

2024年11月15-18日-第三届“粤港澳”核物理会议

低能重离子核反应机制的理论研究

包小军

湖南师范大学 物电学院



合作者：张鸿飞（西安交通大学）、李君清（中科院近代物理研究所）、郭树青（深圳大学）、王楠（深圳大学）、祝龙（中山大学）

超重新元素的研究

元素周期表

Periodic Table of the Elements

元素周期表																		18	
Periodic Table of the Elements																		2	
																		氦	
																		He	
																		4.0026	

57 La lanthanum 138.91	58 Ce cerium 140.12	59 Pr praseodymium 140.91	60 Nd neodymium 144.24	61 Pm promethium	62 Sm samarium 150.36(2)	63 Eu europium 151.96	64 Gd gadolinium 157.25(3)	65 Tb terbium 158.93	66 Dy dysprosium 162.55	67 Ho holmium 164.93	68 Er erbium 167.26	69 Tm thulium 168.93	70 Yb ytterbium 173.05	71 Lu lutetium 174.97
89 Ac actinium	90 Th thorium 232.04	91 Pa protactinium 231.04	92 U uranium 238.03	93 Np neptunium	94 Pu plutonium	95 Am americium	96 Cm curium	97 Bk berkelium	98 Cf californium	99 Es einsteinium	100 Fm fermium	101 Md mendelevium	102 No nobelium	103 Lr lawrencium

此元素周期表由中国化学会译制，版权归中国化学会和国际纯粹与应用化学联合会（IUPAC）所有。
英文原元素周期表及更新请见www.iupac.org；中文译版元素周期表及更新请见www.chemsoc.org.cn



“是否存在稳定的超重原子核？”

被Science杂志列为21世纪人类面临的125个科学难题之一。

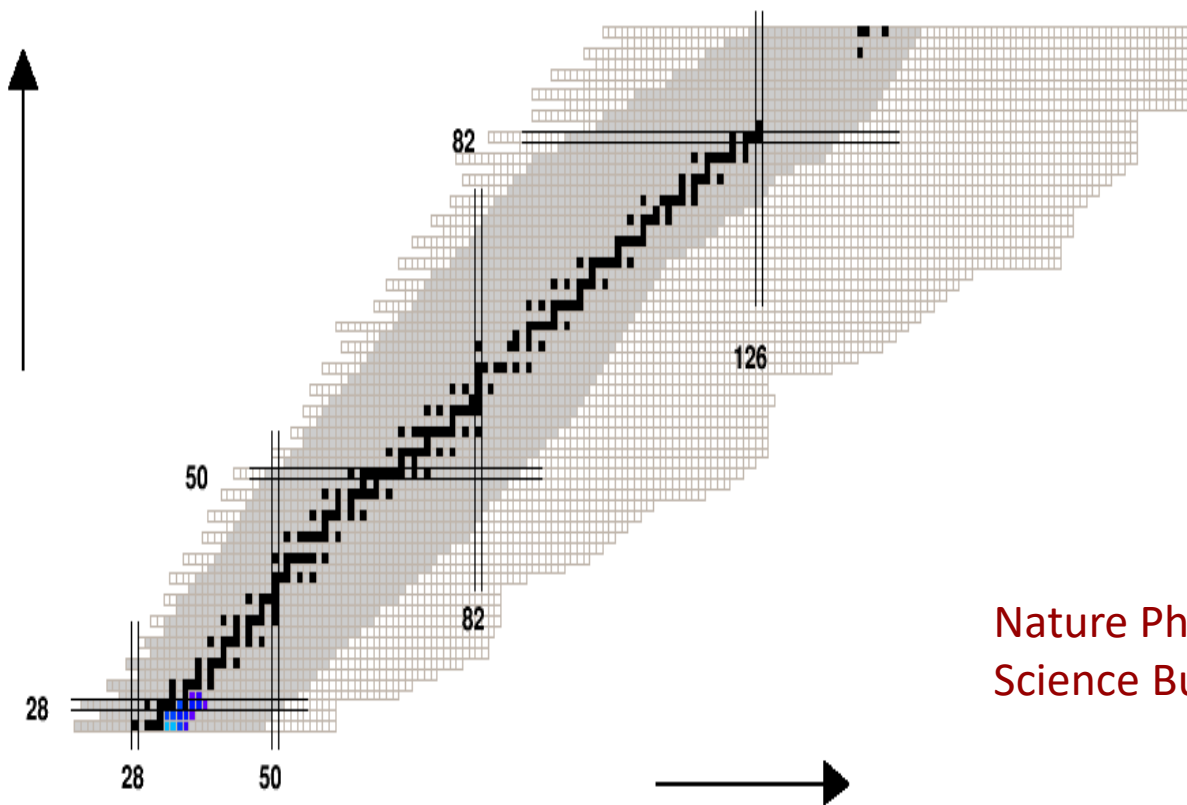


Are there stable high-atomic-number elements?

A superheavy element with 184 neutrons and 114 protons should be relatively stable, if physicists can create it.



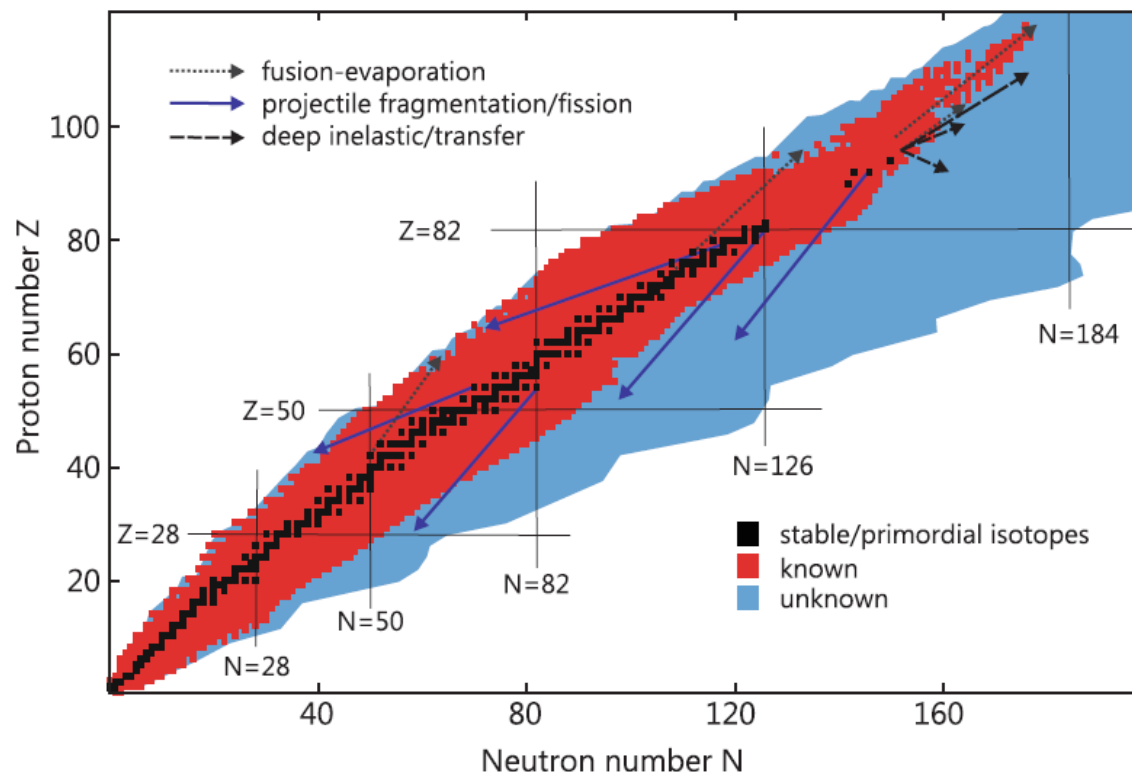
宇宙中重元素的合成机制



Nature Physics **14**, 537 (2018)
Science Bulletin **67**, 125(2022)

“宇宙中从铁到铀重元素来源？” 被Science杂志列为21
世纪人类面临的125个科学难题之一。

新元素与新核素的合成



Michael Thoennessen, The Discovery of Isotopes

□ 新元素与新核素的合成方案：放射性衰变、中子/质子俘获过程、裂变或者诱发裂变(中子、质子、光子等)、轻离子熔合蒸发反应、**散列/碎裂反应**，**重离子熔合蒸发反应**、**深度非弹性散射(多核子转移反应)**等等。

极端条件下原子核的研究

□ 原子核是一个复杂的**量子多体系统**

- 单粒子运动、集体运动
- 自旋、同位旋自由度、对关联现象等
- 集体激发、单粒子激发等
- 融合、裂变、衰变等
-

□ 新核素与新元素研究的意义

- 验证原有的核结构理论是否继续适用
- 推动与新核素有关的核天体物理的发展
- 新核素合成机制的研究对核物理本身以及核化学的发展有很大的促进作用
-

□ 重离子核反应：**电荷质量极限、同位旋极限**、高温高密极限、自旋极限

核力

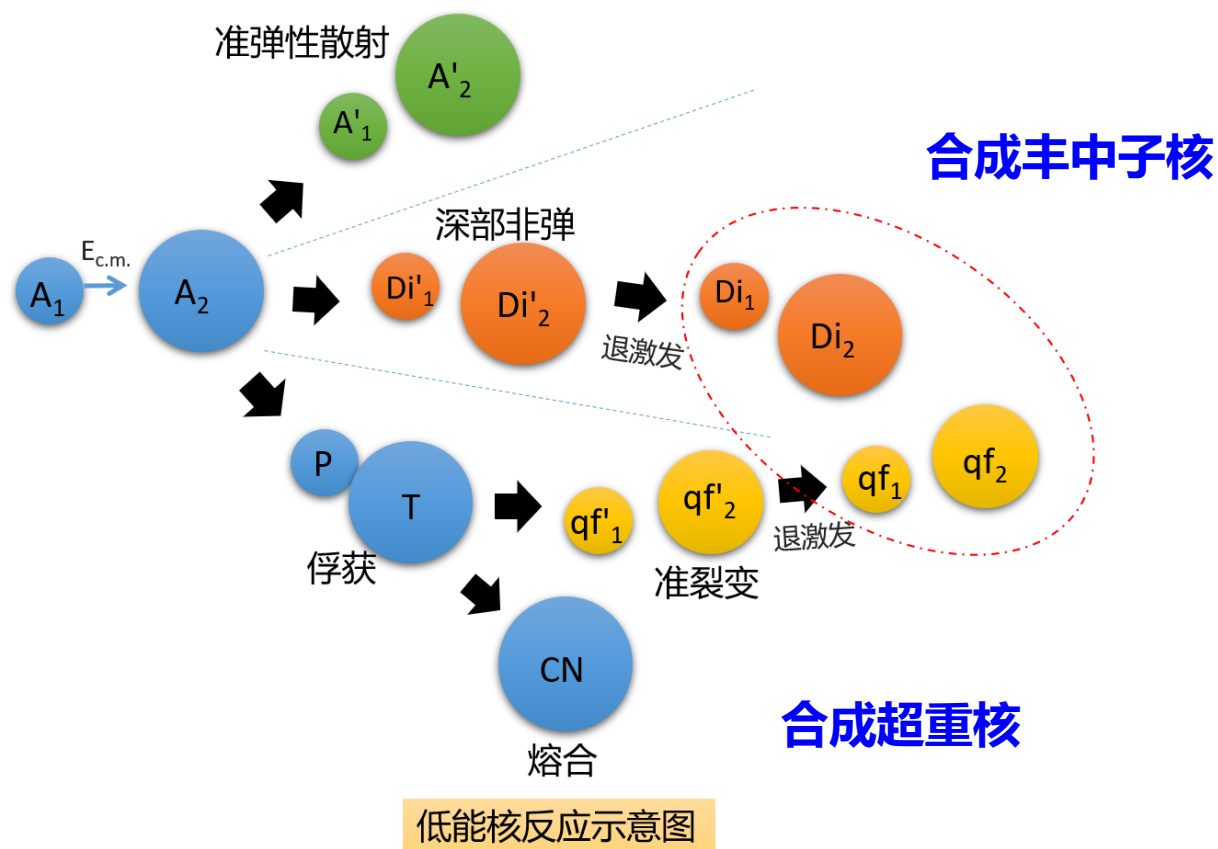
原子核的壳层结构、单粒子运动与集体运动的关联分别获得**1963年**和**1975年**的诺贝尔物理学奖。



