

基于多核子转移反应 $^{238}\text{U} + ^{248}\text{Cm}$ 合成 重核素中的角分布机制研究

—— 第三届“粤港澳”核物理会议



广东·深圳

报告人：杨育

指导老师：祝龙

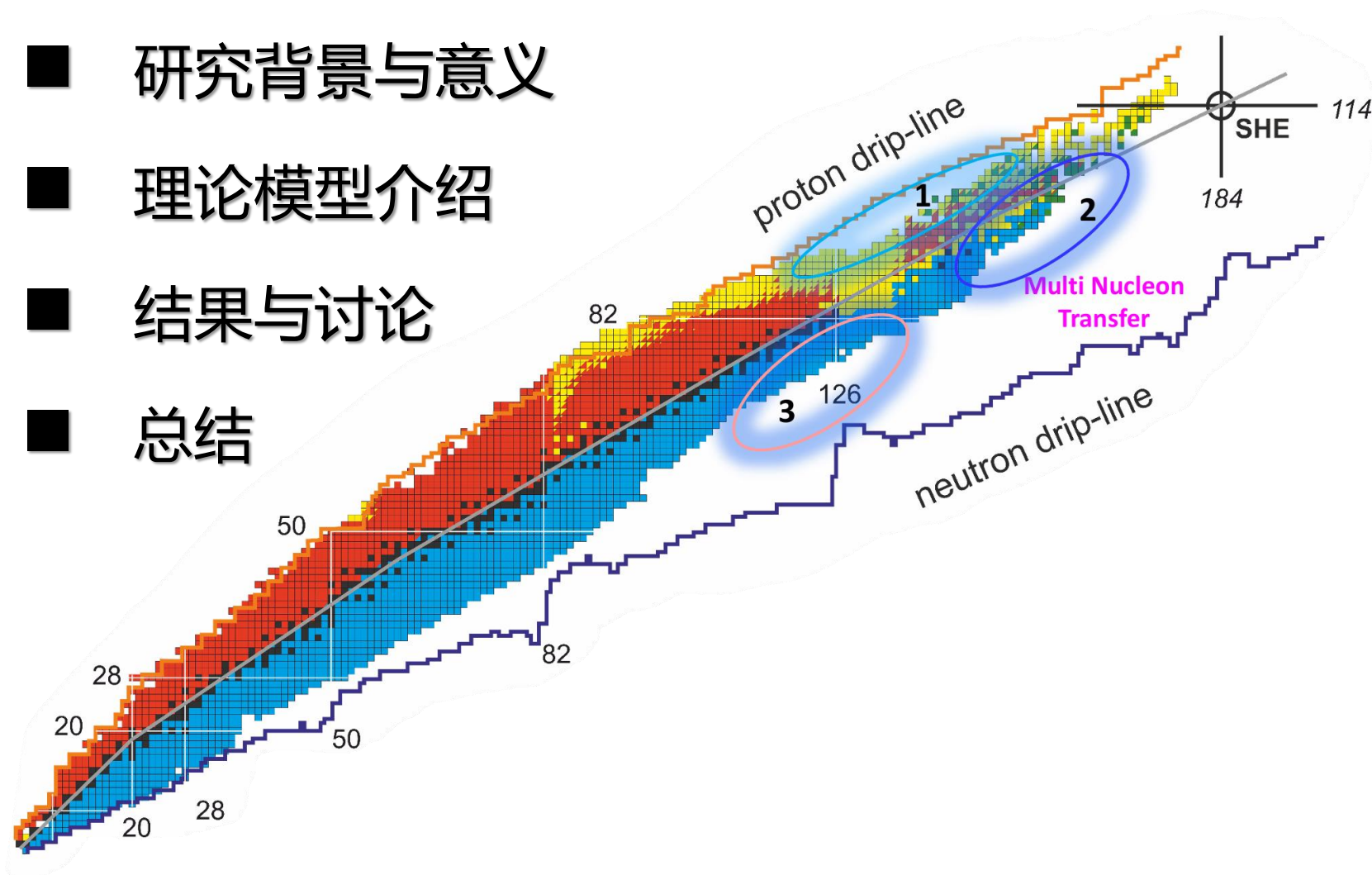
合作者：张丰收老师，刘忠老师，李成老师

■ 研究背景与意义

■ 理论模型介绍

■ 结果与讨论

■ 总结



熔合反应:

- + 任意元素 (概率问题)
- 缺乏中子

- 理论预言存在 ~7000 种核素 (Ref: [Erlar et al., Nature 486 \(2012\) 509](#))
- 目前~3300 种核素已被发现 ([M. Thoennessen, Discovery of isotopes project](#))

碎裂反应:

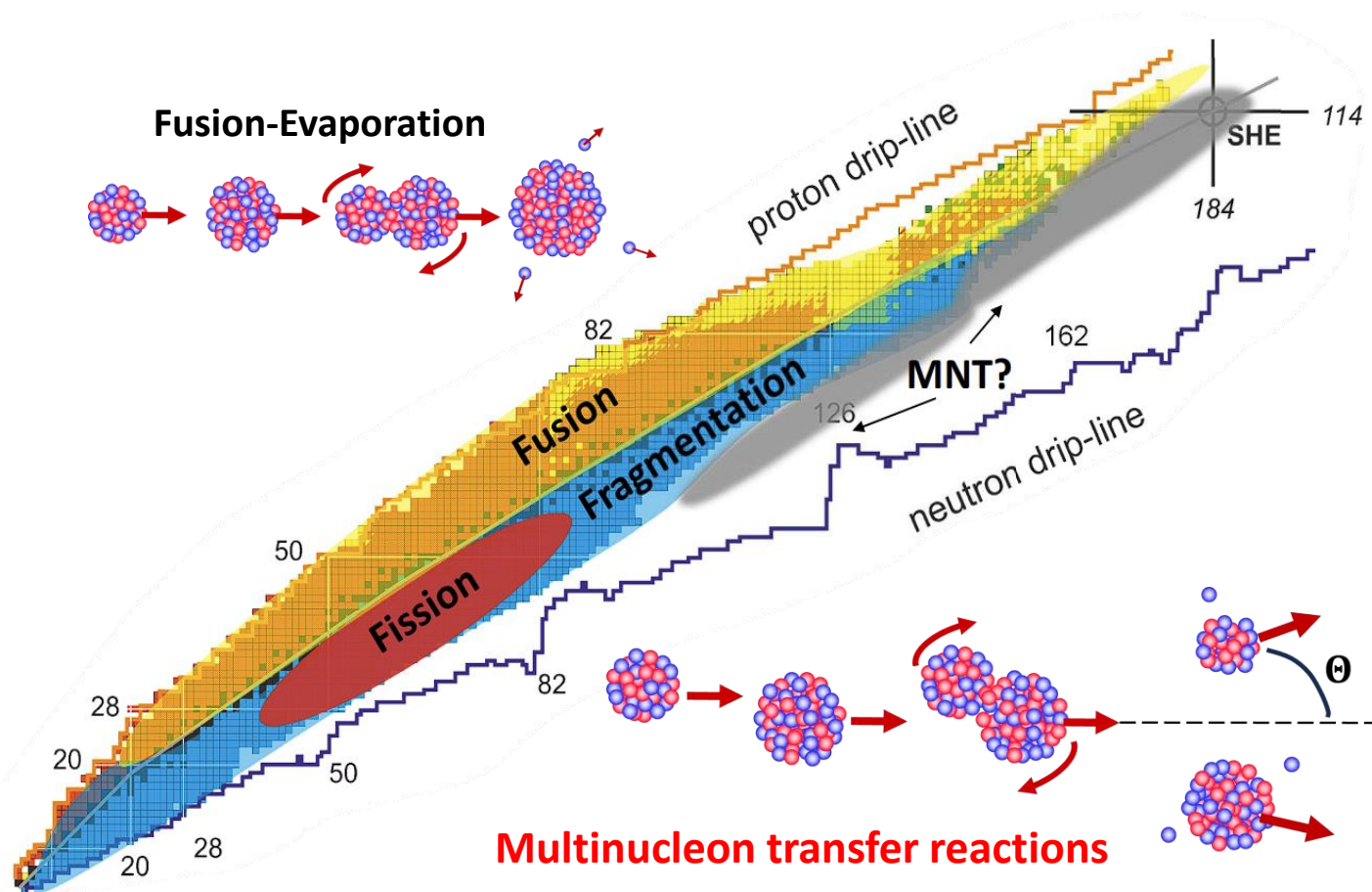
- + 非常高效且通用
- 产物比 ^{238}U 轻

原子核裂变:

