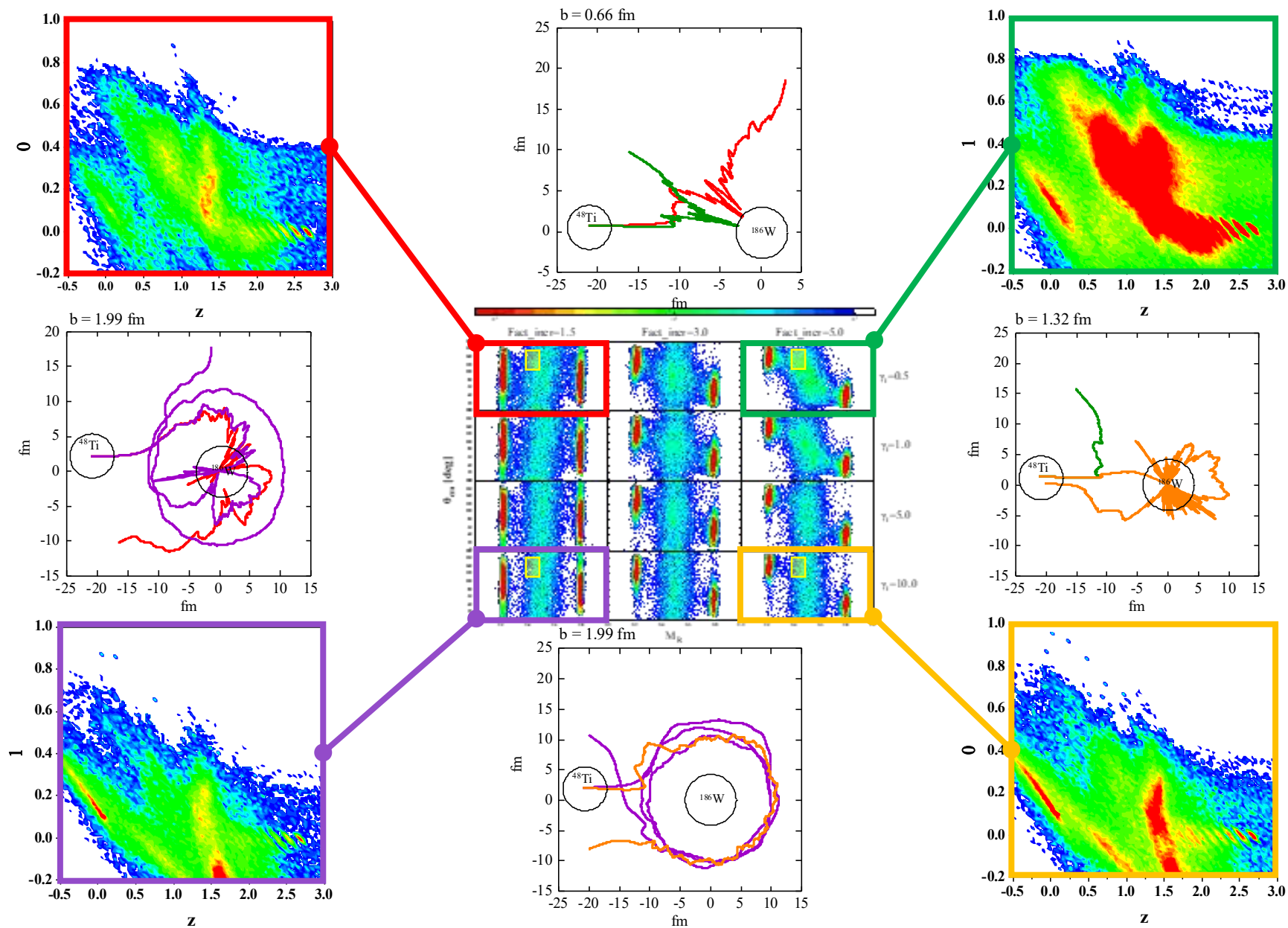
$\gamma_t=0.5$



$\gamma_t=10$