低能核反应过程

低能重离子碰撞过程的因子化图像

- a) 俘获过程 c) 存活过程 (轻粒子蒸发与裂变之间的竞争)
- b) 多核子重排过程 (熔合过程, 准裂变与深部非弹等过程等之间的竞争)



① 原子核的电荷质量极限：超重核、超重稳定岛

$^{310}_{126}\text{X}_{184}$

📄 Goldhaber(1957), Wheeler(1958)

② 超重核的稳定性：很强的库仑力作用、超重核稳定存在的物理机制

👉 液滴模型：重核的稳定性随 Z^2/A 的增大而减小

📄 Swiatecki(1955), Oganessian(2007)

👉 理论预言超重元素的存在源于量子壳效应

📄 Sobiczewski(1966), Bender(2003), Meng(2006)

👉 $Z \geq 104$ 的原子核稳定性增强、形变双幻核 $^{270}_{108}\text{Hs}_{162}$

📄 Demin(1984), Lazarev(1994), Dvorak(2006), Moller(1974), Cwiok(1983)

③ 超重核幻数的理论预言：壳效应(自旋-轨道耦合、张量力、形变等)

👉 宏观微观模型(非自洽)： $Z = 114$; $N = 184$

Sobiczewski(1966)

👉 非相对论模型： $Z = 114, 120, 126$; $N = 184$

Cwiok(1996), Bender(2001)

👉 相对论模型： $Z = 120, 126$; $N = 184, 172$

Reinhard(1989), Bender(2003), Li(2014)

④ 超重核研究重点：稳定机制、结构特性、合成机制、衰变性质、……

📄 Sobiczewski(2007), Hofmann(2000), Oganessian(1999), Baran(1985), Smolanczuk(1995)

超重核合成和鉴别面临的困难

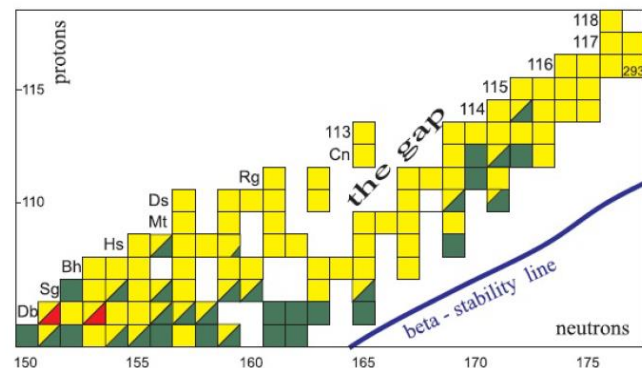
● 超重核合成与鉴别的实验测量：

- ☞ 截面实验测量约1pb
- ☞ 寿命在 μ s到几十分钟
- ☞ 具有 α 衰变直至已知核

● 超重核合成与鉴别的物理特点：

- ☞ 生成截面小(约1pb)，测量时间长
- ☞ 激发函数窄，束流能量合理
- ☞ 衰变模式位置， $\alpha, \text{SF}, \text{EC}, \beta \dots$

● 离稳定岛中心还差7个中子；实验反映半衰期随中子数增加而增大。



● 高电荷数,丰中子超重核的合成

- ☞ 可靠靶材料的限制, ^{251}Cf
- ☞ 丰中子超重核合成,放射性核束

寻找新的鉴别方法、或者从理论上寻找目前实验能完成的弹靶组合

利用丰中子放射性核束,或寻找新的合成机制。

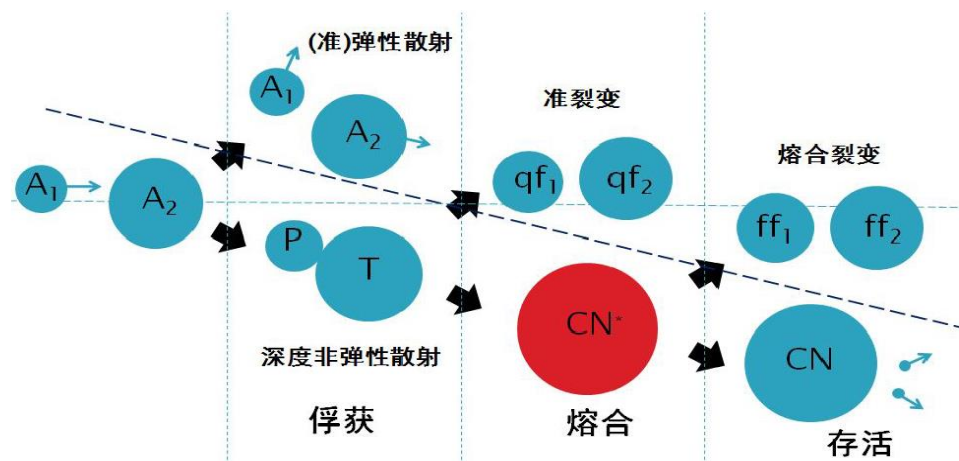
研究动机

利用丰中子放射性核,或从理论上寻找目前实验能完成的最佳弹靶组合且给出相应的入射能以及衰变模式。

熔合蒸发反应

蒸发剩余截面

$$\sigma_{ER}(E_{c.m.}) = \sum_J \sigma_{cap}(E_{c.m.}, J) P_{CN}(E_{c.m.}, J) W_{sur}(E_{c.m.}, J)$$



超重核的合成方法：熔合蒸发反应

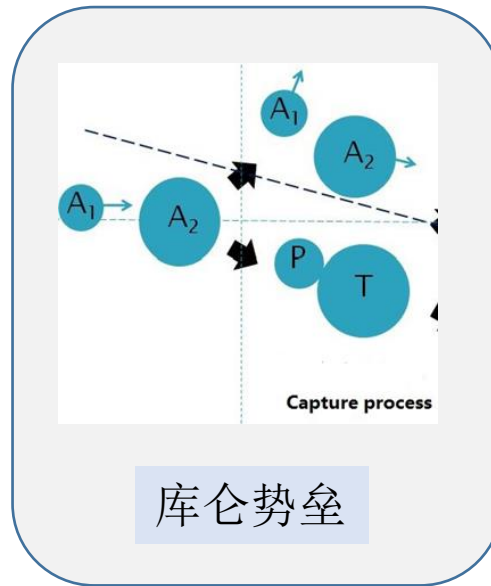
1. 冷熔合方法: 丰中子炮弹 + ^{208}Pb (^{209}Bi) $Z=107-112$ (GSI)、 $Z=110-113$ (日本)
S. Hofmann(2011), K. Morita(2004,2007), Z. G. Gan(2001,2004)
2. 热熔合方法: ^{16}O , ^{22}Ne + 丰中子的铜系靶 ($Z=104-108, 110$), ^{48}Ca + 丰中子的铜系靶 $Z=112-118$ (Dubna)、 $Z=112, 114-117$ (GSI)、 $Z=114$ (Berkeley)
Y. T. Oganessian(2011), Z. Y. Zhang(2010), S. Hofmann (2007,2012), N. T. Brewer(2018)
PRC98,024317.

俘获过程的理论描述

□ 描述俘获过程的理论方法

- 考虑摩擦力的经典运动方程
- Hill-Wheeler 或Wong 公式
- 耦合道理论
- 求解量子主方程
- 时间依赖的HF理论
-

Hill(1953), Wong(1973), Dasso
(1983), Hagino(2012), Lin(2015).....



原子核原子核相互作用势或有效核子核子相互作用势

原子核结构和反应动力学过程的紧密相关

两个相互作用的多核子量子系统的势垒隧穿机制

□ 原子核原子核相互作用势

$$V_N(r) = \int d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2 v_{NN}(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}) \rho_P(\mathbf{r}_1) \rho_T(\mathbf{r}_2) \quad V_N(r) = -\frac{V_0}{1 + \exp[(r - R_0)/a]}$$

原子核的密度分布（半径）与形状相关

□ 实验研究的进展

- 近库仑势垒和垒上区域
- 库仑势垒以下区域
- 深垒下区域
- 轻核区域
- 中等质量核区域
- 重核与超重核区域

Montagnoli(2017), Jia
(2014), Jiang(2014), Back(2013)

基于经验的耦合道方法计算俘获截面

● 俘获截面

$$\sigma_{\text{cap}}(E_{\text{c.m.}}) = \frac{\pi \hbar^2}{2\mu E_{\text{c.m.}}} \sum_J (2J+1) T(E_{\text{c.m.}}, J),$$

Wong(1973), Raman(2001), Wang(2018), Adamian(1996)

● 不同模式下的隧穿几率

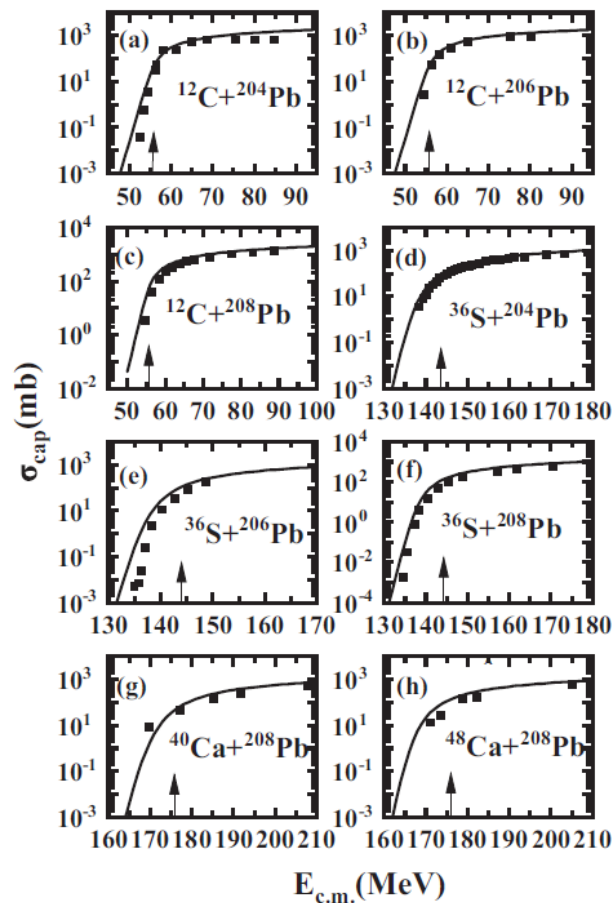
$$T(E_{\text{c.m.}}, J) = \int f(B) T^{\text{HW}}[E_{\text{c.m.}}, J, B] dB,$$

$$T(E_{\text{c.m.}}, J) = \frac{1}{4} \int_0^\pi \int_0^\pi T^{\text{HW}}[E_{\text{c.m.}}, J, B(\beta_1, \theta_1, \beta_2, \theta_2)] \\ \times \sin \theta_1 \sin \theta_2 d\theta_1 d\theta_2,$$

$$T(E_{\text{c.m.}}, J) = \frac{1}{2} \int \sin \theta_2 d\theta_2 \int f(B') T^{\text{HW}} \\ \times [E_{\text{c.m.}}, J, B(\theta_2, \beta_1)] dB',$$

● Hill-Wheeler 公式

$$T^{\text{HW}}(E_{\text{c.m.}}, J, B) \\ = \frac{1}{1 + \exp \left\{ -\frac{2\pi}{\hbar \omega_B(J)} \left[E_{\text{c.m.}} - B - \frac{\hbar^2}{2\mu R_B^2(J)} J(J+1) \right] \right\}}$$



Guang Jin Li, Xiao Jun Bao*, Phys. Rev. C 107,024611(2023).

基于分类考虑形变效应的经验耦合道方法能较好描述形成重核与超重核的73个反应系统近垒和垒上的俘获截面。

多核子重排过程的理论描述

- 原子核反应是两个量子多体系统相互作用的动力学过程：

从量子力学的观点看，核反应过程是一个广义的碰撞或者散射问题

原则上可以通过**求解薛定谔方程来描述低能核反应过程**，实际情况是能够严格计算的极其有限

- 宏观微观方法：

低能核反应理论是对这种碰撞或者散射问题的各种近似描述

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial \dot{\chi}} \mathcal{L}(\dot{\chi}, \chi) = \frac{\partial}{\partial \chi} \mathcal{L}(\dot{\chi}, \chi) + \mathbf{F}^{\text{diss}}(\chi; t)$$

平均场近似下系统宏观自由度的扩散和漂移或者涨落耗散过程

Zagrebaev(2005), Nasirov(2005), Shen(2008), Bao(2015),.....