- + 丰中子产物
- 产物远轻于 ^{238}U

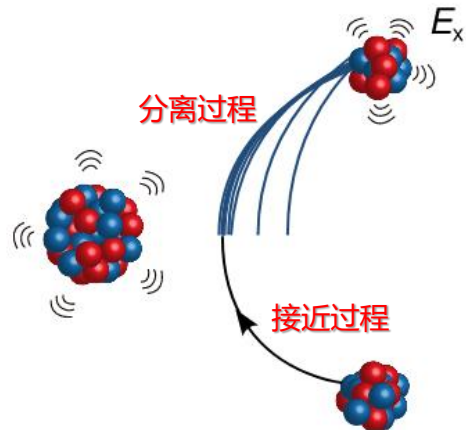
多核子转移反应:

- + 探索未知区域的方法
- 技术上非常复杂
- 缺乏实验数据



MNT反应是探索未知丰质子/中子重核和超重核的有效方法

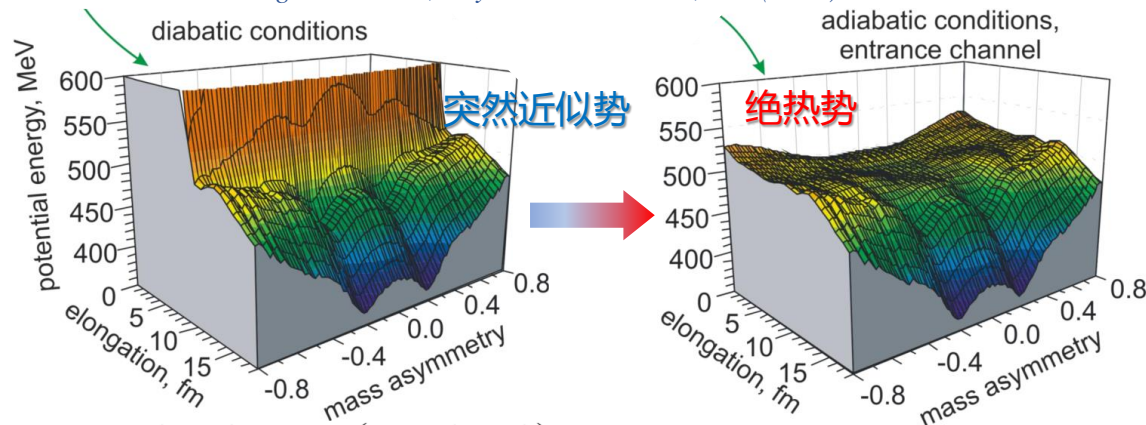
□ 不同的运动学阶段



K. J. Cook et al., Nat Commun 14, 7988 (2023).

□ 突然近似/绝热势的过渡

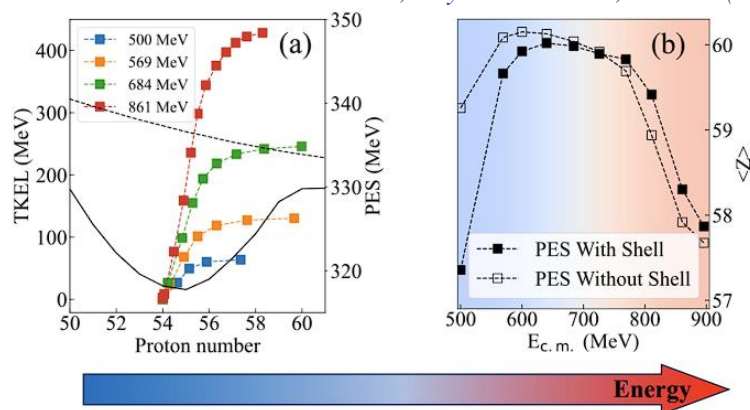
V.I. Zagrebaev et al, Phys. Part. Nuclei 38, 469 (2007).



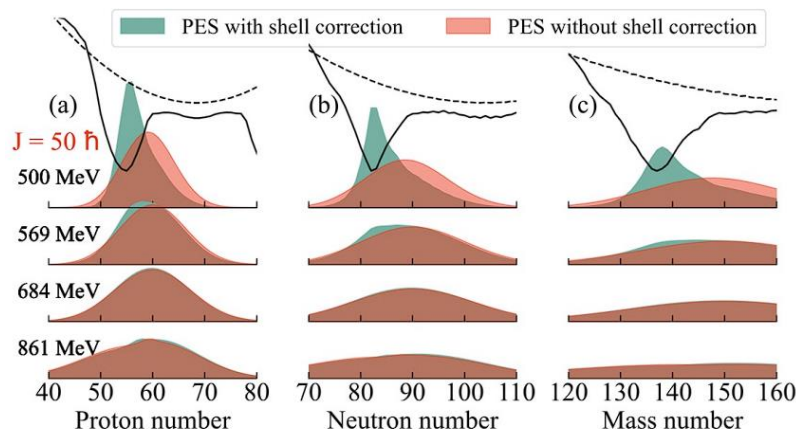
$$V(t) = V_{\text{diab}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{DA}}}\right) + V_{\text{adiab}}(t) \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{DA}}}\right)\right), \quad \tau_{\text{DA}} = 10^{-22} \text{ s}$$

□ 漂移与涨落

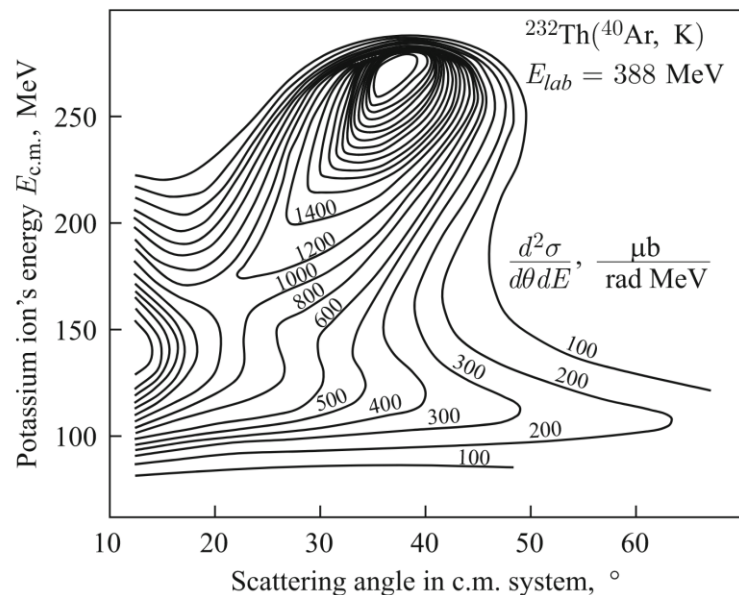
Z. Liao et al, Phys. Rev. C 109, 054612 (2024).



