

# 电荷平衡在多核子转移反应中对 $N=126$ 左右 丰中子同位素产生的影响



——第十八届核物理大会

报告人：廖泽鸿  
指导老师：祝 龙

浙江·湖州

Sino-French Institute of Nuclear Engineering and Technology

# 报告提纲



中山大學  
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

1

引言

2

电荷平衡与多核子转移反应

[PHYSICAL REVIEW C **107**, 014614 (2023)]

3

总结



# N = 126 丰中子核素



Institut Sino-chinois de l'énergie nucléaire

Z=119,120

N = 126 丰中子核素的合成及其结构和衰变性质

稳定岛

核天体物理中r过程的具体天体环境和详细演化路径。

□ N = 126 新核素 & r-process

- Mass Spectroscopy
- Radioactive Decay
- Light Particles
- Fission
- Fusion
- Spallation
- Projectile Fragmentation
- Transfer/Deep Inelastic

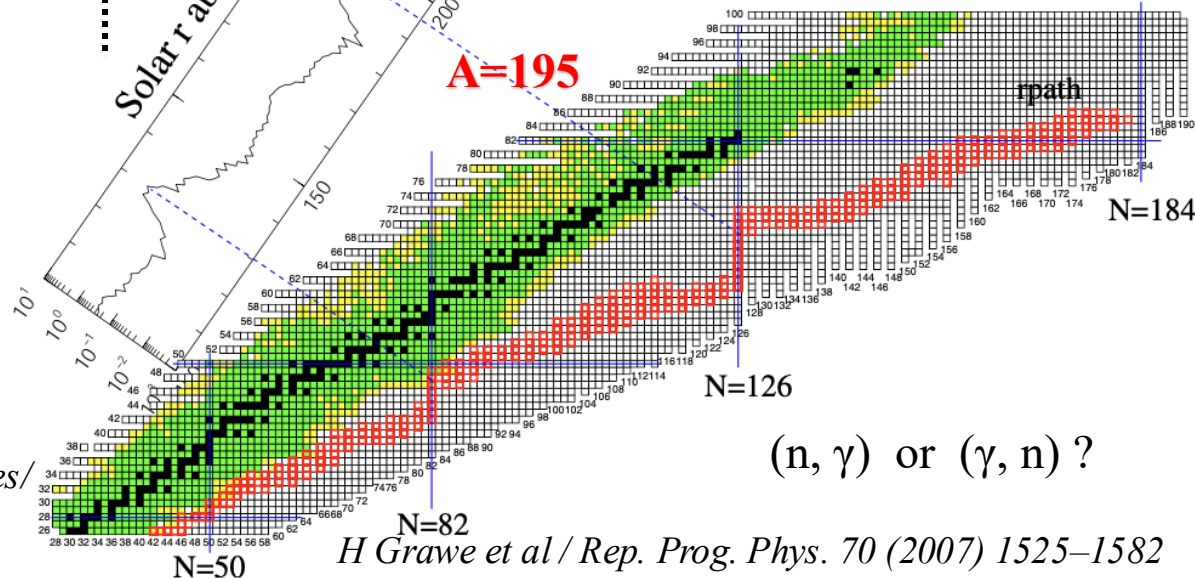
N=126

Solar r abundances

A=195

- Known mass
- Known halflife
- r-process waiting point (ETFSI-Q)

3386 nuclides known  
288 natural nuclei:  
254 stable  
34 unstable



(n, γ) or (γ, n) ?