- 微观方法：

$$\mathcal{S} = \int_{t_1}^{t_2} dt \langle \Phi(t) | H - i\hbar \partial_t | \Phi(t) \rangle$$

$$\Phi(r_1, r_2, \dots, r_A, t) = \frac{1}{\sqrt{A!}} \det |\phi_\lambda(r_i, t)|$$

$$H = \sum_i^A t_i + \sum_j^A v_{ij}$$
$$i\hbar \frac{\partial \phi_\lambda}{\partial t} = h \phi_\lambda$$

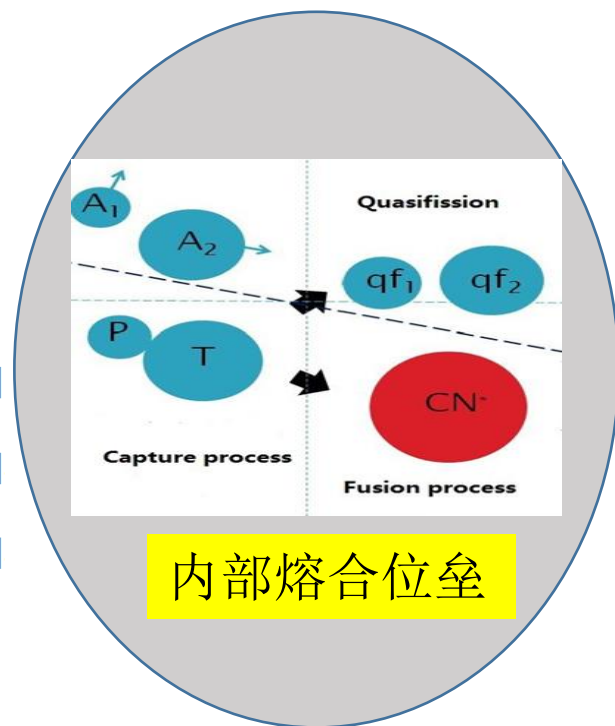
Guo(2008), Simenel(2010), Umar(2016), Zhao(2015), Li(2016), Jiang(2020)....

弹靶核中的多核子重排过程

□ 输运理论（主方程）

双核模型

$$\begin{aligned} \frac{dP(Z_1, N_1, \beta_1, \beta_2, t)}{dt} = & \sum_{Z'_1} W_{Z_1, N_1, \beta_1, \beta_2; Z'_1, N_1, \beta_1, \beta_2}(t) [d_{Z_1, N_1, \beta_1, \beta_2} P(Z'_1, N_1, \beta_1, \beta_2, t) - d_{Z'_1, N_1, \beta_1, \beta_2} P(Z_1, N_1, \beta_1, \beta_2, t)] \\ & + \sum_{N'_1} W_{Z_1, N_1, \beta_1, \beta_2; Z_1, N'_1, \beta_1, \beta_2}(t) [d_{Z_1, N_1, \beta_1, \beta_2} P(Z_1, N'_1, \beta_1, \beta_2, t) - d_{Z_1, N'_1, \beta_1, \beta_2} P(Z_1, N_1, \beta_1, \beta_2, t)] \\ & + \sum_{\beta'_1} W_{N_1, Z_1, \beta_1, \beta_2; N_1, Z_1, \beta'_1, \beta_2}(t) [d_{Z_1, N_1, \beta_1, \beta_2} P(Z_1, N_1, \beta'_1, \beta_2, t) - d_{Z_1, N_1, \beta'_1, \beta_2} P(Z_1, N_1, \beta_1, \beta_2, t)] \\ & + \sum_{\beta'_2} W_{N_1, Z_1, \beta_1, \beta_2; N_1, Z_1, \beta_1, \beta'_2}(t) [d_{Z_1, N_1, \beta_1, \beta_2} P(Z_1, N_1, \beta_1, \beta'_2, t) - d_{Z_1, N_1, \beta_1, \beta'_2} P(Z_1, N_1, \beta_1, \beta_2, t)] \end{aligned}$$



□ 势能曲面

$$\begin{aligned} U(N_1, Z_1, N_2, Z_2, R, \beta_1, \beta_2) = & U_C(Z_1, Z_2, R, \beta_1, \beta_2) + U_N(N_1, Z_1, N_2, Z_2, R, \beta_1, \beta_2) \\ & + B_{LD}^1(N_1, Z_1, \varepsilon_1^*) \prod_{k \geq 2} (1 + b_k \beta_k^2) + E_{shell}^1(N_1, Z_1, \beta) \exp(-\gamma_D \varepsilon_1^*) \\ & + B_{LD}^2(N_2, Z_2, \varepsilon_2^*) \prod_{k \geq 2} (1 + b_k \beta_k^2) + E_{shell}^2(N_2, Z_2, \beta) \exp(-\gamma_D \varepsilon_2^*) - B_{CN} \end{aligned}$$

极化效应和温度效应的竞争

准裂变产额和熔合几率

□ 准裂变产额分布

$$Y_{Z_1, N_1}(E_{c.m.}, J, B) = \int_0^{\tau_{int}} \int_0^\infty \int_0^\infty \Lambda^{qf}(Z_1, N_1, \beta_1, \beta_2) \times$$
$$\underline{P(Z_1, N_1, \beta_1, \beta_2, t)} \rho_1(\beta_1) \rho_2(\beta_2) d\beta_1 d\beta_2 dt$$

$$Y_{Z_1, N_1}(E_{c.m.}, J) = \int f(B) Y_{Z_1, N_1}(E_{c.m.}, J, B) dB$$

$$Y(A_1) = \sum_{Z_1 + N_1 = A_1} Y_{Z_1, N_1}(E_{c.m.}, J)$$

Xiao Jun Bao, Shu Qing Guo, Hong Fei Zhang,
and Jun Qing Li, Phys.Rev.C 97, 024617 (2018)

□ 熔合几率

$$P_{CN}(E_{c.m.}, J, B) = \sum_{Z_1=1}^{Z_{BG}} \sum_{N_1=1}^{N_{BG}} \int_0^\infty \int_0^\infty$$
$$\underline{P(Z_1, N_1, \beta_1, \beta_2, \tau_{int}, B)} \rho_1(\beta_1) \rho_2(\beta_2) d\beta_1 d\beta_2.$$

$$P_{CN}(E_{c.m.}, J) = \int f(B) P_{CN}(E_{c.m.}, J, B) dB.$$

□ 方向角效应对熔合几率的影响

$$P_{CN}(E_{c.m.}, J) = \sum_{Z_1=1}^{Z_{BG}} \sum_{N_1=1}^{N_{BG}} \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\pi/2} \sin \theta_1 d\theta_1$$
$$\times \int_0^{\pi/2} P(Z_1, N_1, \beta_{12}, \beta_{22}, \theta_1, \theta_2, \tau_{int}) \rho_1$$
$$\times (\beta_{12}) \rho_2(\beta_{22}) d\beta_{12} d\beta_{22} \sin \theta_2 d\theta_2. \quad ($$

Xiao Jun Bao*, Phys. Rev. C 100, 011601(R) (2019)

存活过程的理论描述

□ 激发原子核的退激发过程

$$W_{sur}(E_{CN}^*, x, J) = P(E_{CN}^*, x, J) \prod_{i=1}^x \left[\frac{\Gamma_n(E_i^*, J)}{\Gamma_n(E_i^*, J) + \Gamma_f(E_i^*, J)} \right]_i$$

□ 裂变宽度及其中子蒸发宽度

$$\Gamma_f(E_i^*, J) = \frac{1}{2\pi\rho_f(E_i^*, J)} \int_0^{E_i^* - B_i^f - \delta - \frac{1}{a_i}} \frac{\rho_f(E_i^* - B_i^f - \varepsilon, J)}{1 + \exp[2\pi(\varepsilon + B_i^f - E_i^*)/\hbar\omega]} d\varepsilon$$

$$\Gamma_n(E_i^*, J) = \frac{2s+1}{2\pi\rho(E_i^*, J)} \frac{2m_n R^2}{\hbar^2} \int_0^{E_i^* - B_i^n - \delta - \frac{1}{a_i}} \varepsilon \rho(E_i^* - B_i^n - \varepsilon, J) d\varepsilon$$

□ 能级密度

$$\rho(U, J) = \frac{(2J+1) \exp[2\sqrt{aE^*} - \frac{J(J+1)}{2\sigma^2}]}{24\sqrt{2}\sigma^3 a^{1/4} E^{*5/4}}$$

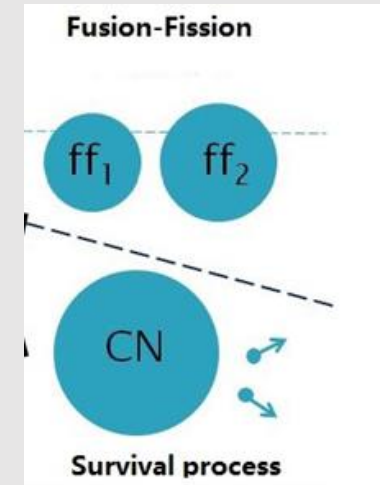
$$E_{eff}^* = gE^*$$

□ 能级密度参数

$$a(E^*, Z, N) = \tilde{a}(A) \left[1 + E_{sh} \frac{f(E^*)}{E^*} \right]$$

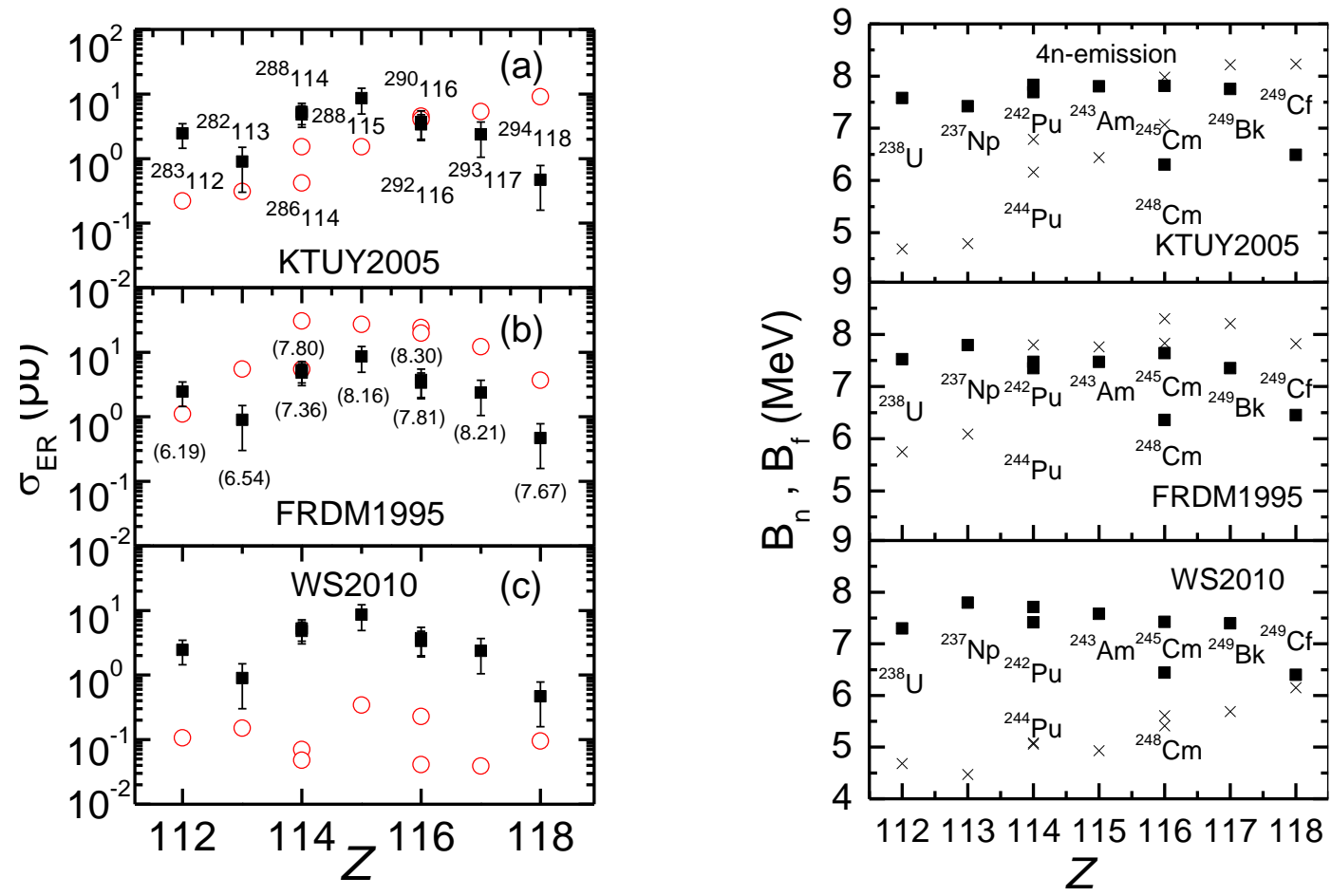
$$\rho \sim \sqrt{2aE^* (or E_{eff}^*)} \quad \begin{aligned} E^* &= E - U(\beta) \\ E_{eff}^* &= E - U_{eff}(\beta) \end{aligned}$$