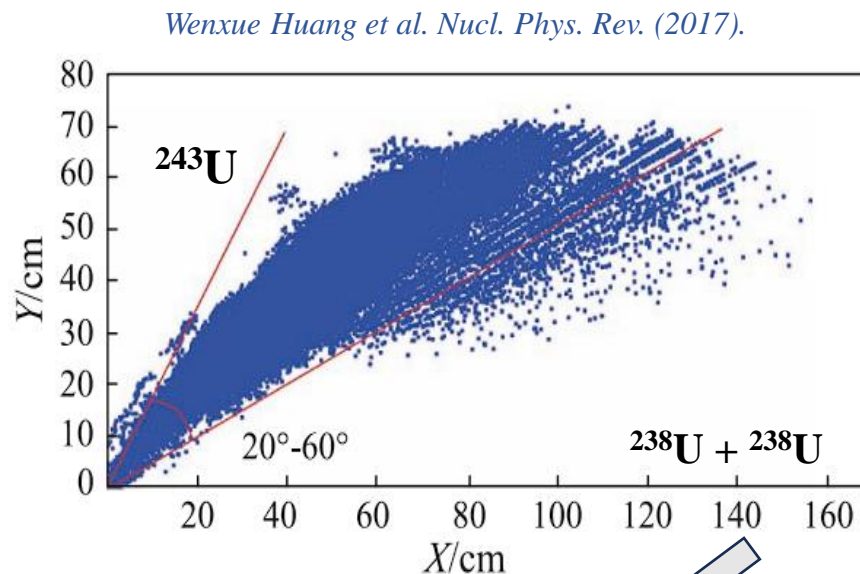
漂移现象 (deterministic)



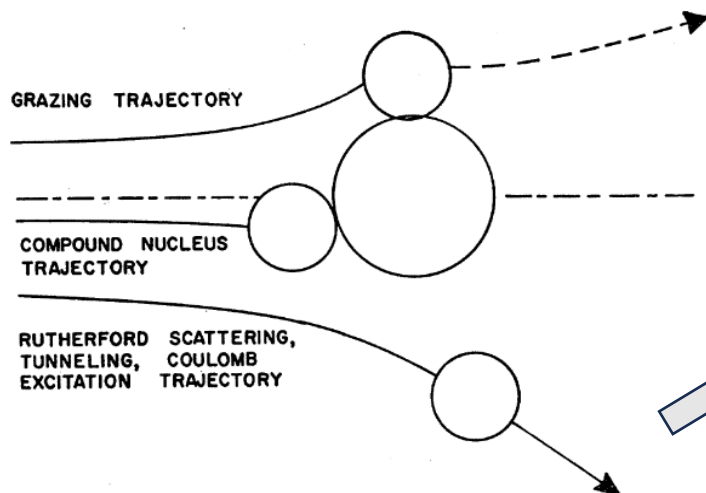
扩散现象 (random distribution)



J. Wilczyński, PHYSICS LETTERS 47, (1973).



Wenxue Huang et al. Nucl. Phys. Rev. (2017).



R. Kaufmann and R. Wolfgang, Phys. Rev. 121, 192 (1961).

- 大的能量耗散
- 众多的反应道
- 各向异性的角分布

产物的收集与分离困难

PHYSICAL REVIEW C

VOLUME 33, NUMBER 4

APRIL 1986

Actinide production in reactions of heavy ions with ^{248}Cm

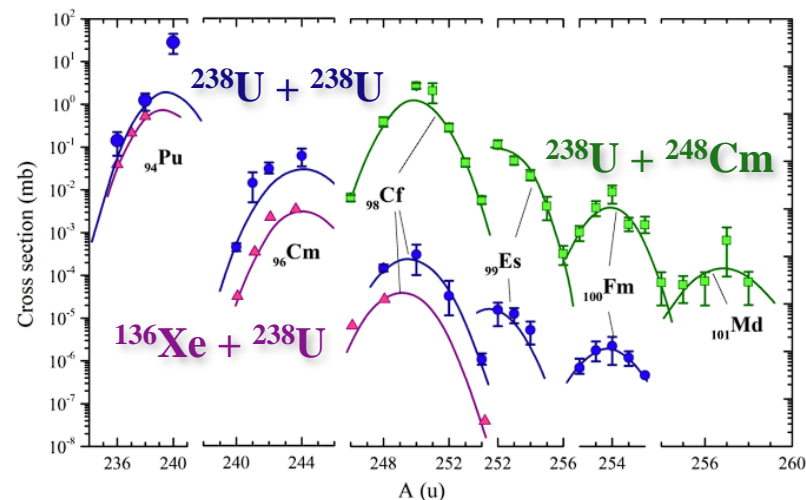
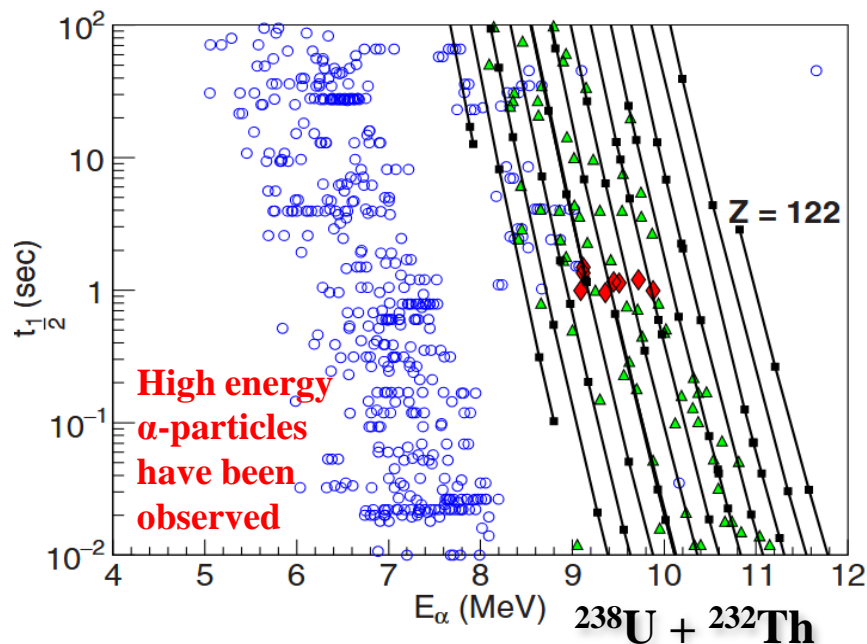
PHYSICAL REVIEW C 88, 054615 (2013)

Reexamining the heavy-ion reactions $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$ and $^{238}\text{U} + ^{248}\text{Cm}$ and actinide production close to the barrier

PHYSICAL REVIEW C 97, 064602 (2018)

Experimental survey of the production of α -decaying heavy elements in $^{238}\text{U} + ^{232}\text{Th}$ reactions at 7.5–6.1 MeV/nucleon

S. Wuenschel,¹ K. Hagel,¹ M. Barbui,¹ J. Gauthier,¹ X. G. Cao,^{2,1} R. Wada,¹ E. J. Kim,^{1,3} Z. Majka,⁴ R. Planeta,⁴ Z. Sosin,^{4,*} A. Wieloch,⁴ K. Zela,⁴ S. Kowalski,⁵ K. Schmidt,⁵ C. Ma,⁶ G. Zhane,² and J. B. Natowitz¹