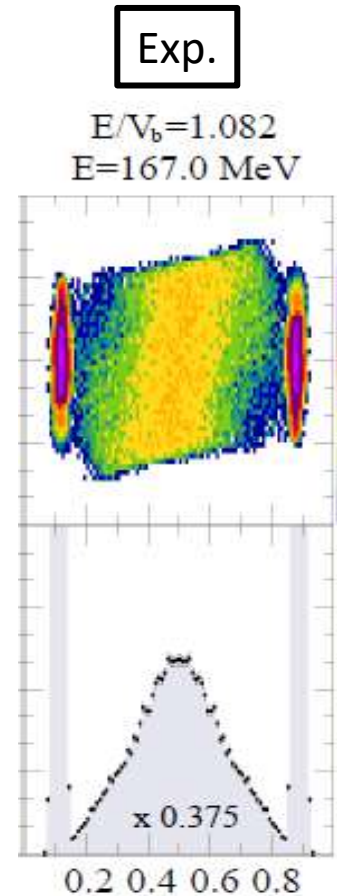
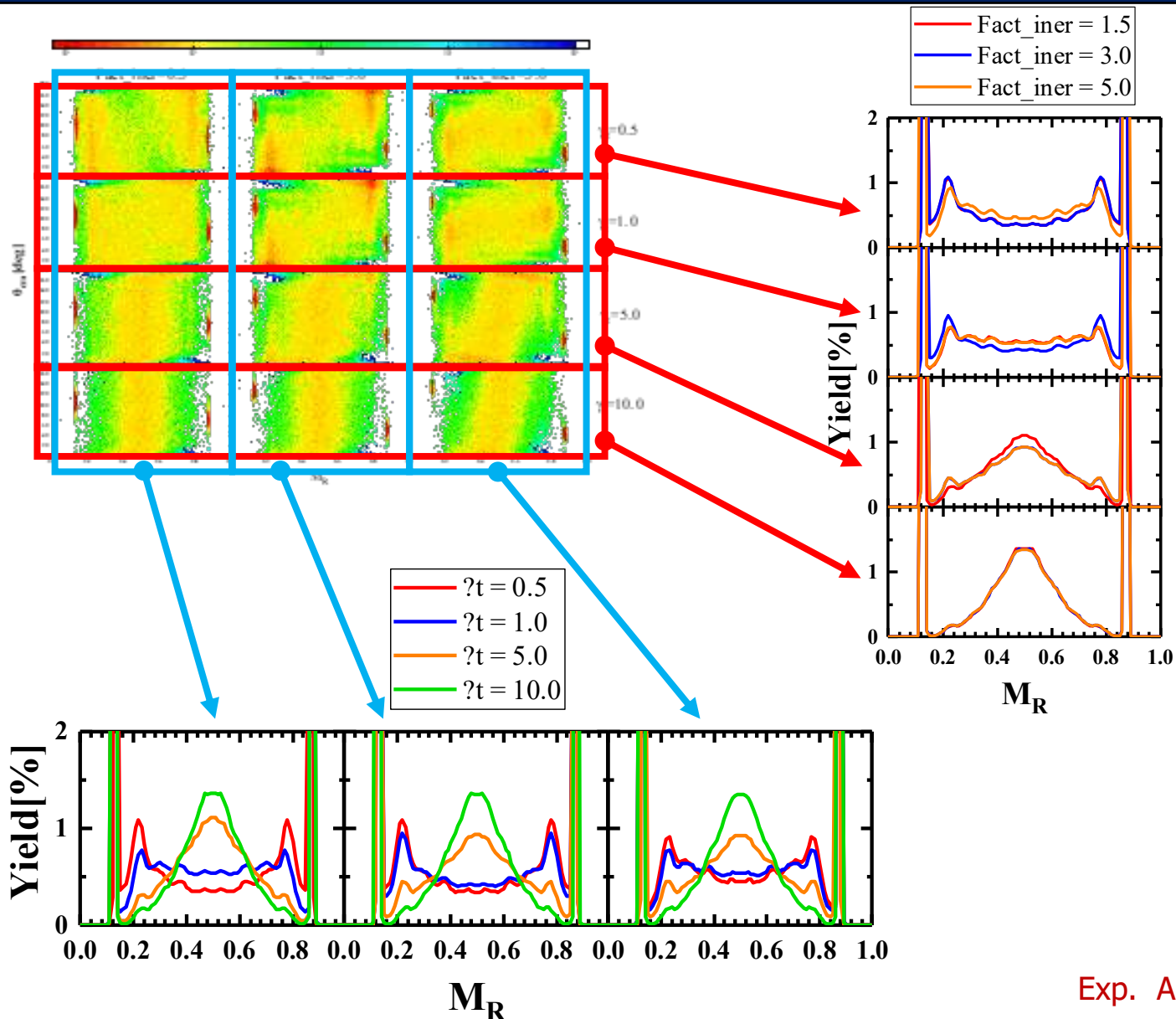