H Grawe et al / Rep. Prog. Phys. 70 (2007) 1525–1582

合成极端丰中子核素 → 同位旋自由度演化 → 理解电荷平衡

### 经典体系中的平衡过程

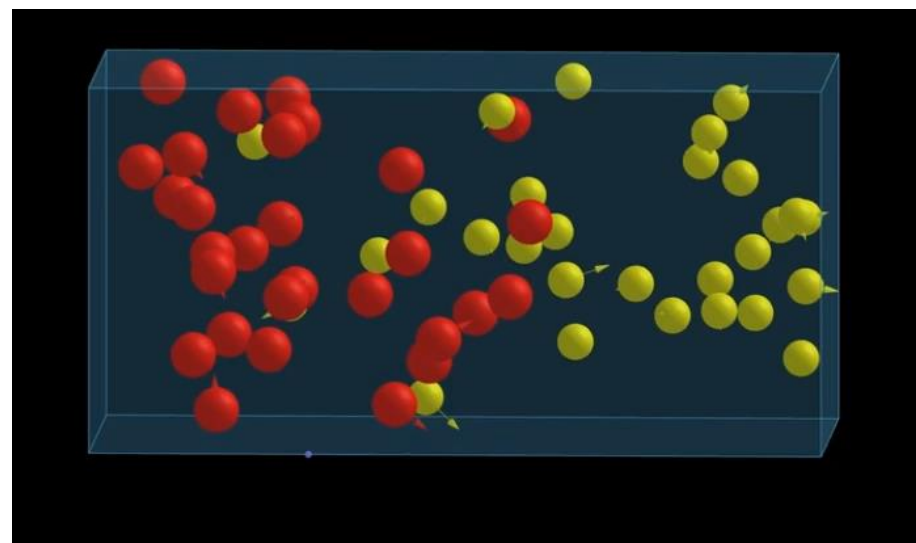
非平衡状态



平衡状态

墨水扩散

温度扩散



### 量子体系中的平衡过程

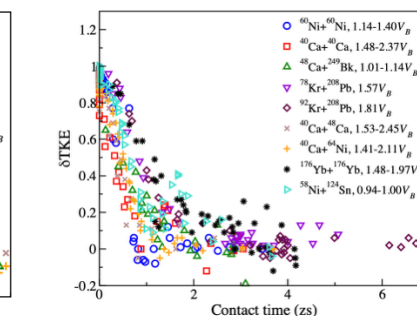
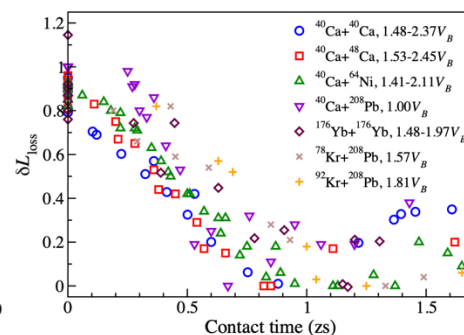
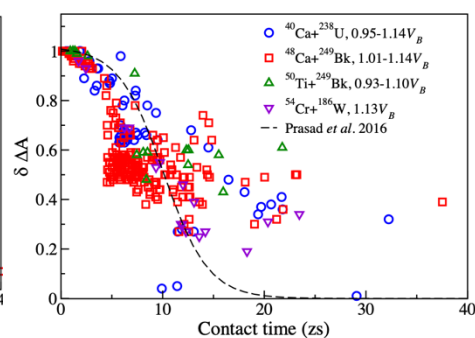
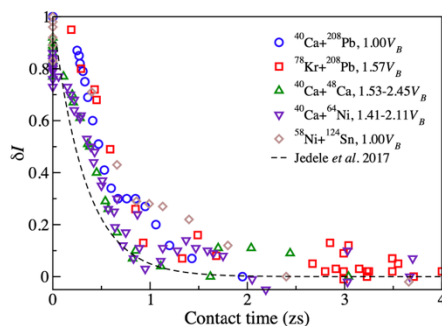
电荷

质量

角动量

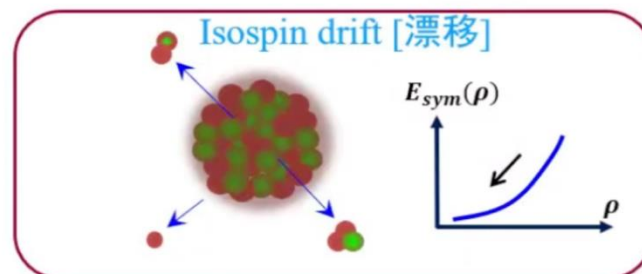
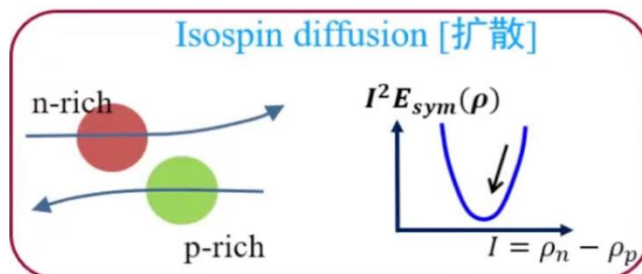
动能

C. Simenel/PHYSICAL REVIEW LETTERS 124, 212504 (2020)



时间依赖的 Hartree-Fock 方法 (TDHF)

## □ 电荷平衡 (中质比平衡) & 核子的输运行为

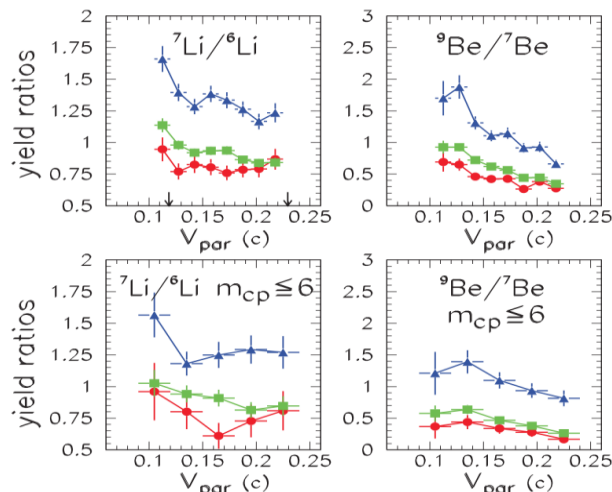


$$j_{np} = j_n^\rho - j_p^\rho = (D_n^I - D_p^I) \nabla I + (D_n^\rho - D_p^\rho) \nabla \rho$$