MNT 产物的分离和检测技术

Experimental technique	σ_{min}	τ_{min}
E-dE-TOF-B ρ	$\sim 1 \mu\text{b}$	0.1–1 μs
Velocity filter + α decay tagging	$\sim 0.5 \text{ nb}$	$\sim 1 \mu\text{s}$
Velocity filter + γ decay tagging	$\sim 1 \mu\text{b}$	$\sim 1 \mu\text{s}$
Radiochemistry + α decay tagging	$\sim 20 \text{ nb}$	$\sim 1 \text{ min. (online tech.)}$ $\sim 30 \text{ min. (offline tech.)}$
Laser ionization		$\sim 1 \text{ s}$
Precision mass measurements		$\sim 1 \text{ s}$

S. Heinz et al, Eur. Phys. J. A 58, 114 (2022).

- 重的弹靶组合有可能合成丰中子重核
- 角分布的研究十分重要

核子的波函数表示为高斯波包:

$$\phi_i(\vec{r}, \vec{p}) = \frac{1}{(2\pi\sigma_r^2)^{3/4}} \exp\left[-\frac{(\vec{r} - \vec{r}_i)^2}{4\sigma_r^2} + \frac{i}{\hbar} \vec{r} \cdot \vec{p}_i\right]$$

演化方程:

$$\langle \dot{\vec{r}} \rangle_i = \frac{\partial H}{\partial \langle \vec{p} \rangle_i} \quad \langle \dot{\vec{p}} \rangle_i = -\frac{\partial H}{\partial \langle \vec{r} \rangle_i}$$

哈密顿量:

$$H = \sum_i \frac{p_i^2}{2m} + \int V_{loc} d^3r + U_{coul}$$

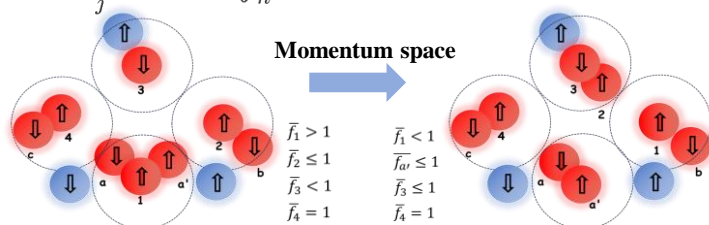
$$V_{loc} = \frac{\alpha}{2} \frac{\rho^2}{\rho_0} + \frac{\beta}{\gamma+1} \frac{\rho^{\gamma+1}}{\rho_0^\gamma} + \frac{g_{sur}}{2\rho_0} (\nabla\rho)^2 + \frac{C_s}{2\rho_0} (\rho^2 - \kappa_s (\nabla\rho)^2) \delta^2 + g_\tau \frac{\rho^{\eta+1}}{\rho_0^\eta}$$

$$U_{coul} = \frac{e^2}{2} \sum_{i \neq j} \frac{1}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} \operatorname{erf}\left(\frac{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|}{\sqrt{2(\sigma_{r_i}^2 + \sigma_{r_j}^2)}}\right) + \frac{3e^2}{4} \left(\frac{3}{\pi}\right)^{1/3} \int \rho_p^{4/3} d^3r$$

相空间约束方法 (费米子属性改善)

Physical Review C 64(2): 024612

$$\bar{f}_i = \sum_j \delta_{\tau_i \tau_j} \delta_{s_i s_j} \int_{h^3} f_j(\vec{r}, \vec{p}) d^3r d^3p$$

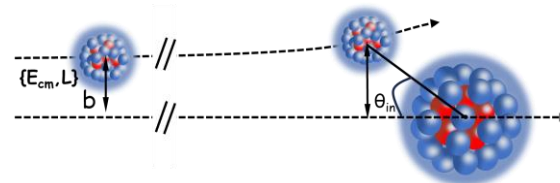


库伦入射轨迹修正

Physical Review C 42(1): 386-94.

$$\theta = \arccos\left(\frac{1}{\epsilon}\right) - \arccos\left(\frac{1+d/R}{\epsilon}\right)$$

$$\epsilon = \sqrt{1 + \frac{d * 2E_{cm}}{Z_p Z_t e^2}} \quad d = \frac{l^2}{\mu Z_p Z_t e^2} \quad l = b \sqrt{2\mu E_{cm}}$$



每一次模拟可以得到:

- 每个碎片的 Z 和 A (primary, final),
- 出射角 θ (cm, lab),
- 动能 (cm, lab),
- 接触时间 t_{cont}
- ...

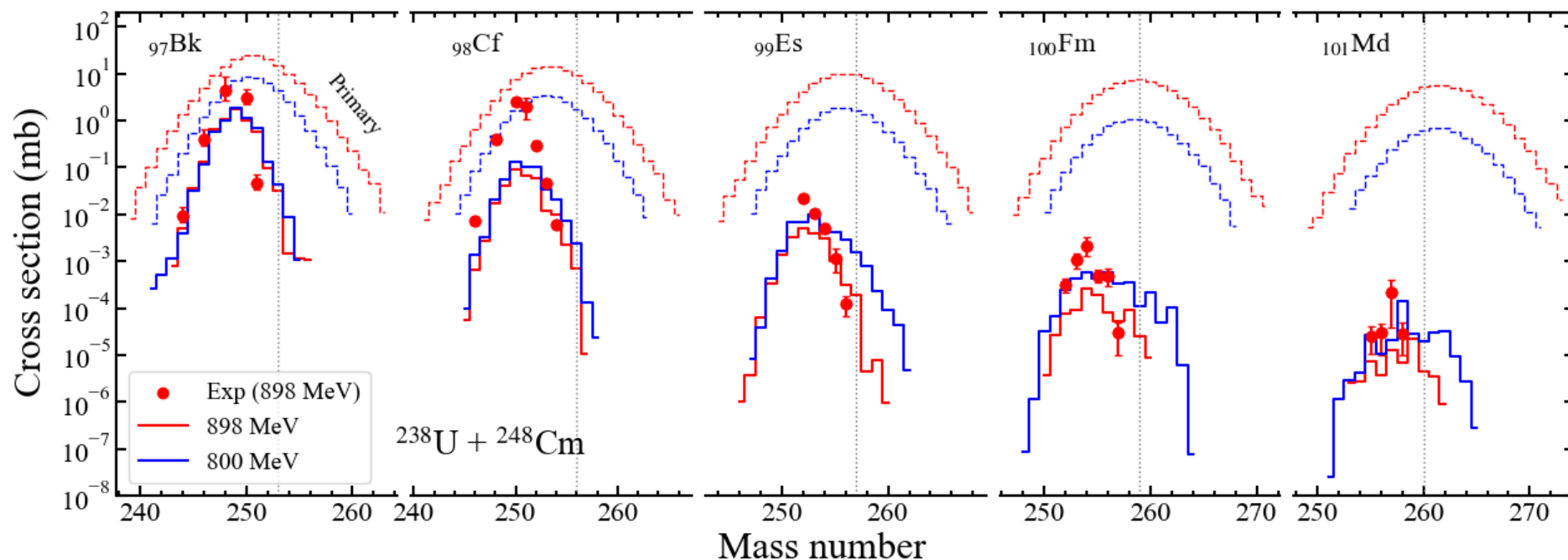
QMD 模型模拟 & Gemini++ 退激:

1. 模拟碰撞参数 $0 < b < b_{max}$ 的大量事件
2. 根据实验条件筛选事件: 各种物理量的范围, 比如能量、角度、质子数和质量数
3. 截面计算