裂变位垒



裂变位垒和中子分离能对蒸发剩余截面的影响

核结构输入量对原子核退激发过程的影响

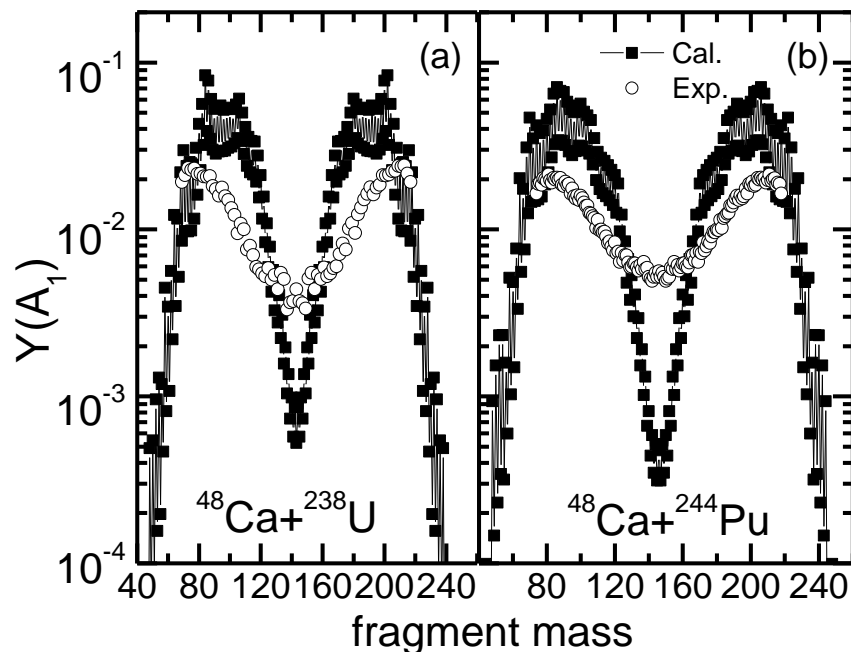


Xiao Jun Bao, Yuan Gao, Jun Qing Li, and HongFei Zhang* *Phys.Rev.C* 92, 014601(2015)

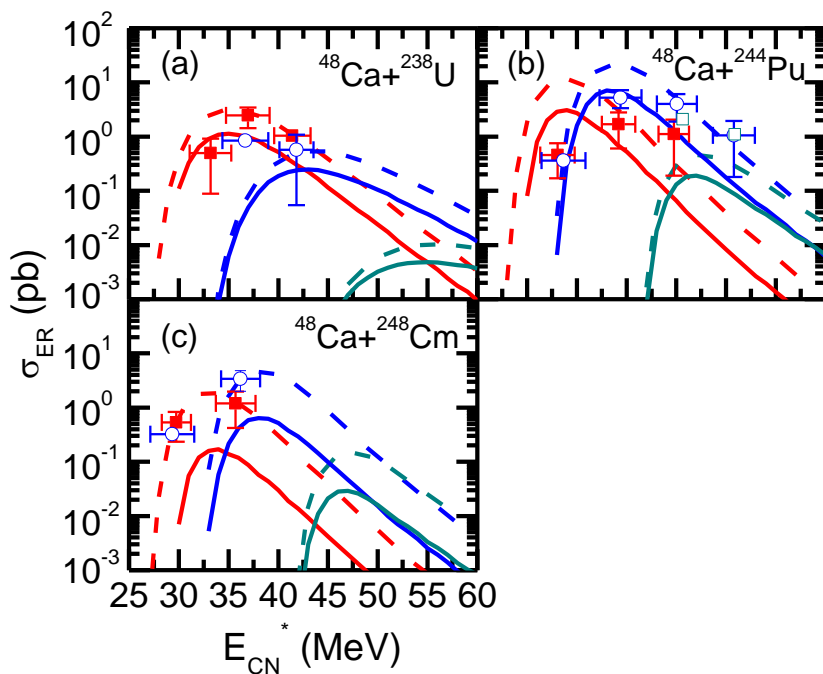
➤ 基于FRDM1995的数据，很好的再现了最大蒸发剩余截面随电荷数的变化趋势

熔合和准裂变特征

动力学形变效应对准裂变产额和蒸发剩余截面的影响



Exp., Kozulin(2014)



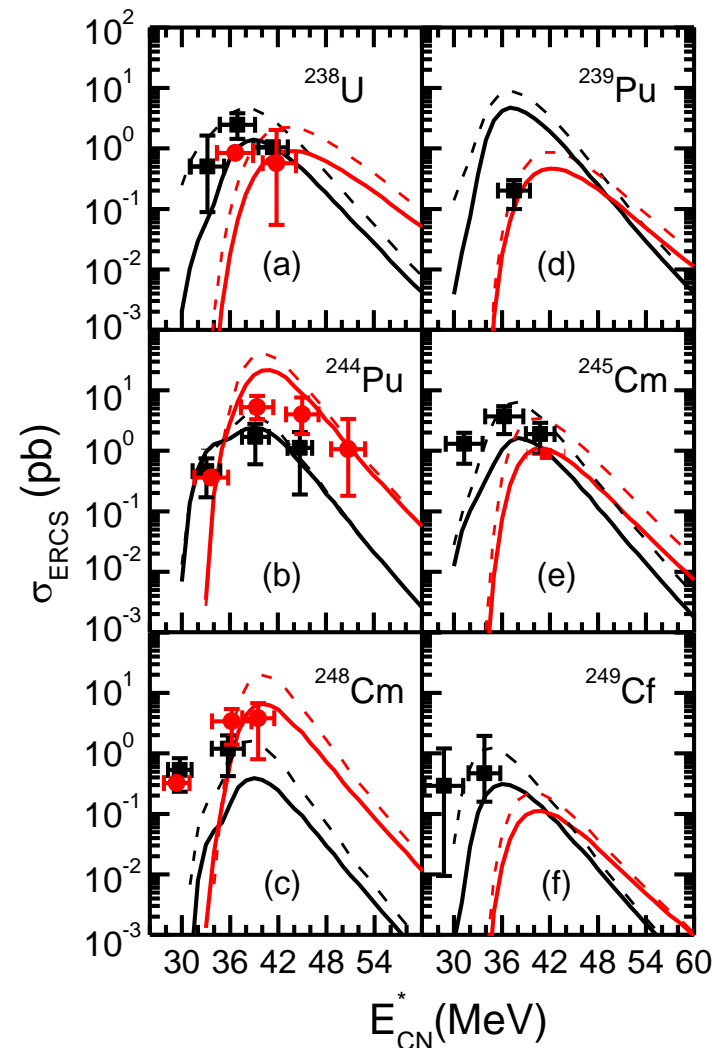
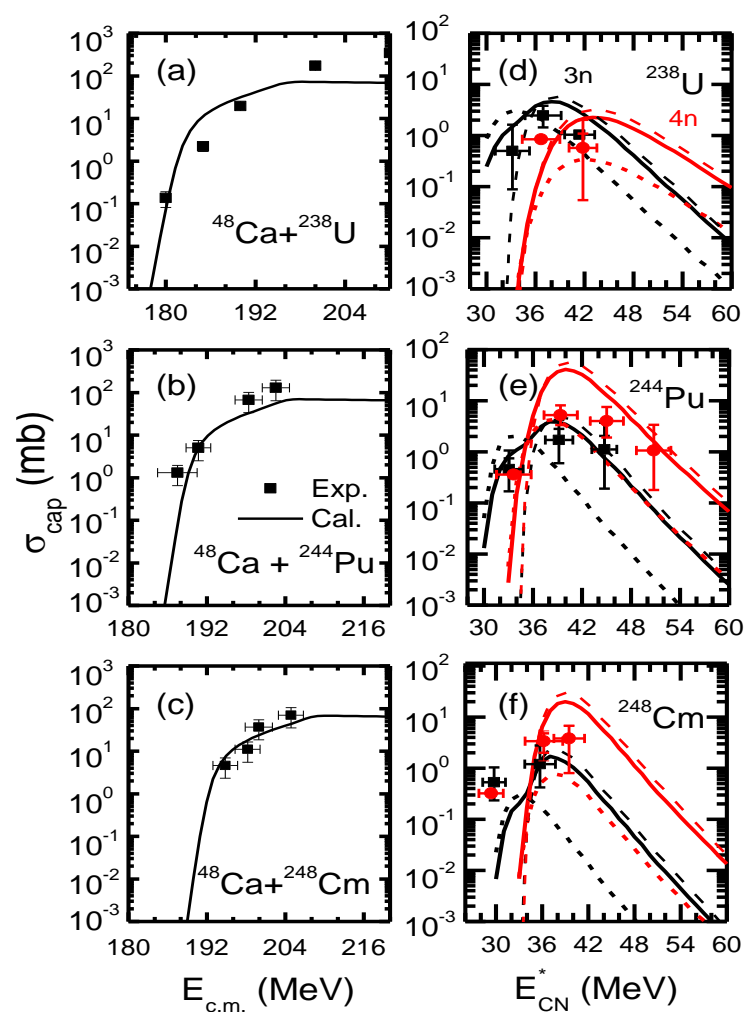
Oganessian(2004,2007), Wang(2012)

- 考虑动力学效应后很大程度上改善了理论计算再现准裂变产额分布的实验测量
- 考虑动力学效应后增加了“内部阻碍”，减小了熔合几率，降低蒸发剩余截面

Xiao Jun Bao, Shu Qing Guo, Hong Fei Zhang, and Jun Qing Li, Phys.Rev.C 97, 024617 (2018)