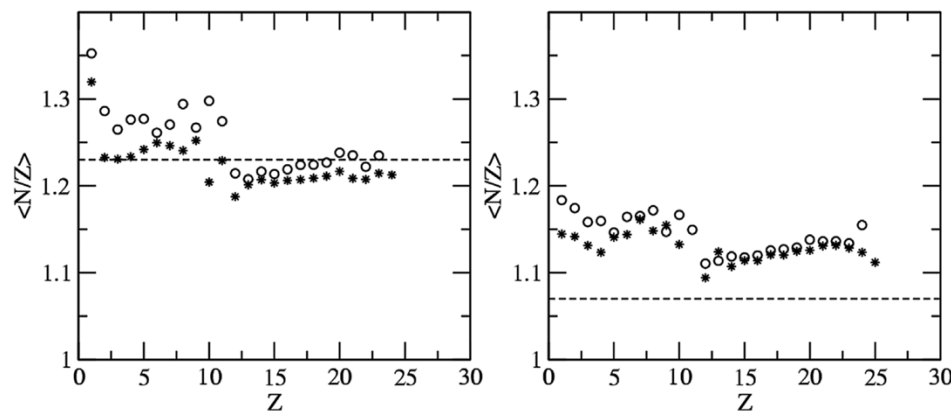
$\rightarrow \propto E_{\text{sym}}(\rho)$ 
 $\rightarrow \propto 4I \frac{\partial E_{\text{sym}}(\rho)}{\partial \rho}$

肖志刚、田俊龙. (2022-07-22). 中高能核反应实验研究基础讲座. <https://www.koushare.com/video/videodetail/31287>

### ➤ Isospin diffusion @ 40Ca + 48Ca



### ➤ Isospin drift @ 58Ni + 58Ni



R. Lioni et al. / Physics Letters B 625 (2005) 33–40

Phys. Rev. C 82, 014608 (2010).

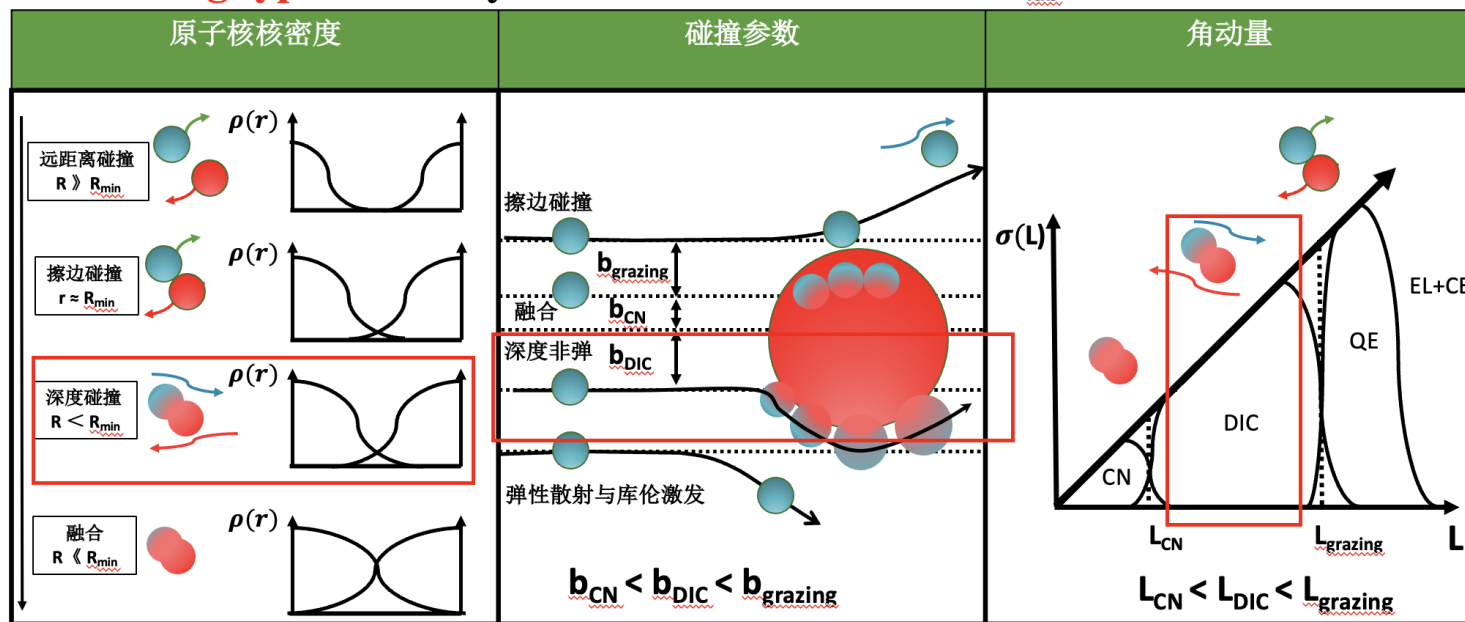


## 多核子转移反应

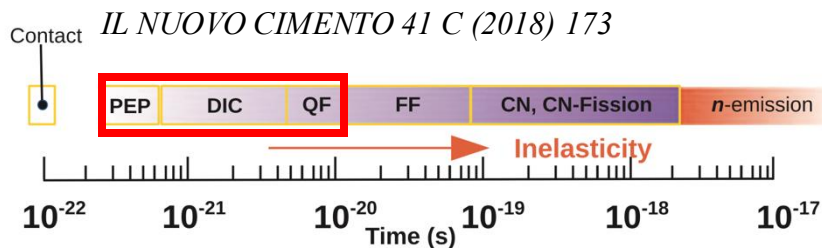
V.V. Volkov, Phys. Rep. 44, 93 (1978)