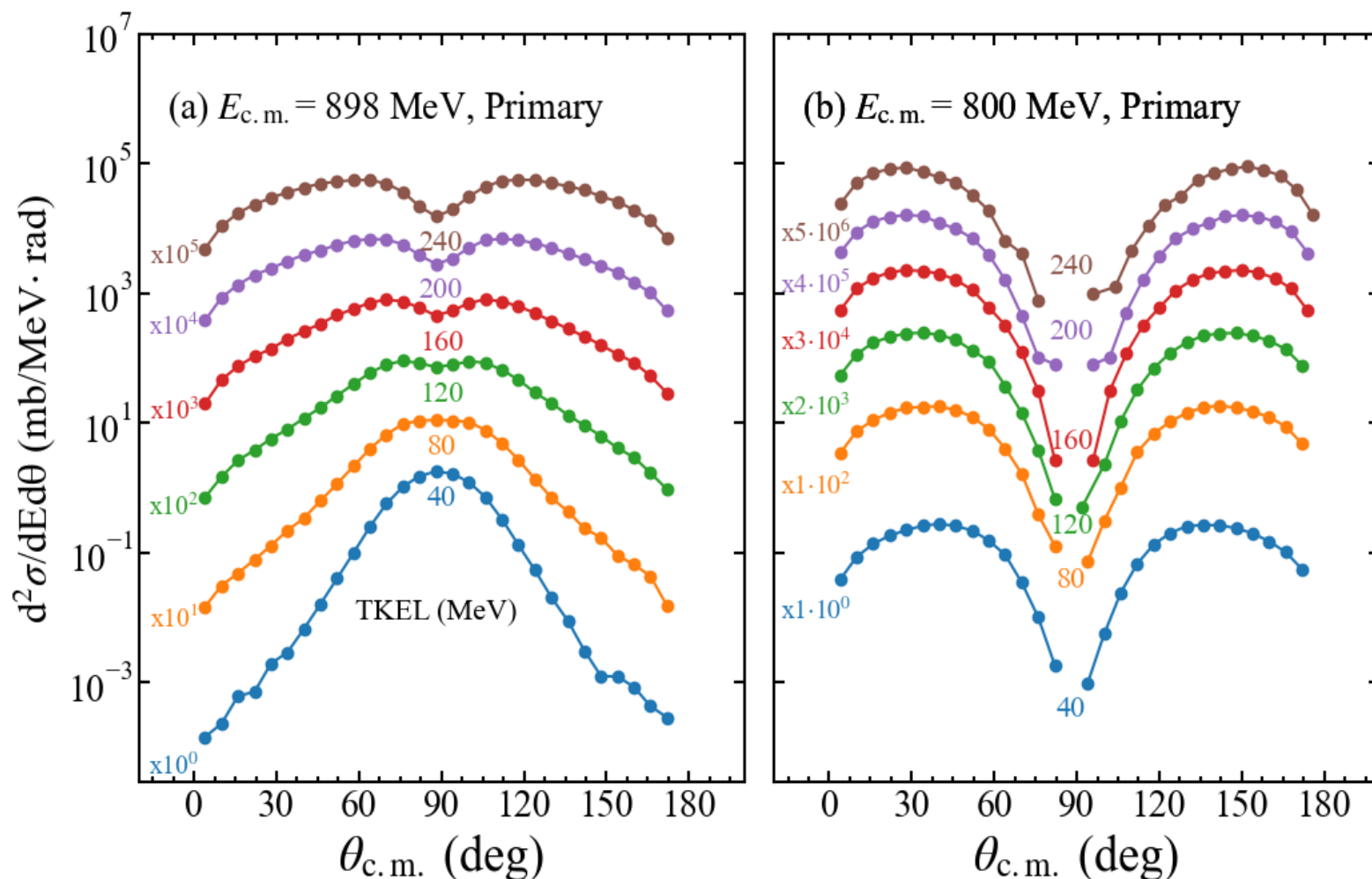
$$\frac{d^4\sigma}{d\Omega dE dA dZ}(E, \theta) = \int_0^\infty \frac{N(b, Z, A, E, \theta)}{N_{tot}(b)} \frac{1}{\sin\theta \Delta\theta \Delta E \Delta A \Delta Z} b db$$

Exp: $^{238}\text{U} + ^{248}\text{Cm} @ E_{\text{c.m.}} = 898 \text{ MeV}$

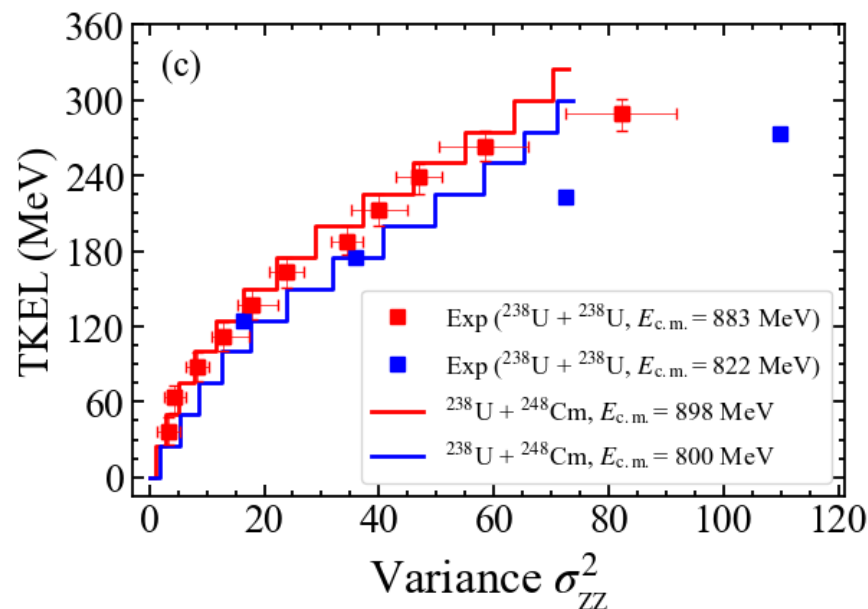
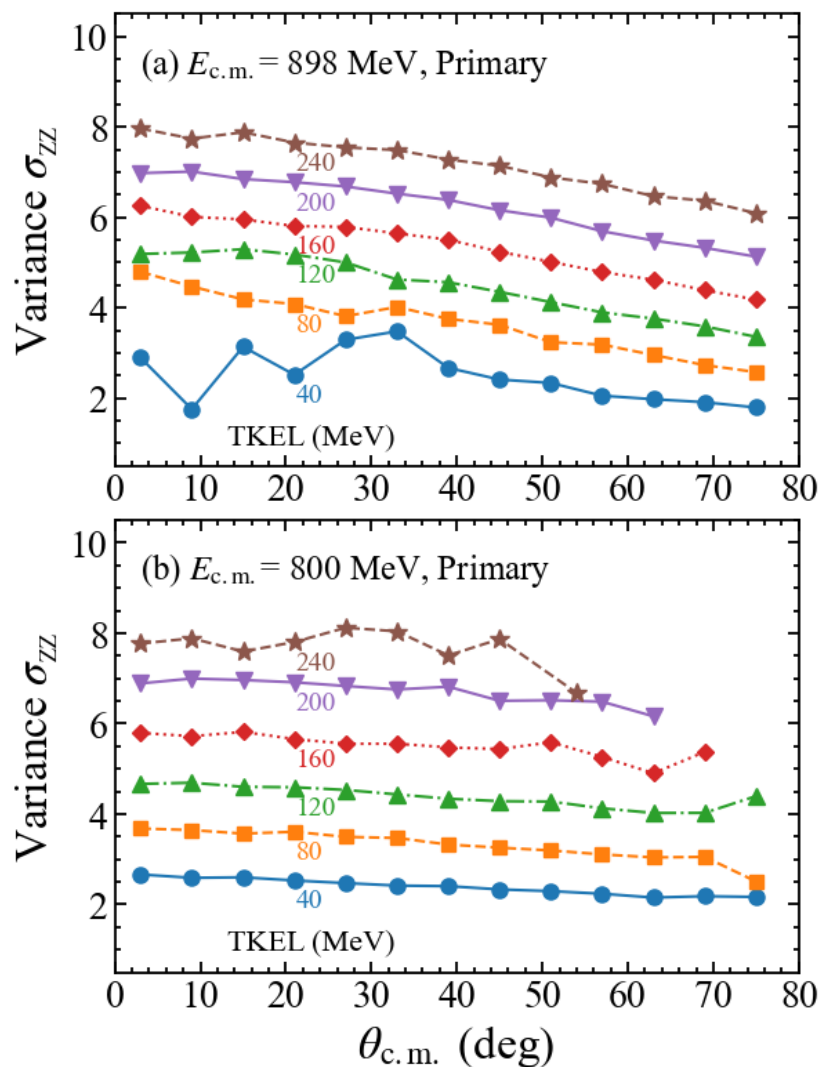
M. Schadel et al., Phys. Rev. Lett. 48, 852 (1982).