方向角效应对蒸发剩余截面的影响

□ 方向角效应和温度效应对蒸发剩余截面的影响

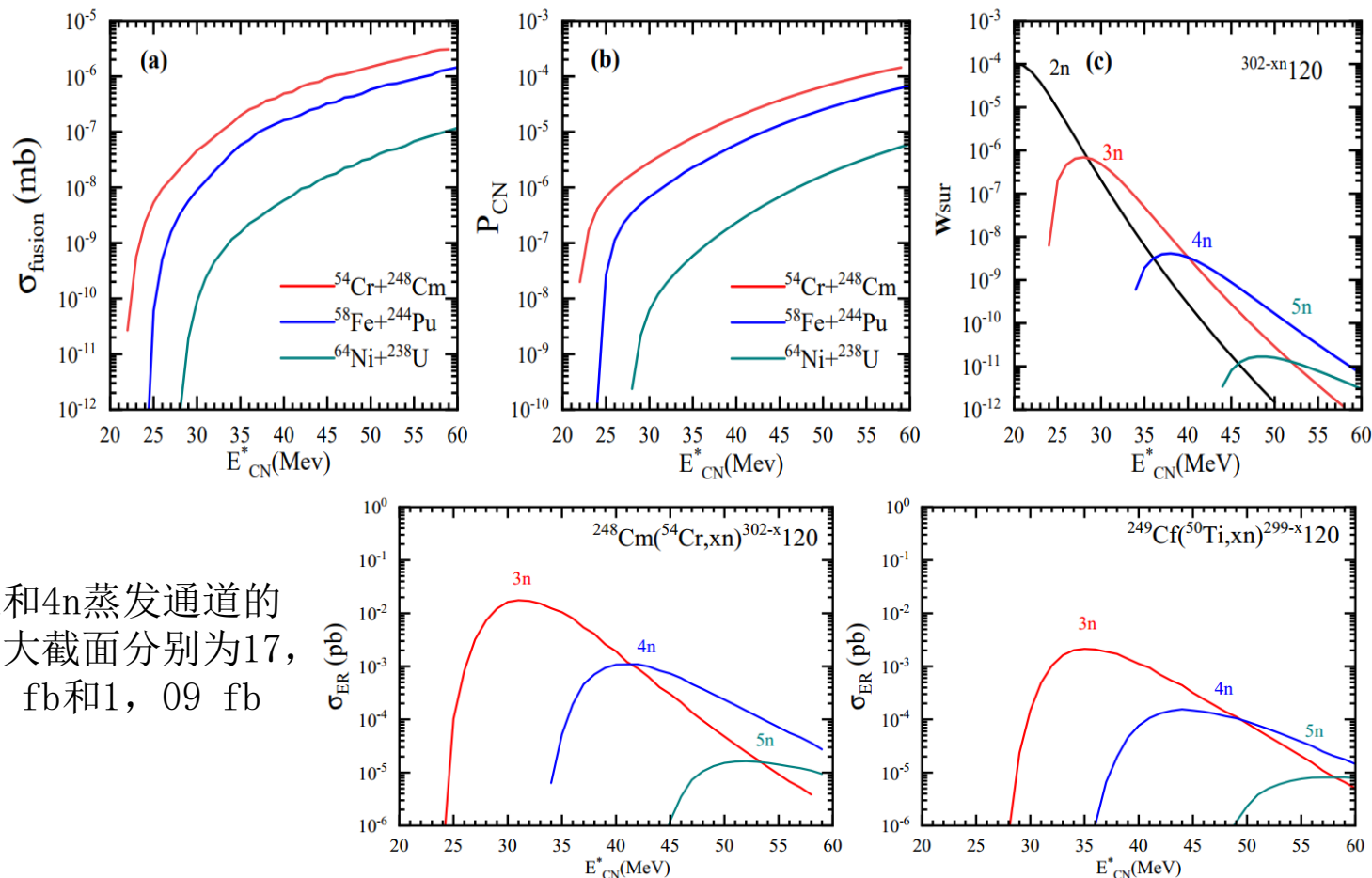


合成Z=120的最佳弹靶组合

新元素Z=120的合成截面

复合核 ($^{302}120$) 的熔合截面, 熔合几率, 存活几率

入射道效应



3n和4n蒸发通道的
最大截面分别为17,
58 fb和1, 09 fb

S.H.Zhu and Xiao Jun Bao*, Phys.Rev.C 108, 014604 (2023)

多核子转移反应的理论和实验研究进展

□ 多核子转移反应的实验研究进展:

- 1、谱学研究 $^{64}\text{Ni}+^{208}\text{Pb}$; Lunardi(2007)
- 2、丰中子、丰质子新核素合成
- 3、对转移机制 $^{48}\text{Ca}+^{124}\text{Sn}$; Corradi(1996)
- 4、.....

- 缺少专门的实验装置
- 短寿命和长寿命的新核素如何鉴别
- 缺乏可靠的理论指导
-

□ 多核子转移反应的理论研究进展:

No approach is currently predominant

- 基于主方程或者FP方程的输运理论
Riedel(1979), Feng(2009), Zhu(2016), Zhang(2018)
- 基于郎之万方程的输运理论
Karpov(2017), Zagrebaev(2011)
- GRAZING模型
Winther(1995), Yanez(2015)

- 时间依赖的HF方法(TDHF);
Sekizawa(2013), Wu and Guo(2019), Jiang and Wang(2020)
- 改进的量子分子动力学(IQMD)
Tian(2009), Zhao(2015), Li(2017)
- 随机平均场理论结合量子输运方法
Ayik(2018)

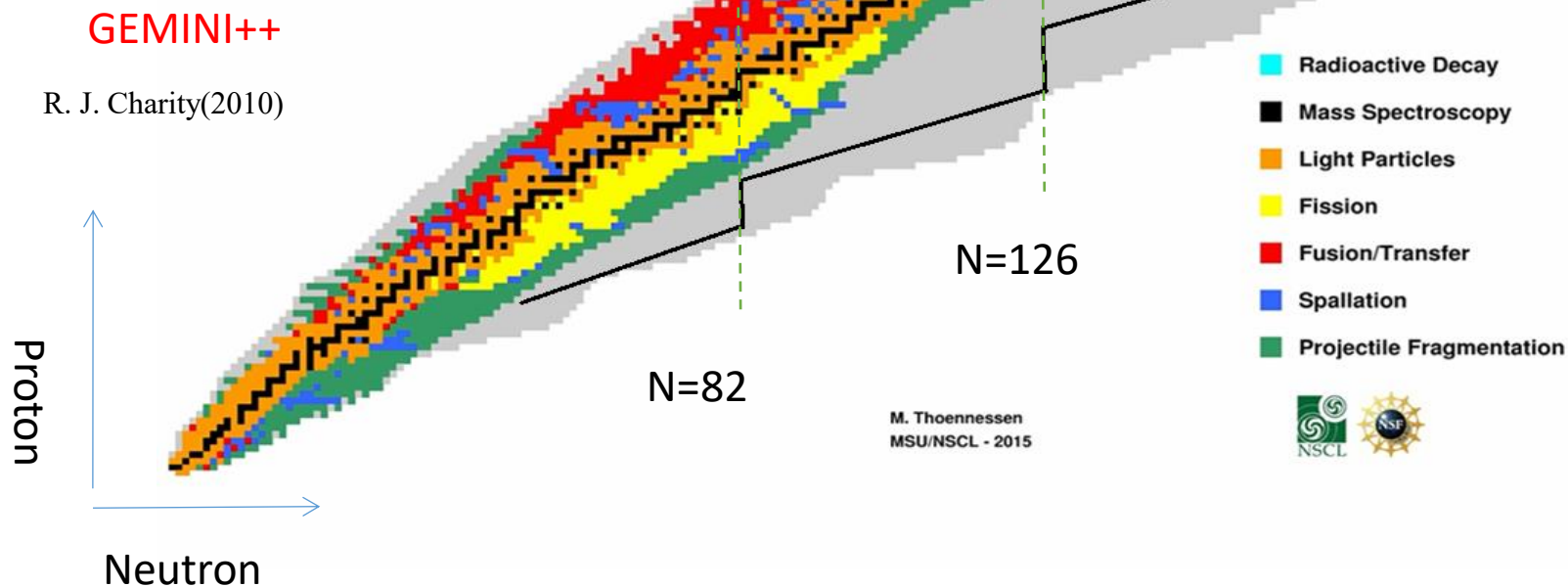
实验和理论相互依存，共同向前发展

多核子转移反应

多核子转移截面

$$\sigma_{Z_1, N_1}^{\text{pri}}(E_{\text{c.m.}}) = \frac{\pi \hbar^2}{2\mu E_{\text{c.m.}}} \sum_J (2J+1) T(E_{\text{c.m.}}, J) \\ \times \sum_{\beta_1} \sum_{\beta_2} \underbrace{P(Z_1, N_1, \beta_1, \beta_2, J, \tau_{\text{int}})}$$

$$\sigma_{Z_1, N_1}^{\text{fin}}(E_{\text{c.m.}}) = \sum_{Z'_1, N'_1, J'} \sigma_{\text{pri}}(Z'_1, N'_1, J') \times \underbrace{P(Z_1, N_1; Z'_1, N'_1, J')}$$



基于改进的双核模型+GEMINI++ 描述多核子转移反应的可靠性

$$\begin{aligned} \frac{dP(Z_1, N_1, \beta_1, \beta_2, t)}{dt} = & \sum_{Z'_1} W_{Z_1, N_1, \beta_1, \beta_2; Z'_1, N_1, \beta_1, \beta_2}(t) \times \\ & [d_{Z_1, N_1, \beta_1, \beta_2} P(Z'_1, N_1, \beta_1, \beta_2, t) - d_{Z'_1, N_1, \beta_1, \beta_2} P(Z_1, N_1, \beta_1, \beta_2, t)] \\ & + \sum_{N'_1} W_{Z_1, N_1, \beta_1, \beta_2; Z_1, N'_1, \beta_1, \beta_2}(t) \times \\ & [d_{Z_1, N_1, \beta_1, \beta_2} P(Z_1, N'_1, \beta_1, \beta_2, t) - d_{Z_1, N'_1, \beta_1, \beta_2} P(Z_1, N_1, \beta_1, \beta_2, t)] \\ & + \sum_{\beta'_1} W_{N_1, Z_1, \beta_1, \beta_2; N_1, Z_1, \beta'_1, \beta_2}(t) \times \\ & [d_{Z_1, N_1, \beta_1, \beta_2} P(Z_1, N_1, \beta'_1, \beta_2, t) - d_{Z_1, N_1, \beta'_1, \beta_2} P(Z_1, N_1, \beta_1, \beta_2, t)] \\ & + \sum_{\beta'_2} W_{N_1, Z_1, \beta_1, \beta_2; N_1, Z_1, \beta_1, \beta'_2}(t) \times \\ & [d_{Z_1, N_1, \beta_1, \beta_2} P(Z_1, N_1, \beta_1, \beta'_2, t) - d_{Z_1, N_1, \beta_1, \beta'_2} P(Z_1, N_1, \beta_1, \beta_2, t)]. \end{aligned}$$

$$\sigma_{Z_1, N_1}^{\text{fin}}(E_{\text{c.m.}}) = \sum_{Z'_1, N'_1, J'} \sigma_{\text{pri}}(Z'_1, N'_1, J') P(Z_1, N_1; Z'_1, N'_1, J').$$

GEMINI++ Charity(2010)

- ✓ 描述转移若干个核子后的可靠性
- ✓ 计算不同弹靶组合转移截面的有效性
- ✓ 分析转移截面的激发能依赖行为

Phys.Rev.C 110,054601(2024)

Phys.Lett.B 833,137307(2022)

Chin.Phys.C 46,094102 (2022)

Phys.Rev.C 105,024610(2022)

Phys.Rev.C 104,034604(2021)

Phys.Rev.C 103,064613(2021)

Phys.Rev.C 103,024613(2021)

Nucl.Phys.A 1011,122196 (2021)

Phys.Rev.C 102,054613(2020)

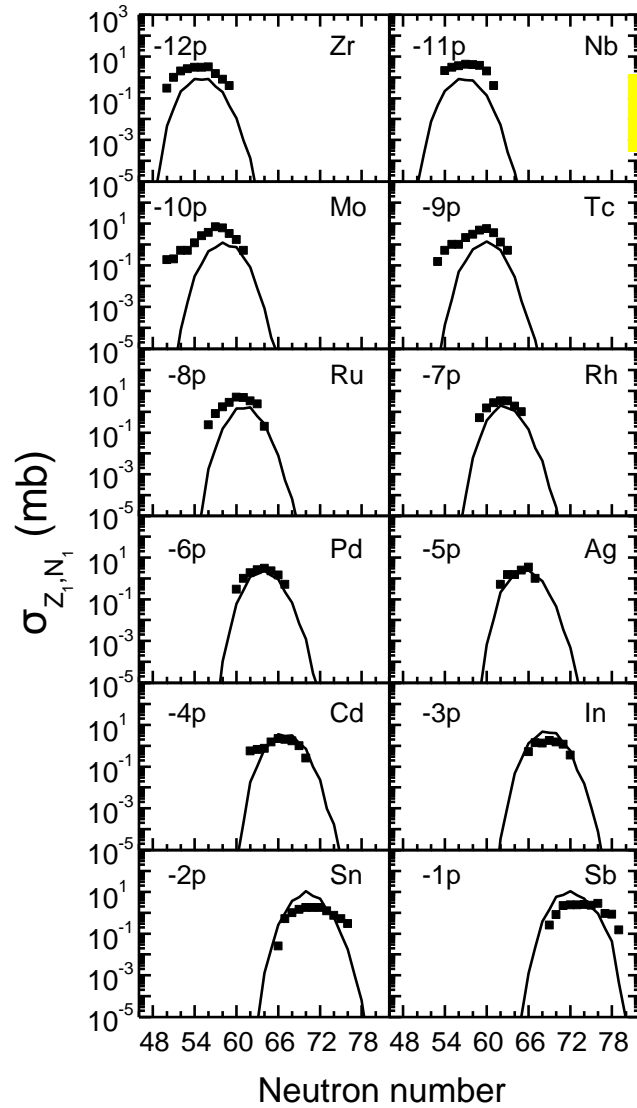
Phys.Rev.C 102,064604(2020)

Phys.Rev.C 100,054616(R)(2019)