### Scattering types in heavy ion collision:

$E_{lab} < 10 \text{ MeV/u}$



融合反应: CN 深度非弹反应: DIC 准弹性反应: QE 擦边反应: Grazing



电荷平衡

多核子转移反应

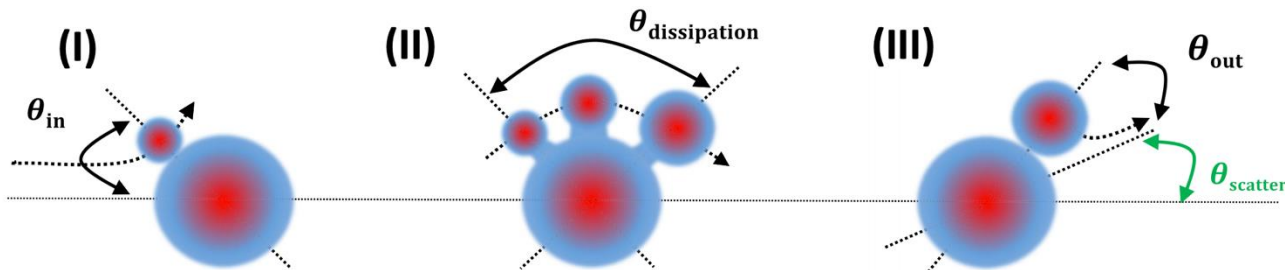
宏观DNS 模型



## 电荷平衡与多核子转移反应

[PHYSICAL REVIEW C **107**, 014614 (2023)]

### □ 双核模型 (Dinuclear system model & DNS-sysu)



### □ 主方程 *Zhu L / PHYSICAL REVIEW C 104, 044606 (2021)*

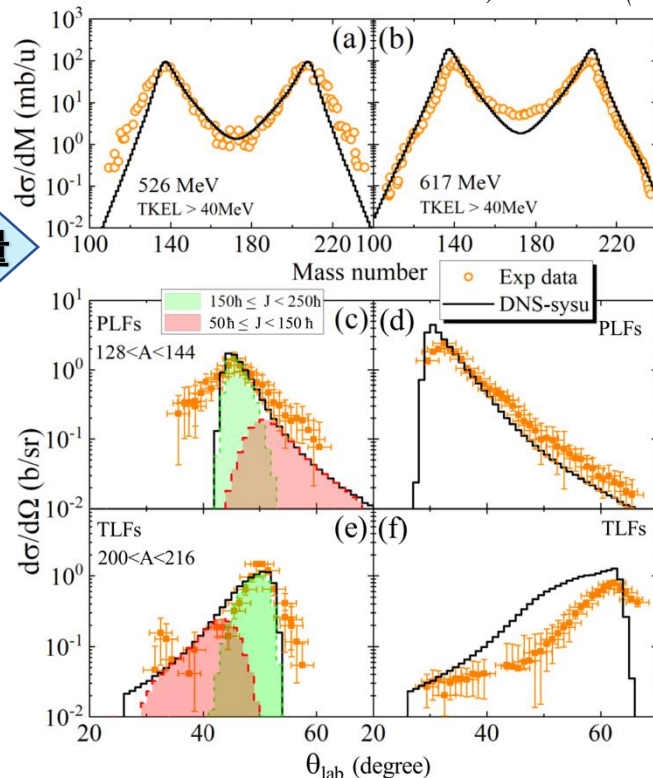
$$\begin{aligned} & \frac{dP(Z_1, N_1, \beta_2, J, t)}{dt} \\ &= \sum_{Z'_1} W_{Z_1, N_1, \beta_2; Z'_1, N_1, \beta_2}(t) [d_{Z_1, N_1, \beta_2} P(Z'_1, N_1, \beta_2, J, t) \\ & \quad - d_{Z'_1, N_1, \beta_2} P(Z_1, N_1, \beta_2, J, t)] \\ &+ \sum_{N'_1} W_{Z_1, N_1, \beta_2; Z_1, N'_1, \beta_2}(t) [d_{Z_1, N_1, \beta_2} P(Z_1, N'_1, \beta_2, J, t) \\ & \quad - d_{Z_1, N'_1, \beta_2} P(Z_1, N_1, \beta_2, J, t)] \\ &+ \sum_{\beta'_2} W_{Z_1, N_1, \beta_2; Z_1, N_1, \beta'_2}(t) [d_{Z_1, N_1, \beta_2} P(Z_1, N_1, \beta'_2, J, t) \\ & \quad - d_{Z_1, N_1, \beta'_2} P(Z_1, N_1, \beta_2, J, t)]. \end{aligned} \quad (1)$$

合理描述宏观变量

### □ 势能面

$$\begin{aligned} U(Z_1, N_1, \beta_2, J, r = R_{\text{cont}}) &= \Delta(Z_1, N_1) + \Delta(Z_2, N_2) \\ & \quad + V(Z_1, N_1, \beta_2, J, r = R_{\text{cont}}) \\ & \quad + \frac{1}{2} C_1 (\delta \beta_2^1)^2 + \frac{1}{2} C_2 (\delta \beta_2^2)^2. \end{aligned}$$

PHYSICAL REVIEW RESEARCH 5, L022021 (2023)