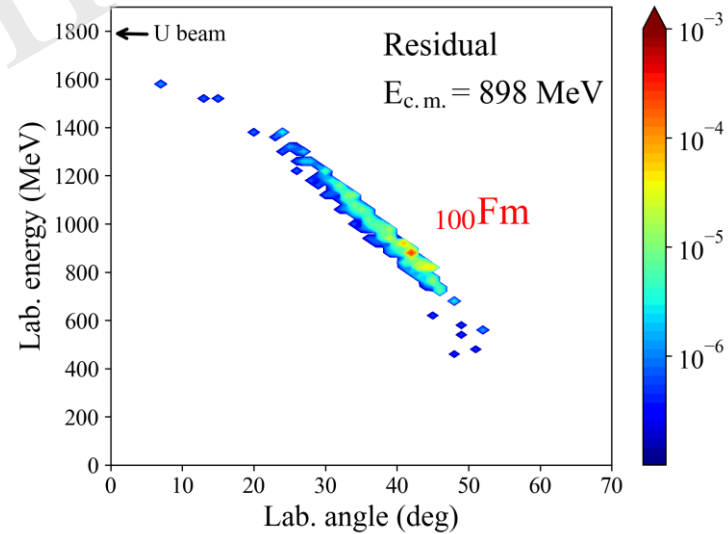
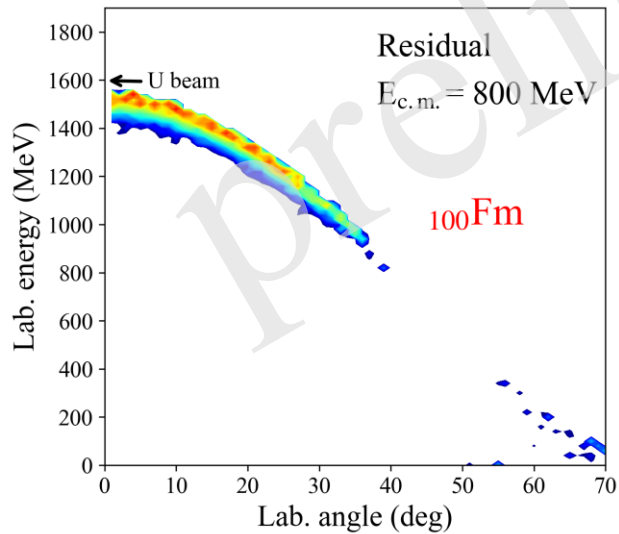
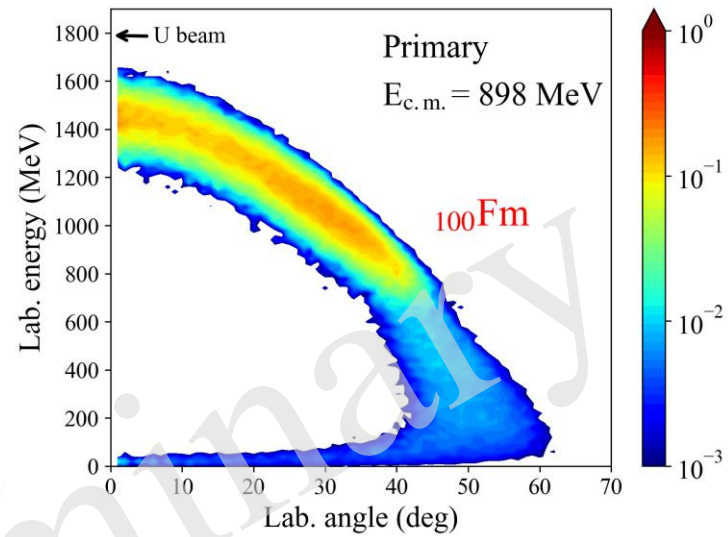
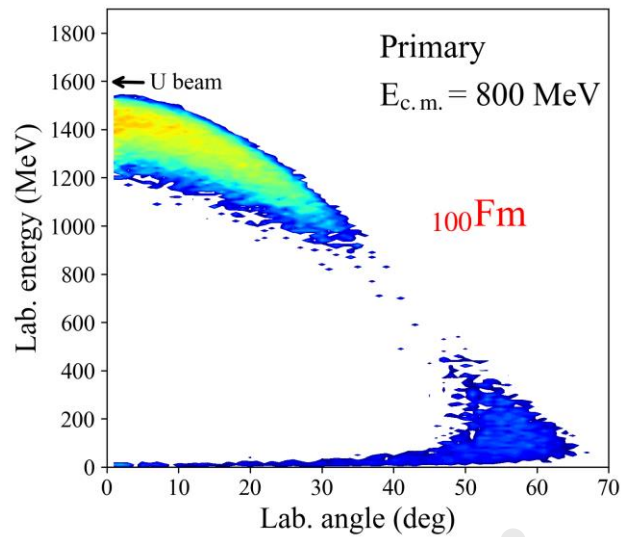
- 计算结果合理地描述了实验数据趋势
- 最终产物的最大截面与能量不敏感，而丰中子一侧与能量敏感
- 更应该关注产物的角分布