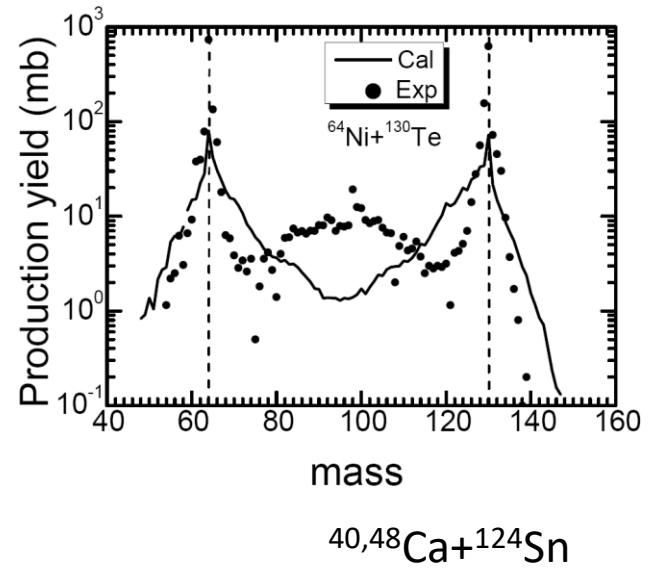
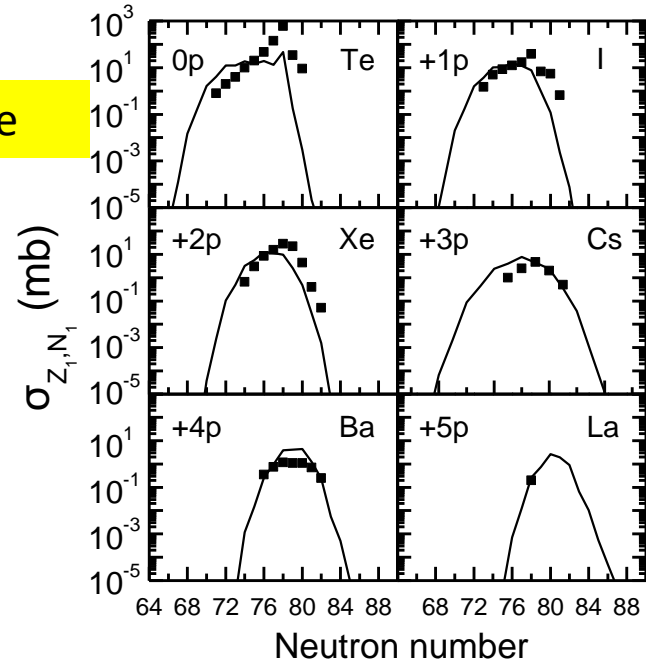
Phys.Rev.C 97,024617(2018)

Phys.Lett.B 785,221(2018)

靶核选取为Z=50附近的原子核

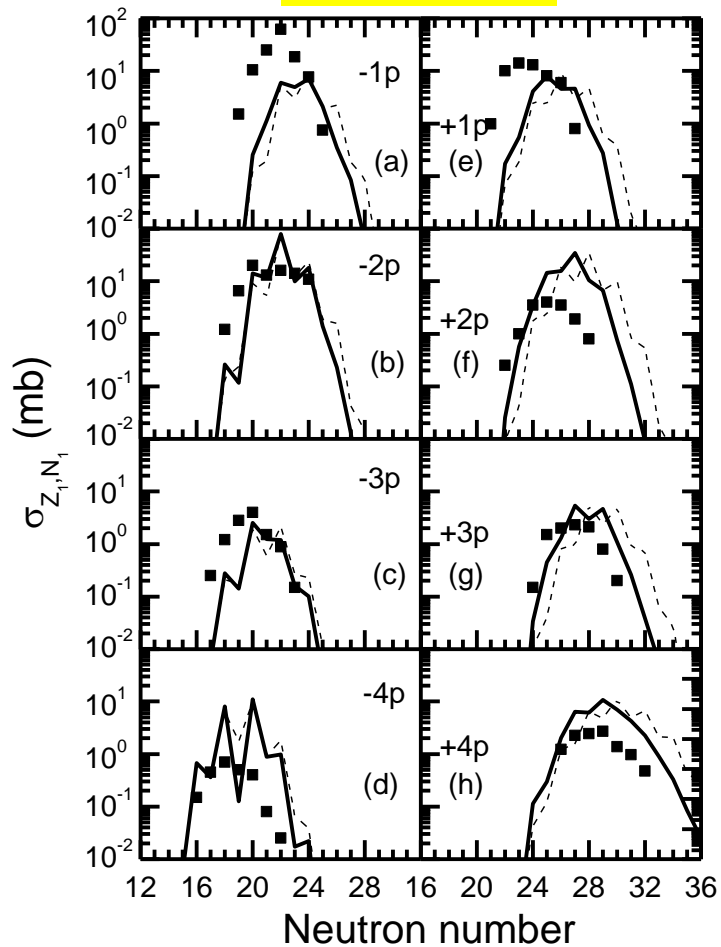


$^{64}\text{Ni}+^{130}\text{Te}$



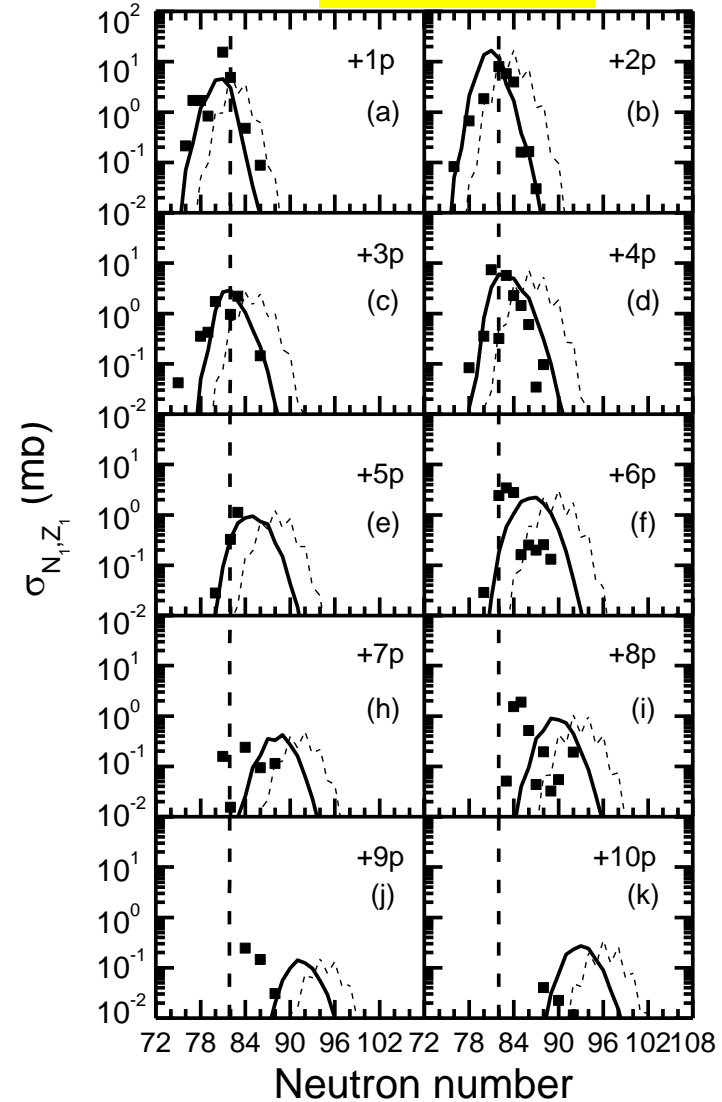
靶核选取为 $Z=82$ 附近的原子核

$^{40}\text{Ar}+^{208}\text{Pb}$

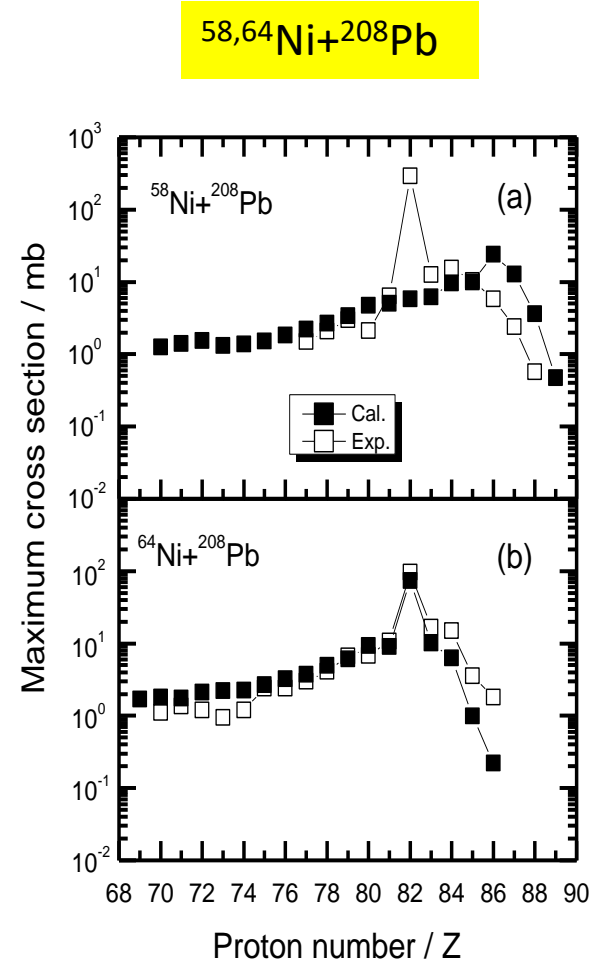
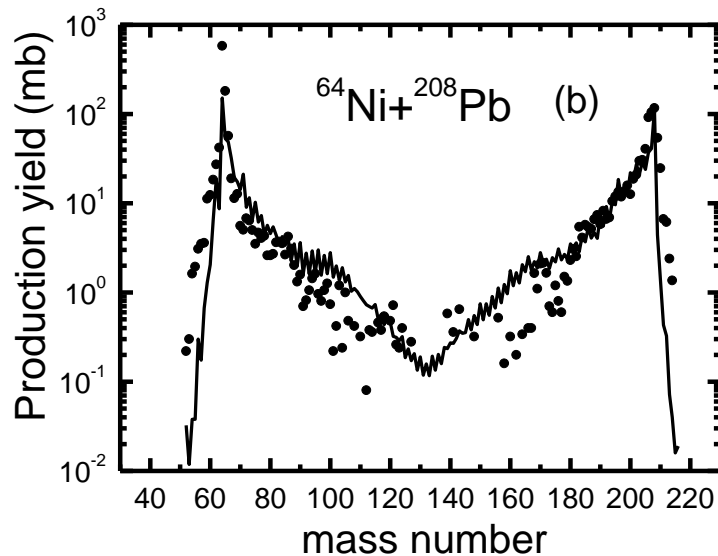
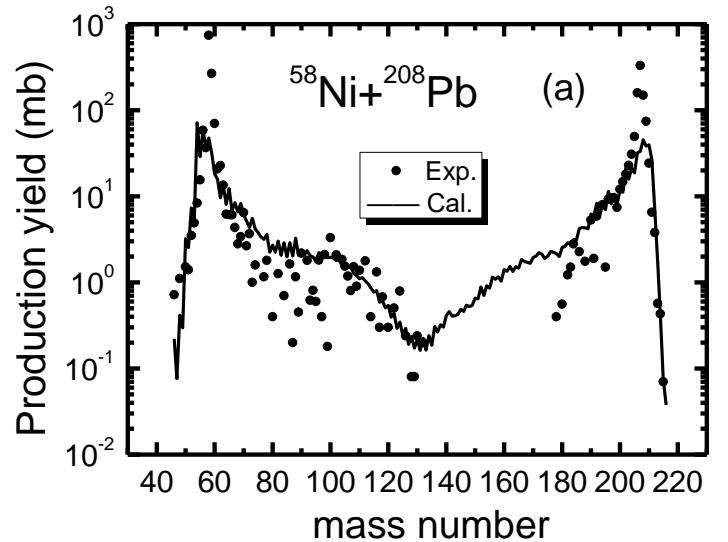


$^{40}\text{Ca}, ^{58}\text{Ni}, ^{40}\text{Ar}, ^{64}\text{Ni}, ^{136}\text{Xe}+^{208}\text{Pb}$