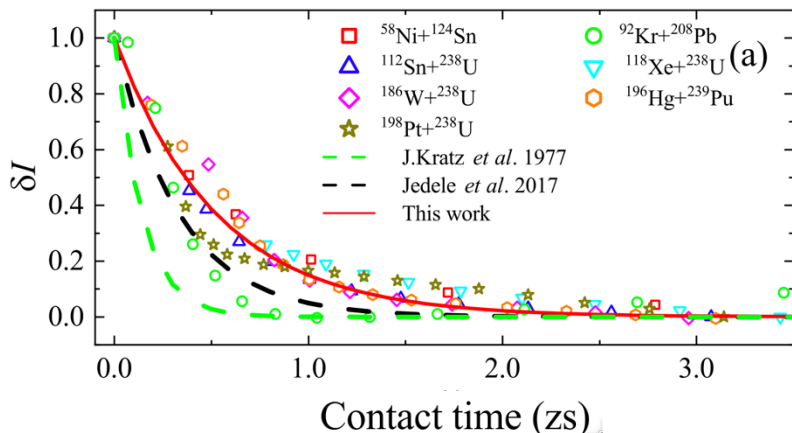




### □ 电荷平衡的特征时间

$$\delta I(t) = [I(t) - I_{\infty}] / (I_0 - I_{\infty})$$

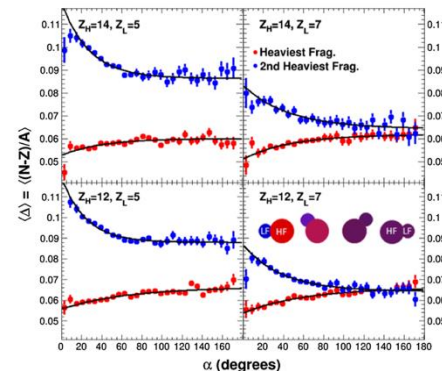
$$\delta I = y_0 + A_0 \exp(-t/\tau)$$



$\tau = 0.3$  zs from Jedelee *et al*  
PRL 118, 062501 (2017)

$\tau = 0.5$  zs from DNS model

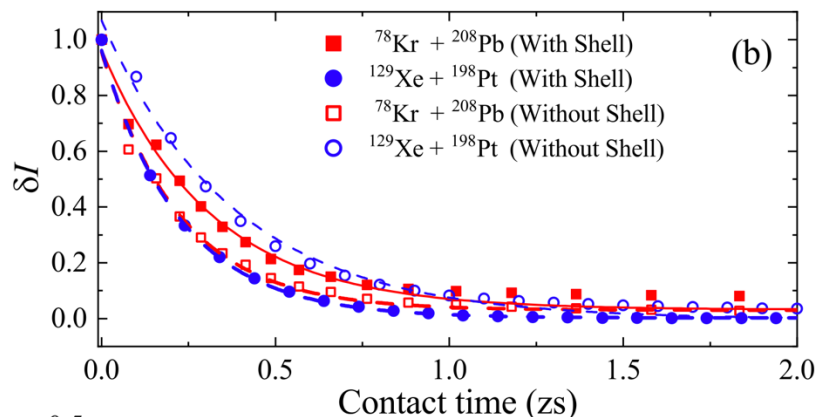
模型	特征时间	Ref
TDHF	0.5 zs	<i>PHYSICAL REVIEW C</i> 96, 024625 (2017)
郎之万模型	0.5 zs	<i>Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.</i> 84, 436 (2020).