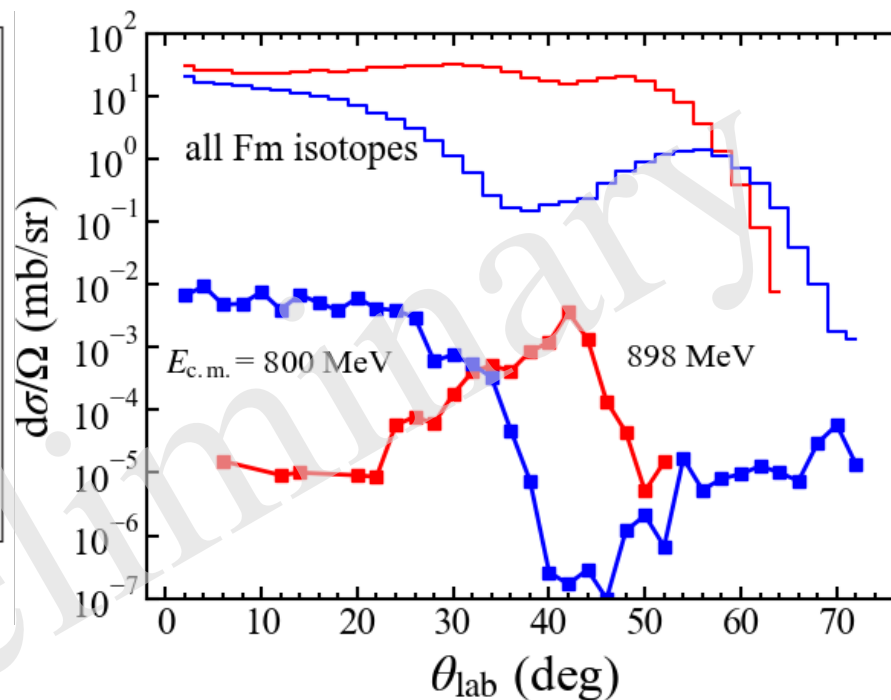
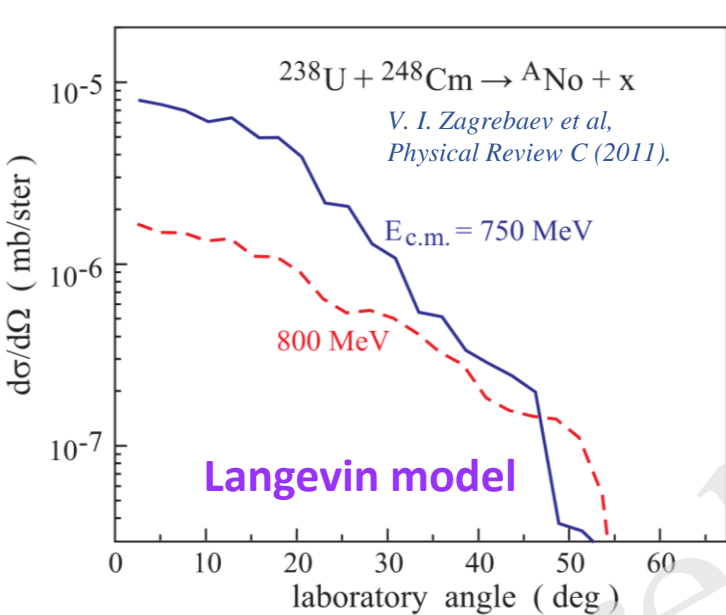
- 角分布的宽度随着能量损失的增加而增加
- 出射角 θ 峰位随着能量损失的增加偏移不大



- ❑ 电荷分布的宽度随着能量损失的增加而增加
- ❑ 出射角 θ 和初始电荷分布的宽度之间没有显著相关性

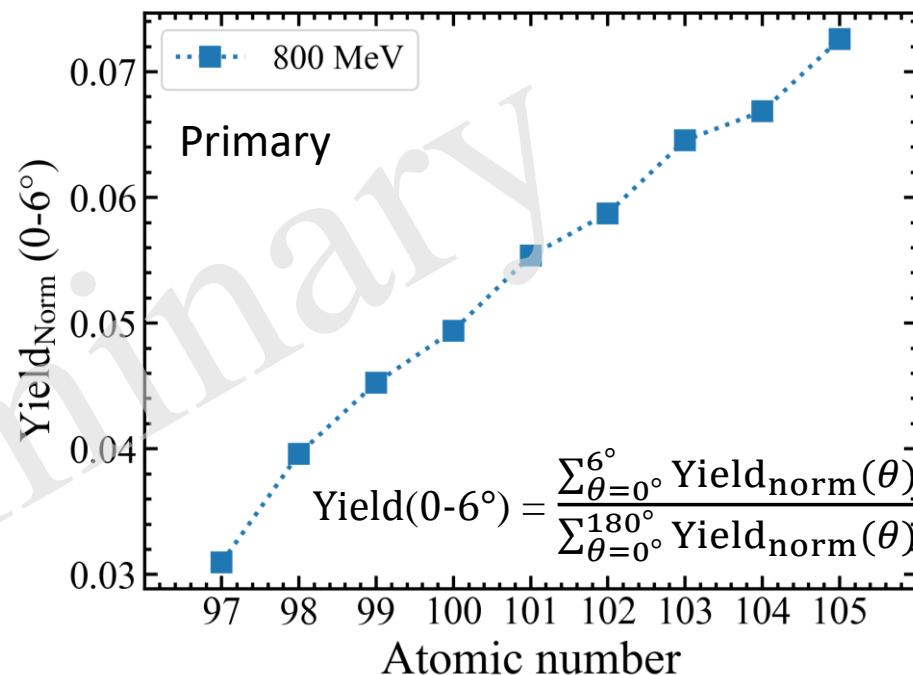
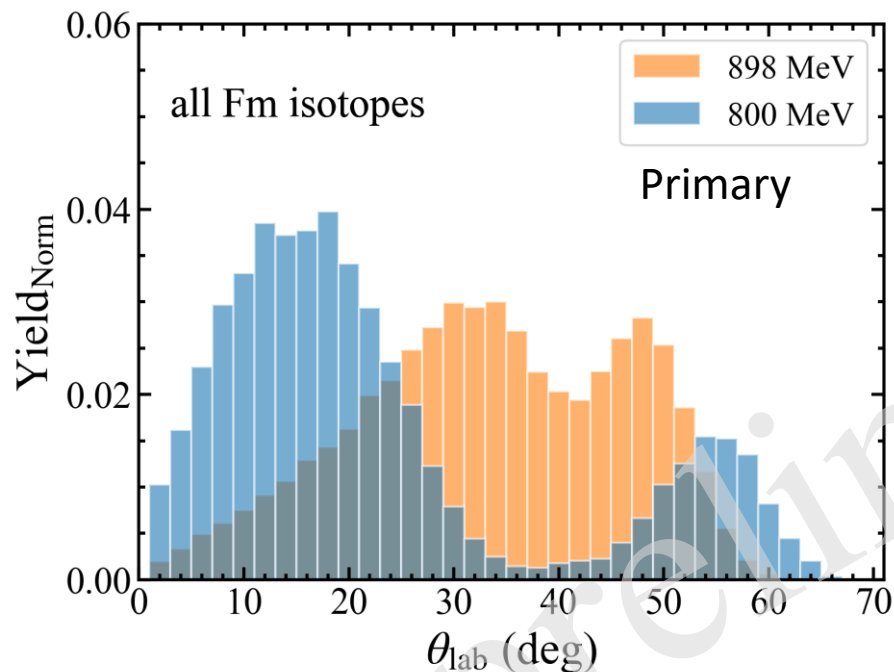


Fermium isotopes ($Z = 100$)



252 Es	253 Fm	254 Fm	255 Fm	256 Fm	257 Fm	258 Fm	259 Fm	260 Fm	261 Fm	262 Fm	263 Fm	264 Fm
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

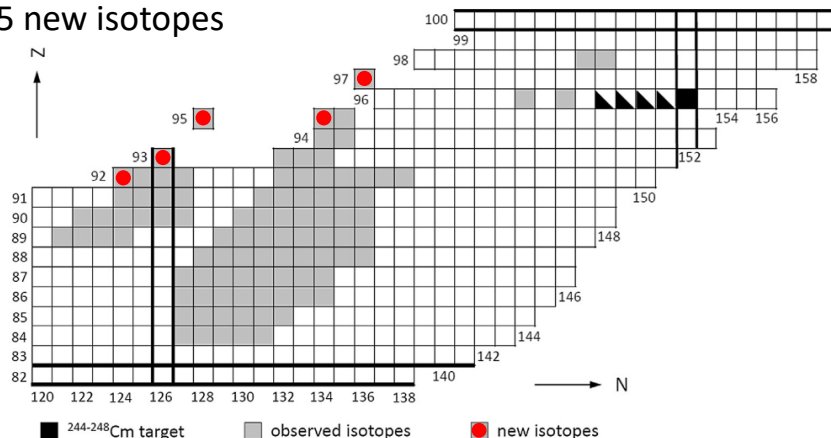
探测到的粒子数量与 $(d\sigma/d\Omega) \sin\theta$ 成正比