$^{136}\text{Xe}+^{208}\text{Pb}$



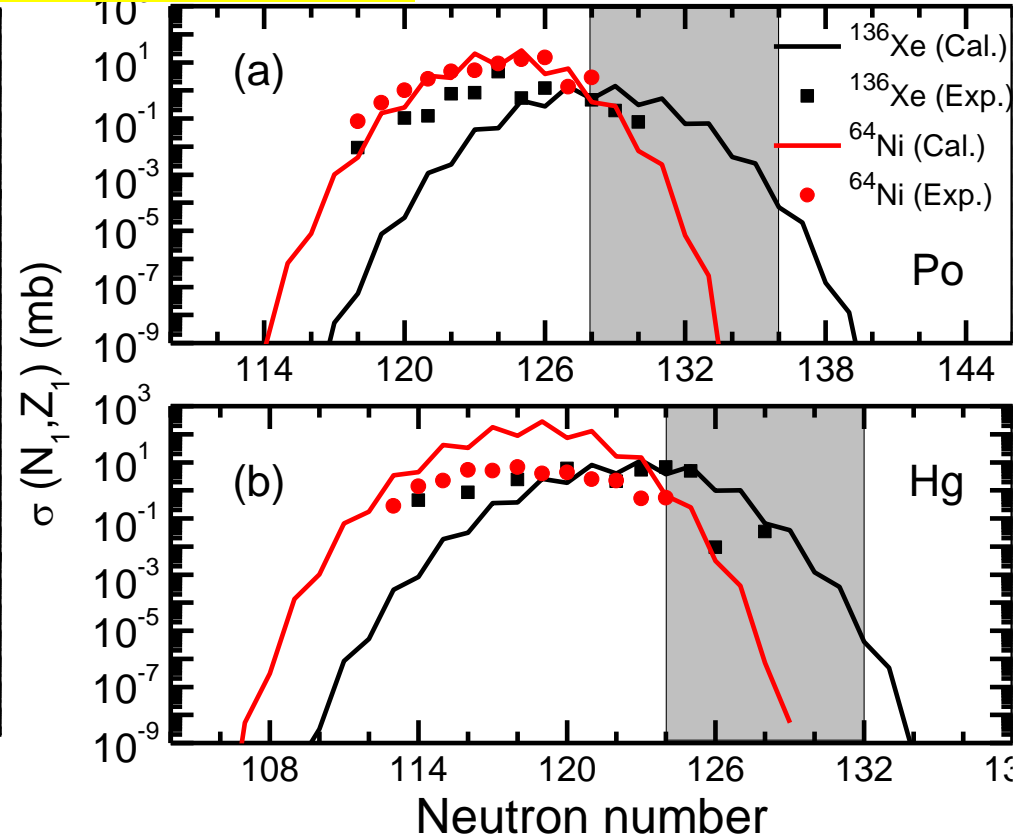
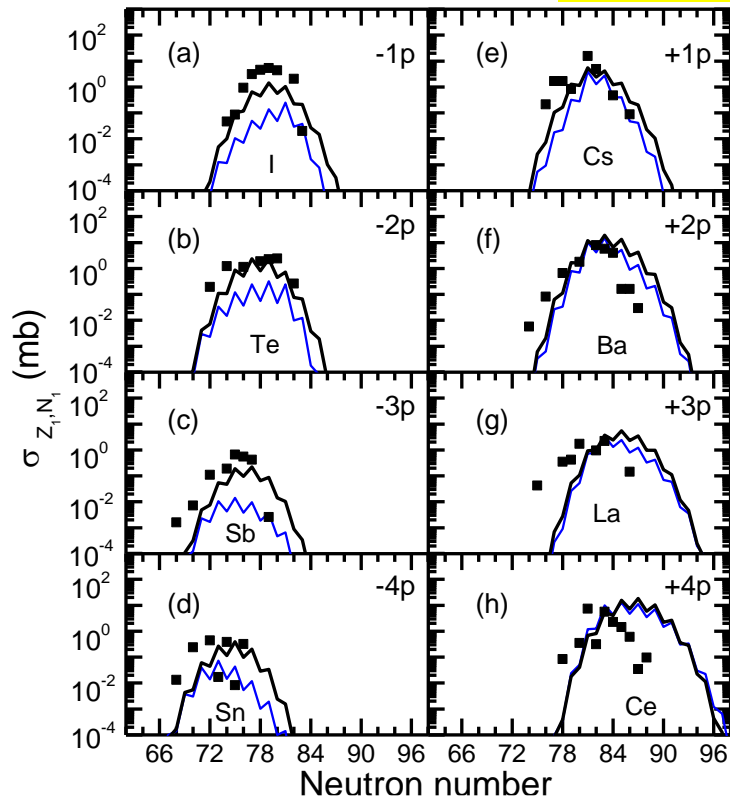
靶核选取为 $Z=82$ 附近的原子核



Zhi Cheng, Xiao Jun Bao*; *Phys.Rev.C* 103,064613(2021)

靶核选取为 $Z=82$ 附近的原子核

$^{64}\text{Ni}+^{208}\text{Pb}$ and $^{136}\text{Xe}+^{208}\text{Pb}$

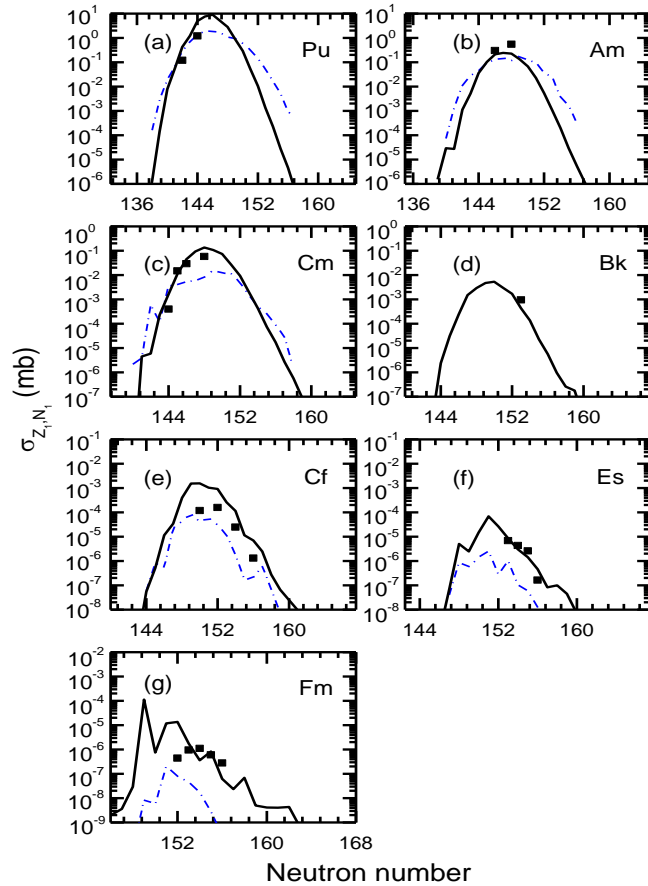


Xiao Jun Bao, Shu Qing Guo, Jun Qing Li and Hong Fei Zhang, Phys.Lett. B 785, 221 (2018)

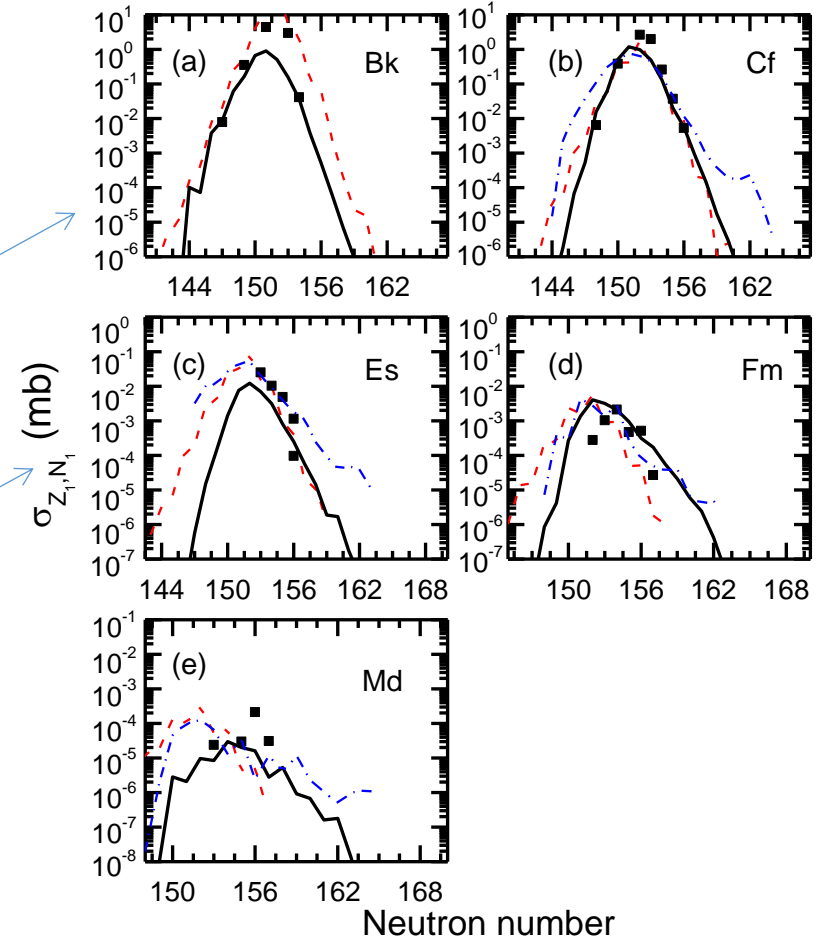
- 基于考虑温度效应的势能曲面，很大程度上改善了双核模型描述多核子转移截面的实验测量值
- 对比不同中质比的炮弹 (^{136}Xe ($N/Z=1.51$)与 ^{64}Ni ($N/Z=1.28$)) 产生的转移反应截面，高中质比的炮弹更有利于合成丰中子重核

靶核选取锕系原子核

$^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$

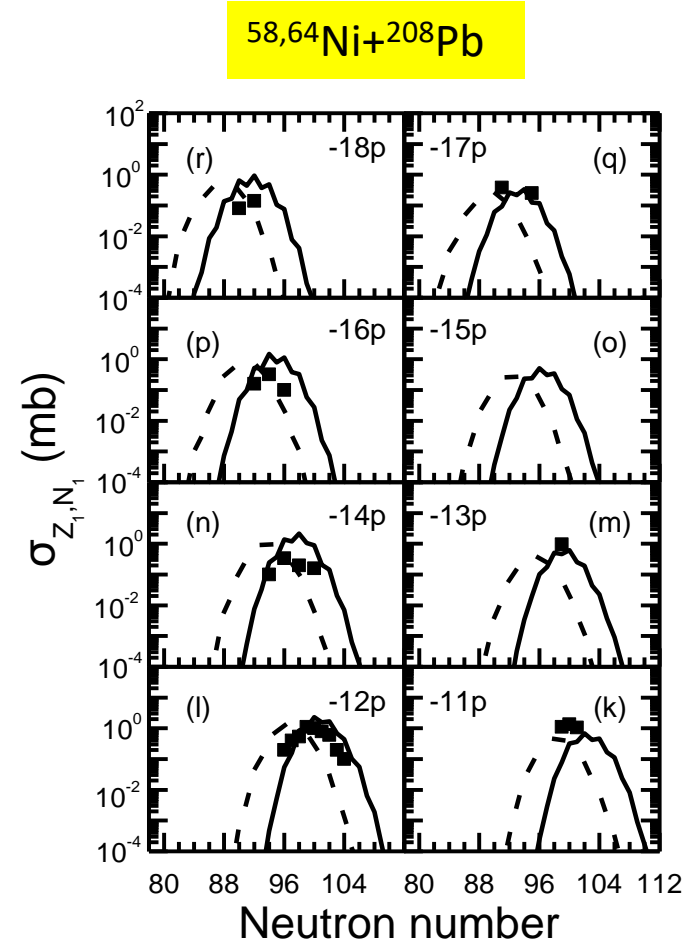
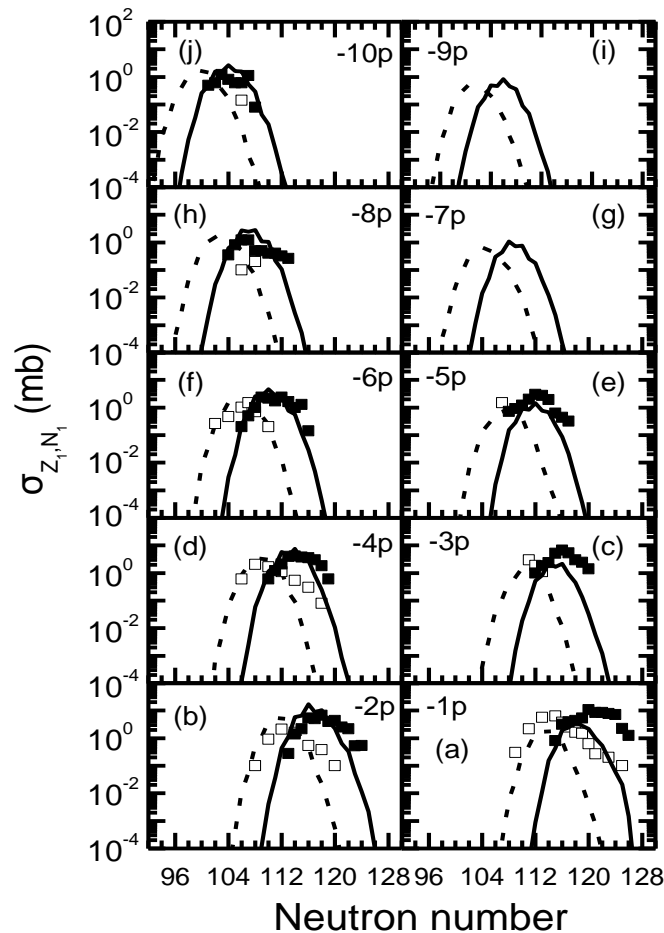