不同模型 都给出相似的电荷平衡弛豫时间

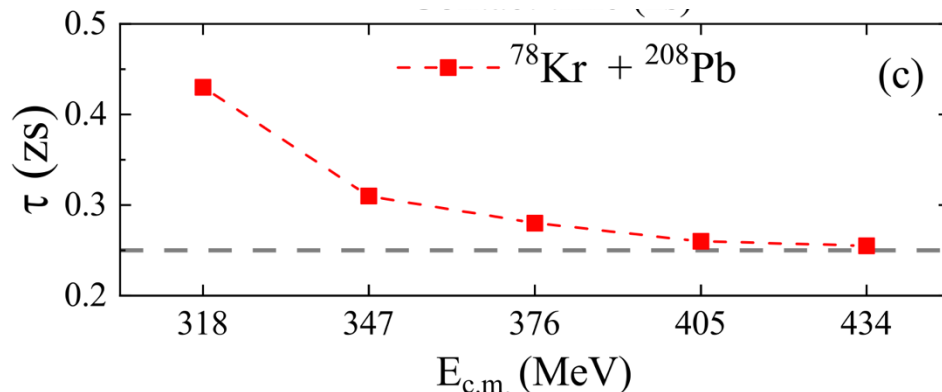
$$1 \text{ zs} = 10^{-21} \text{ s}$$

### □ 壳效应



壳效应略微影响电荷平衡过程

### □ 入射能量

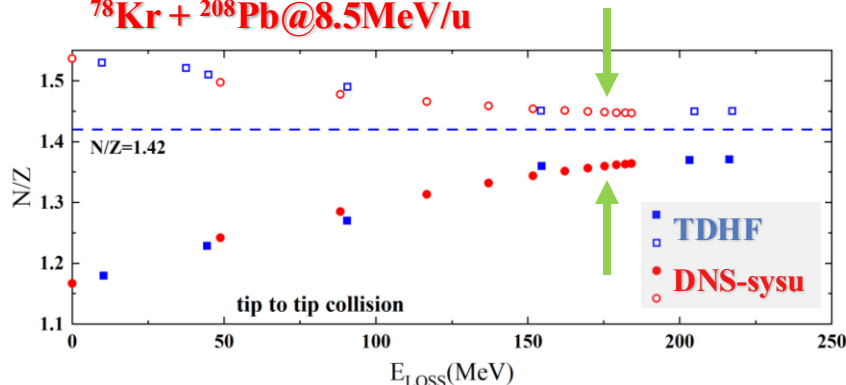


更多耗散进入系统的能量，更小的弛豫时间



### 电荷平衡的演化方向的差异

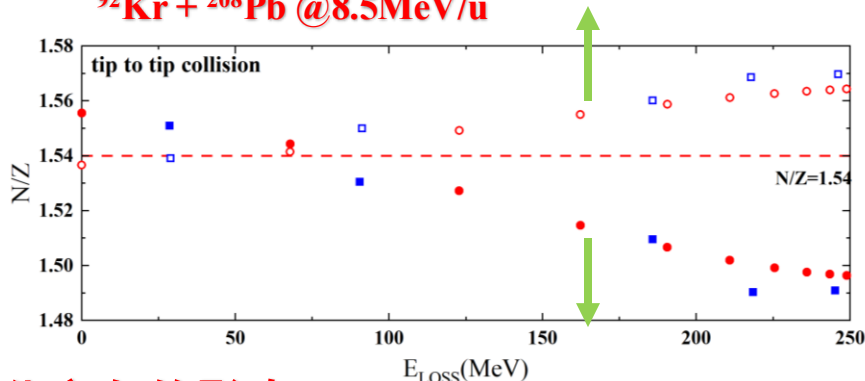
$^{78}\text{Kr} + ^{208}\text{Pb} @ 8.5\text{MeV/u}$



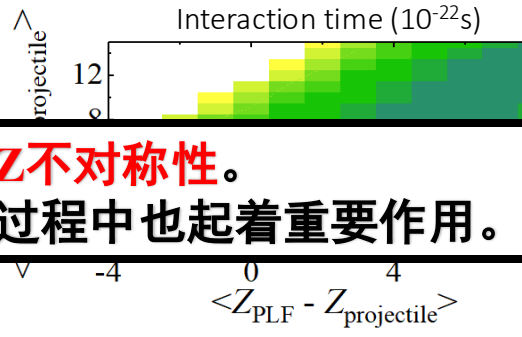
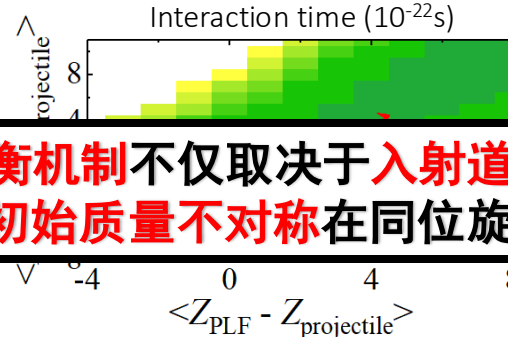
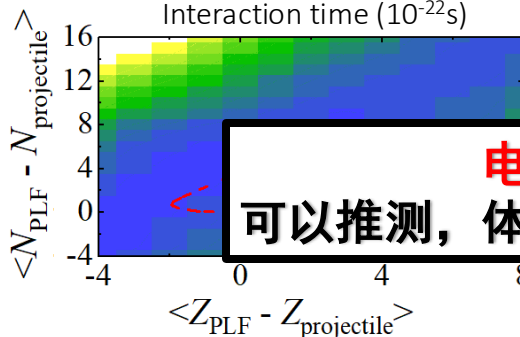
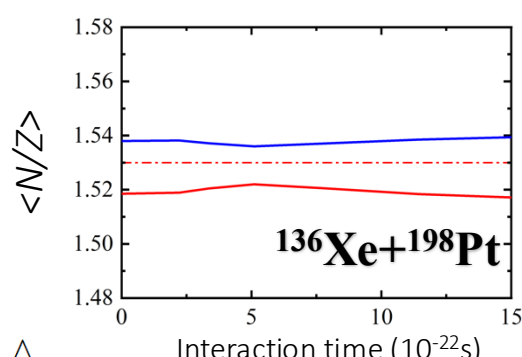
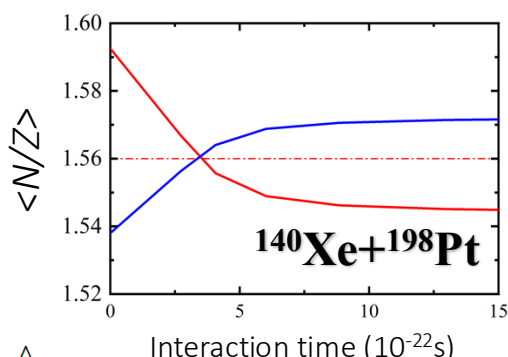
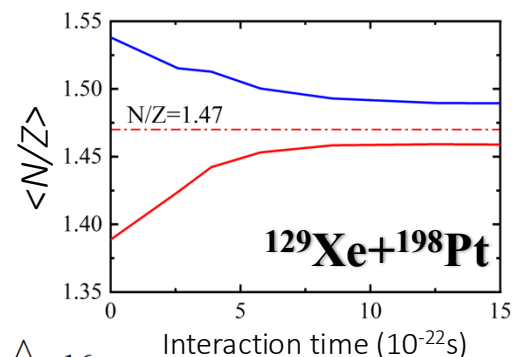
### TDHF 与 DNS 都给出了两种不同的演化趋势