□ 其0~6°出射的初始产物占比随原子序数增加而上升

$^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm} @ (5.3 \text{ MeV/A})$ At SHIP (GSI)

observed ~100 residual nuclei
5 new isotopes



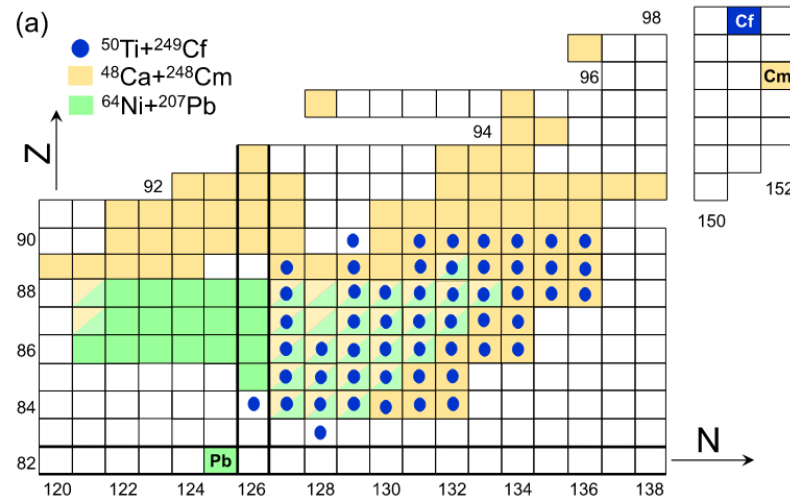
H. M. Devaraja, et al. Physics Letters B 748, 199 (2015).

SHIP

- 通过 α 衰变关联进行质量鉴定
- 最大关联时间为1秒；角度接受度仅为0.3%

更多~0°实验: *V. F. Comas, et al., Eur. Phys. J. A 49, 112 (2013).*
O. Beliuskina, et al., Eur. Phys. J. A 50, 161 (2014).
H. M. Devaraja, et al., Eur. Phys. J. A 55, 25 (2019).
H. M. Devaraja, et al., Eur. Phys. J. A 56, 224 (2020).
.....

$^{50}\text{Ti} + ^{249}\text{Cf} @ (6.1 \text{ MeV/A})$ At TASCA (GSI)



A. Di Nitto, et al. Physics Letters B 784, 199 (2018).

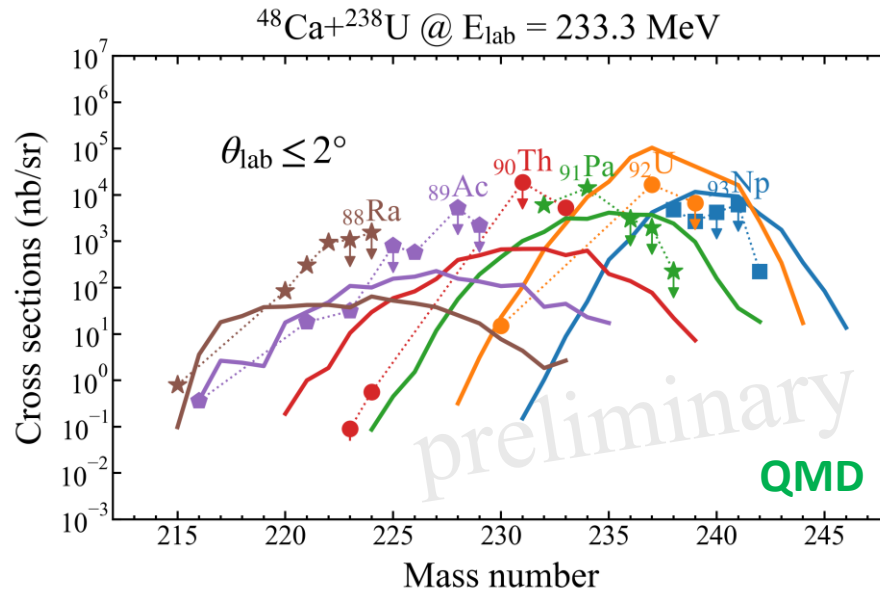
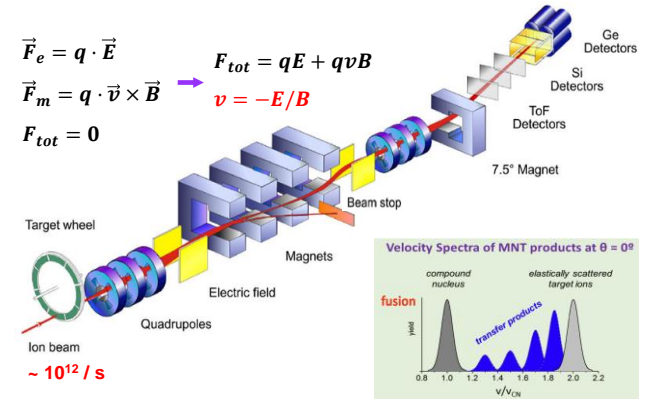
TASCA

- 短程充气反冲核分离器
- 通过 α 衰变关联进行质量鉴定

GSI的速度选择器SHIP和充气反冲谱仪TASCA上在超铀区的MNT反应方面开始取得新的实验进展

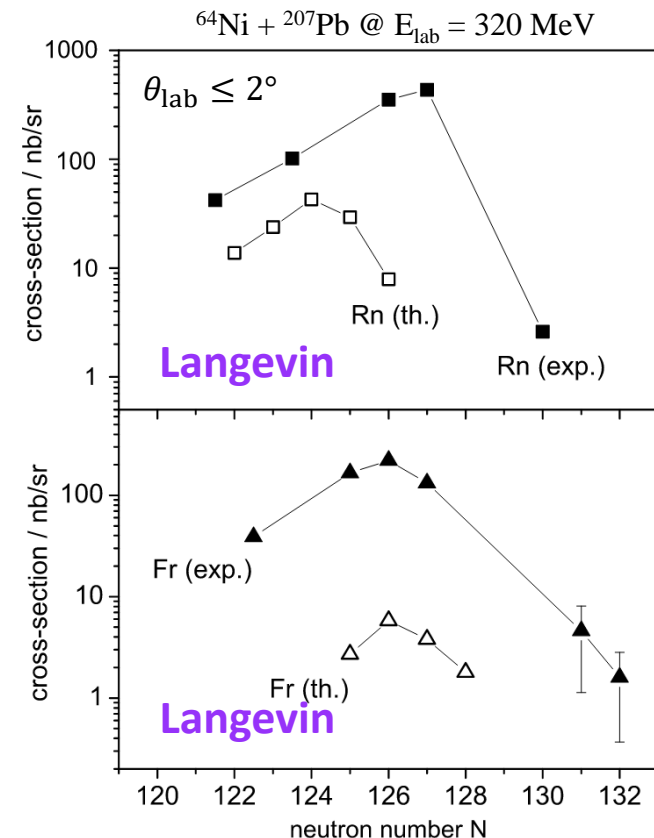
Separator for Heavy Ion reaction Products (SHIP) - GSI

Mass identification via alpha decay correlation



- 模拟结果合理重现了小角度实验数据的趋势
- 低估了小角度产物的截面

V. F. Comas, S. Heinz. et al., Eur. Phys. J. A 49, 112 (2013).
H. M. Devaraja, S. Heinz. et al., Eur. Phys. J. A 56, 224 (2020).



- 出射角 θ 峰位随着能量损失的增加偏移不大，而角分布的宽度随之增加。
- 对于任何给定的能量损失，出射角 θ 和初始电荷分布的宽度之间没有显著相关性。
- 高入射能下，产物角分布保留掠射特征；低入射能下，掠射特征减弱，且随质子数增加，其 $0\sim 6^\circ$ 出射的初始产物占比上升。
- 模型低估了 $\sim 0^\circ$ 出射的产物截面。

请各位专家批评指正！