48Ti+186Wにおける ミクロな視点とマクロな視点で見た軌道の差異



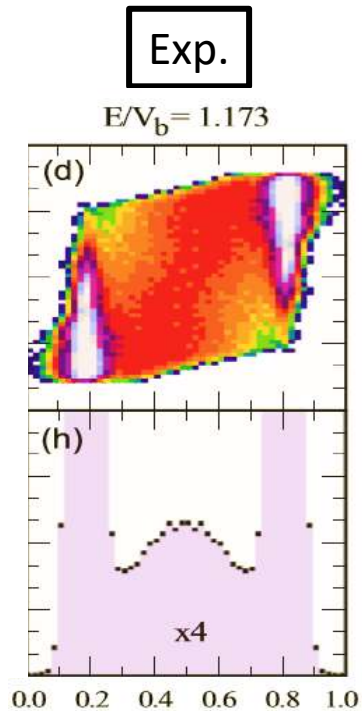
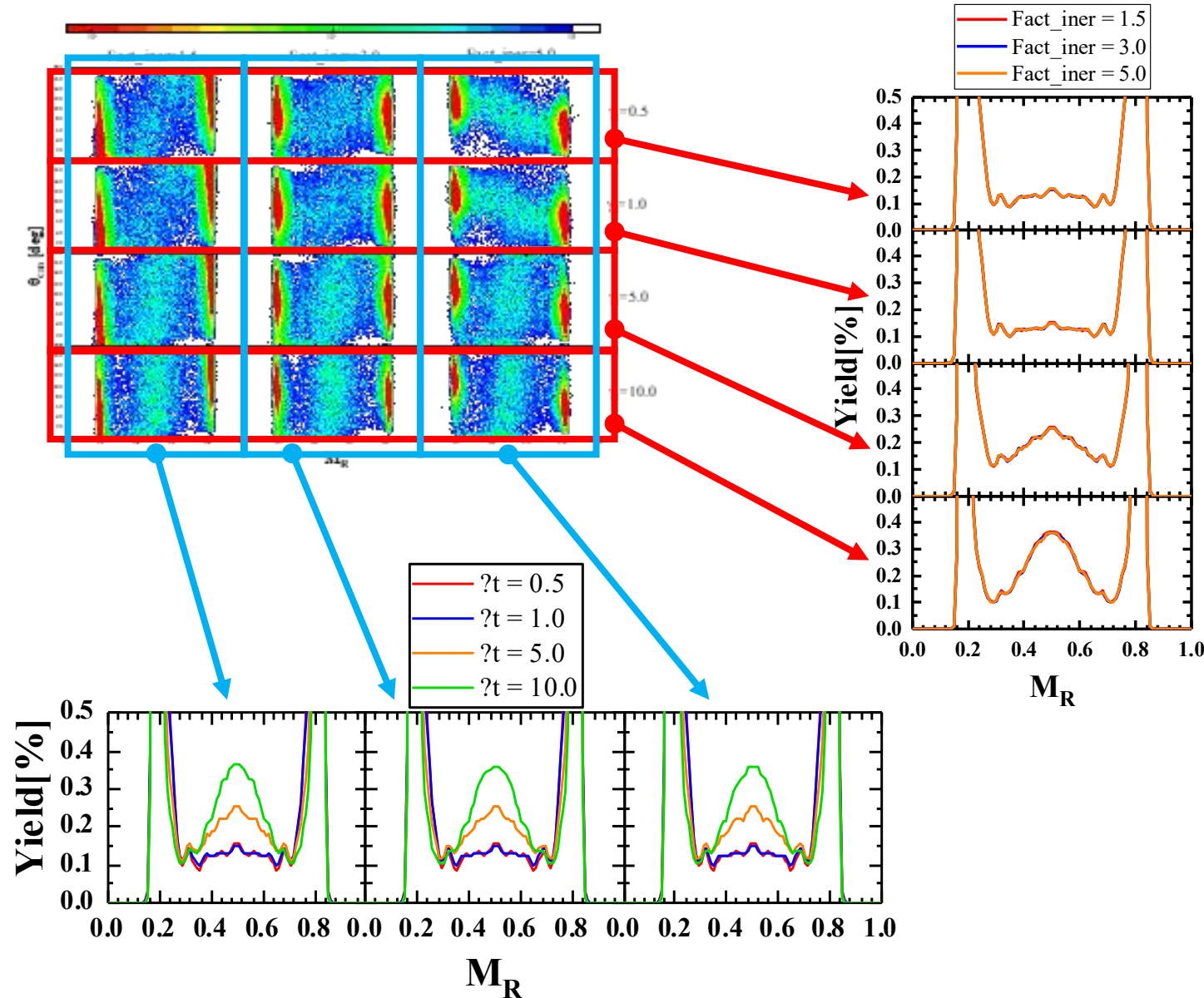
Mass Angle Distribution Langevin Calculation

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



Mass Angle Distribution Langevin Calculation

$^{48}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb}$ Exp. Australian National University



Mass Angle Distribution Langevin Calculation

$^{28}\text{Si} + ^{238}\text{U}$ Exp. Australian National University