TDHF result from PHYSICAL REVIEW C 96, 024625 (2017)

$^{92}\text{Kr} + ^{208}\text{Pb} @ 8.5\text{MeV/u}$



### 不同N/Z比的弹核对体系电荷平衡演化方向的影响



电荷平衡机制不仅取决于入射道的N/Z不对称性。  
可以推测，体系的初始质量不对称在同位旋输运过程中也起着重要作用。

沿着平衡方向演化

沿着逆平衡方向演化

几乎不演化

## □ 电荷平衡对丰中子核的影响

以 $^{198}\text{Pt}$ 为靶核, 选取近1200个弹核, 提取在不同体系中电荷平衡对 $^{198}\text{Pt}$ 的影响

中子丰度下降

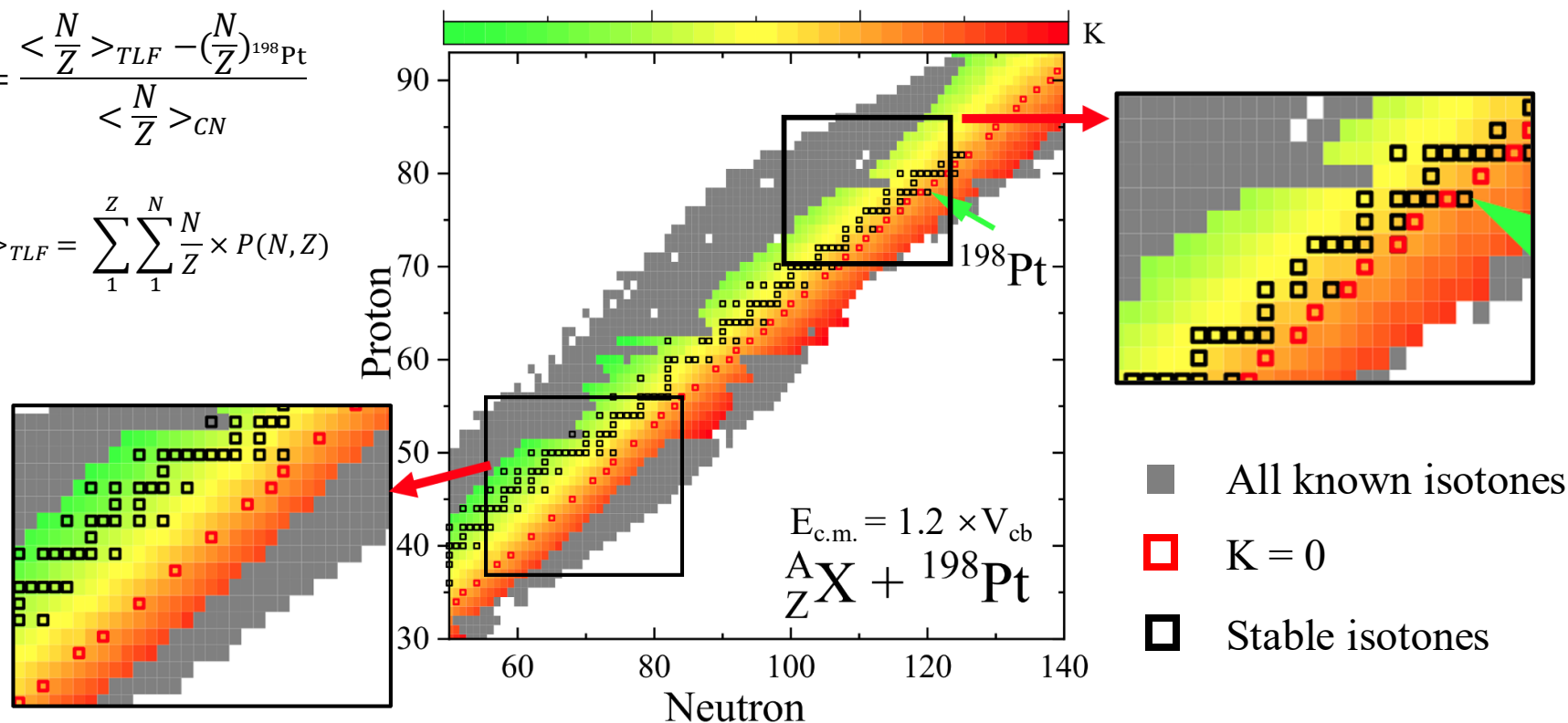
中子丰度上升

$K > 0$

$K < 0$

$$K = \frac{\langle \frac{N}{Z} \rangle_{TLF} - (\frac{N}{Z})^{198\text{Pt}}}{\langle \frac{N}{Z} \rangle_{CN}}$$