$^{238}\text{U}+^{248}\text{Cm}$



Xiao Jun Bao*, *Phys.Rev.C*, 104,034604(2021)

描述转移若干个核子后的可靠性

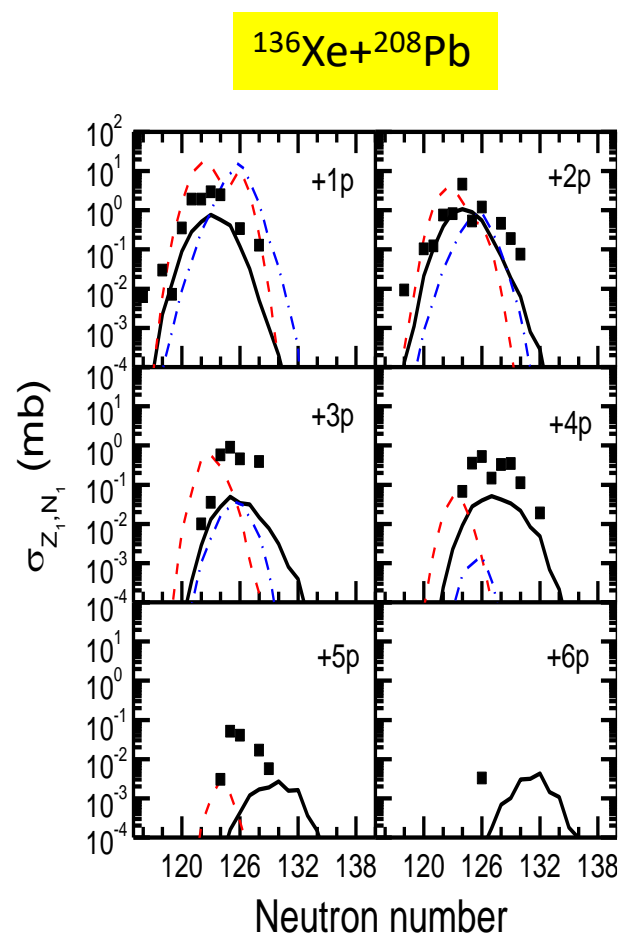
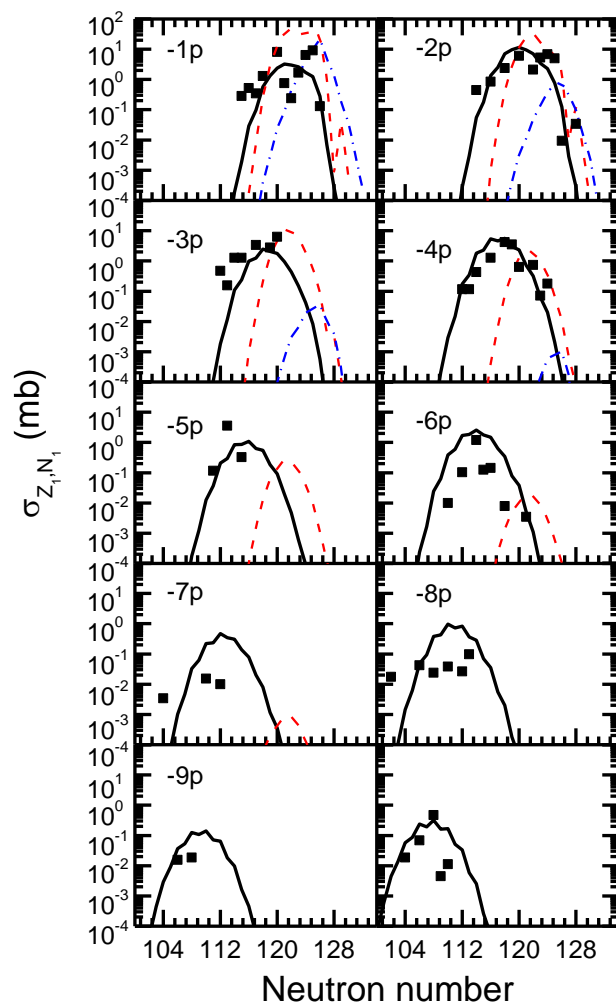


Zhi Cheng, Xiao Jun Bao*; *Phys.Rev.C* 103, 064613(2021).

- 基于考虑动力学效应的势能曲面，很大程度上改善了双核模型描述多核子转移截面的实验测量值

- 对比不同中质比的炮弹 ^{64}Ni ($N/Z=1.28$) 与 ^{58}Ni ($N/Z=1.07$) 产生的转移反应截面，高中质比的炮弹更有利于合成丰中子重核

描述转移若干个核子后的可靠性

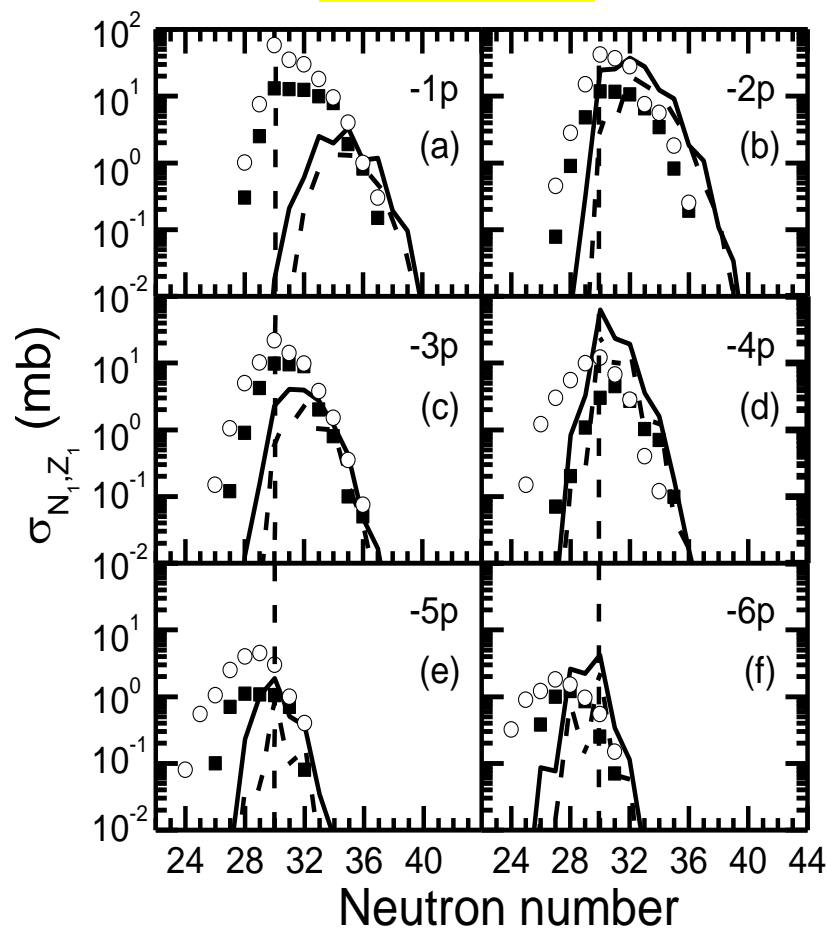


- IDNS+GEMINI++的结果用实线表示
- TDHF+GEMINI++的结果用蓝色虚点线表示
- GRAZING+GEMINI++的结果用红色虚线表示

Xiao Jun Bao*, *Phys.Rev.C*, 102,064604(2020)

不同事件能量下的转移截面（激发函数）

$^{58}\text{Ni}+^{208}\text{Pb}$

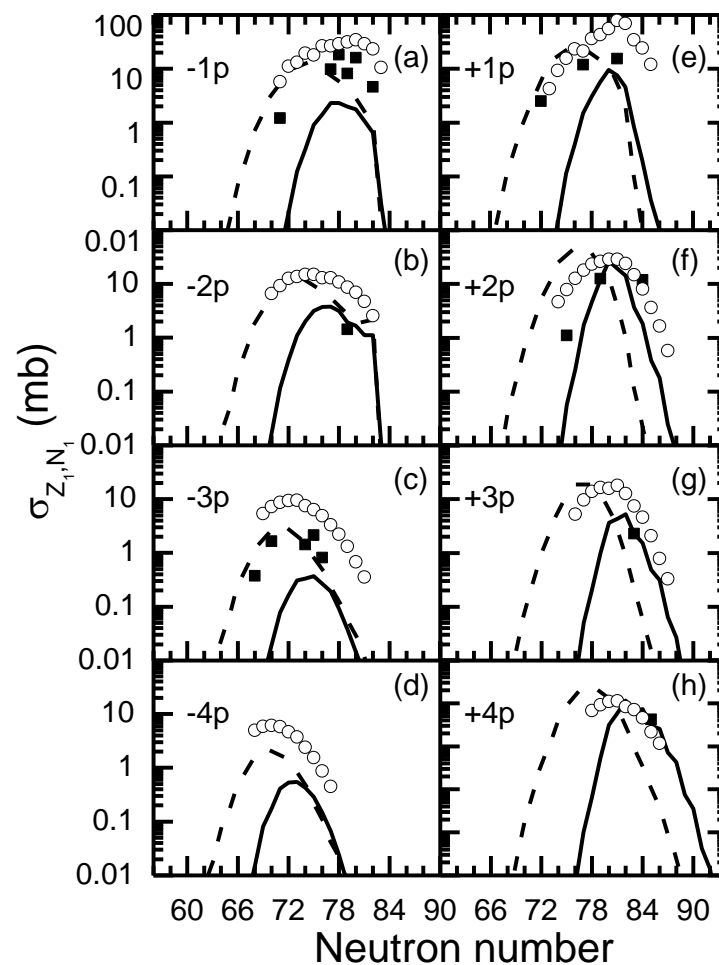


$E_{c.m.}=256.80$ MeV (dashed lines)

$E_{c.m.}=270.56$ MeV (solid lines)

Xiao Jun Bao*, *Phys.Rev.C*, 102,054613(2020); 102,064604(2020).

$^{136}\text{Xe}+^{198}\text{Pt}$



$E_{c.m.}=643.00$ MeV (dashed lines)

$E_{c.m.}=451.00$ MeV (solid lines)

- 基于分类考虑形变效应对势垒分布的影响，结合经验的耦合道模型能很好的描述近库仑位垒和垒上的俘获截面
- 基于四变量主方程研究了双核系统的多核子重排过程
 - 考虑动力学形变效应的影响，很大程度上改善了理论计算对实验上测量的准裂变产额分布的描述能力。
 - 为了合理地描述大幅度的集体运动（熔合反应、多核子转移反应），输运理论相对应的位能曲面中需要考虑温度效应和方向角效应的影响
- 基于统计方法研究了复合核的退激过程，研究表明蒸发剩余截面**敏感的依赖于**中子分离能、裂变位垒高度(超重稳定岛的位置)和描述退激发过程的理论方法。

谢谢大家！