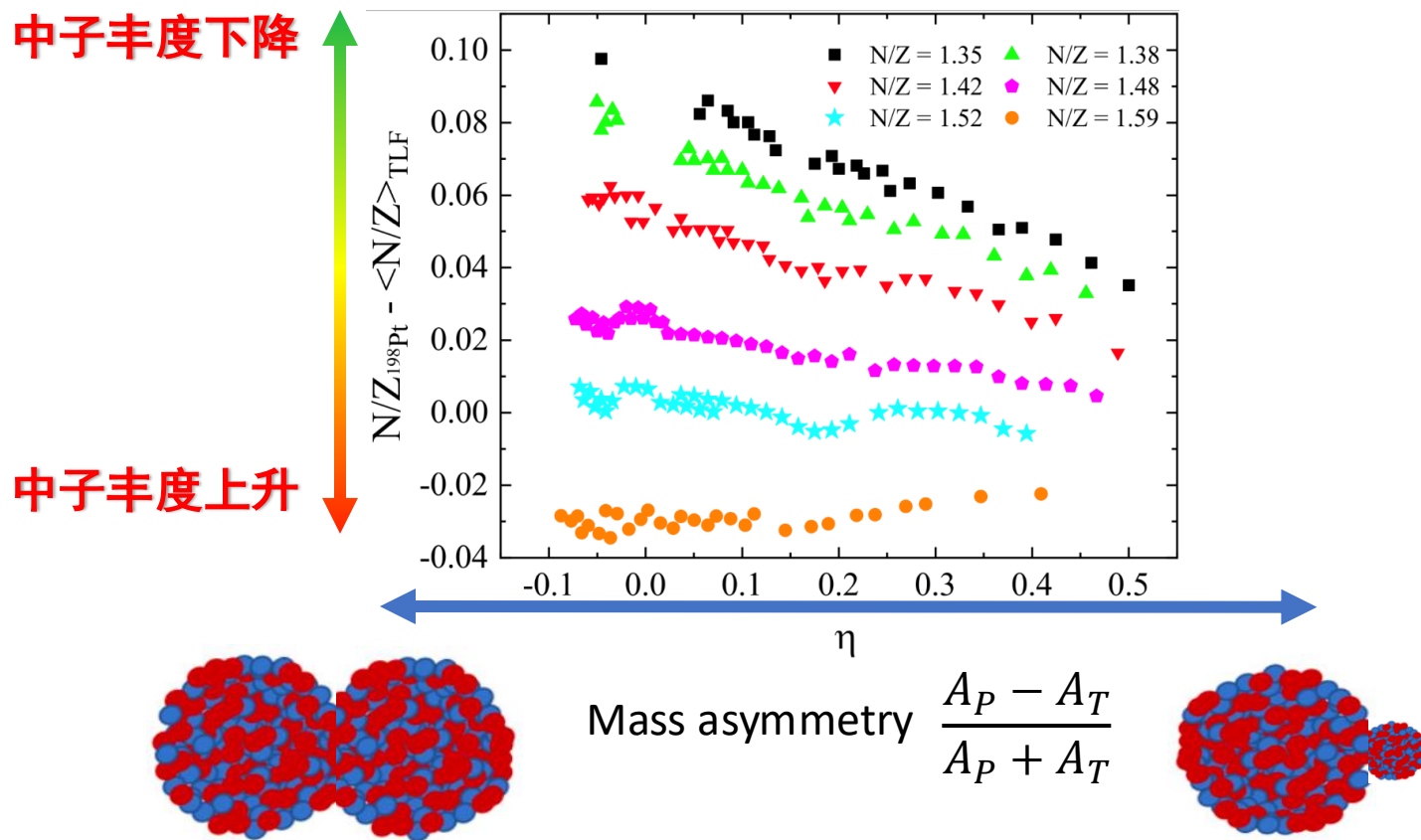
$$\langle \frac{N}{Z} \rangle_{TLF} = \sum_1^Z \sum_1^N \frac{N}{Z} \times P(N, Z)$$



对于轻核区, 只有极其丰中子的放射性弹核束流才能促进丰中子的类 $^{198}\text{Pt}$ 的产生  
对于重核区, 更重的弹核对产生丰中子的类 $^{198}\text{Pt}$ 碎片有更高的效率

## □ 体系质量不对称度 $\eta$ 对电荷平衡的影响

在多核子转移反应中, 电荷平衡表现对**质量不对称度** ( $\eta$ ) 的强烈依赖。



质量相近或者更重的弹核, 其电荷平衡程度会更大, 更利于产生丰中子核素。



- 基于DNS-sysu模型，我们研究了电荷平衡的机制与电荷平衡对丰中子核素产生的影响。
- 在DNS-sysu和TDHF计算中，发现
  - (i) 完整的电荷平衡在质量非对称反应系统中是难以到达的
  - (ii) “逆电荷平衡”发生在 $^{140}\text{Xe} + ^{198}\text{Pt}$ 的反应中。
- 通过系统计算，解释了电荷平衡与反应系统质量不对称性之间的相关性，并通过质量不对称性和碰撞组合的电荷不对称性的叠加来解释上述有趣的电荷平衡行为。



Sun Yat-sen University



Institut franco-chinois de l'énergie nucléaire

**Thank you for your attention!**