



## 第三届“粤港澳”核物理会议

# 利用反质子和pion介子引起的核反应研究中子皮厚度

汇报人：张班

导师：冯兆庆教授

日期：2024.11.17

# 目录

1 研究背景

2 研究方法

3 计算结果

4 总 结

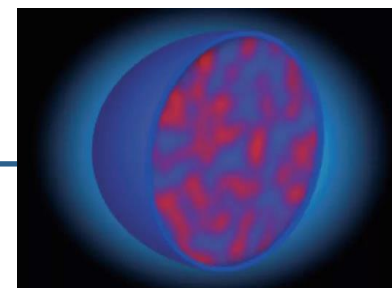
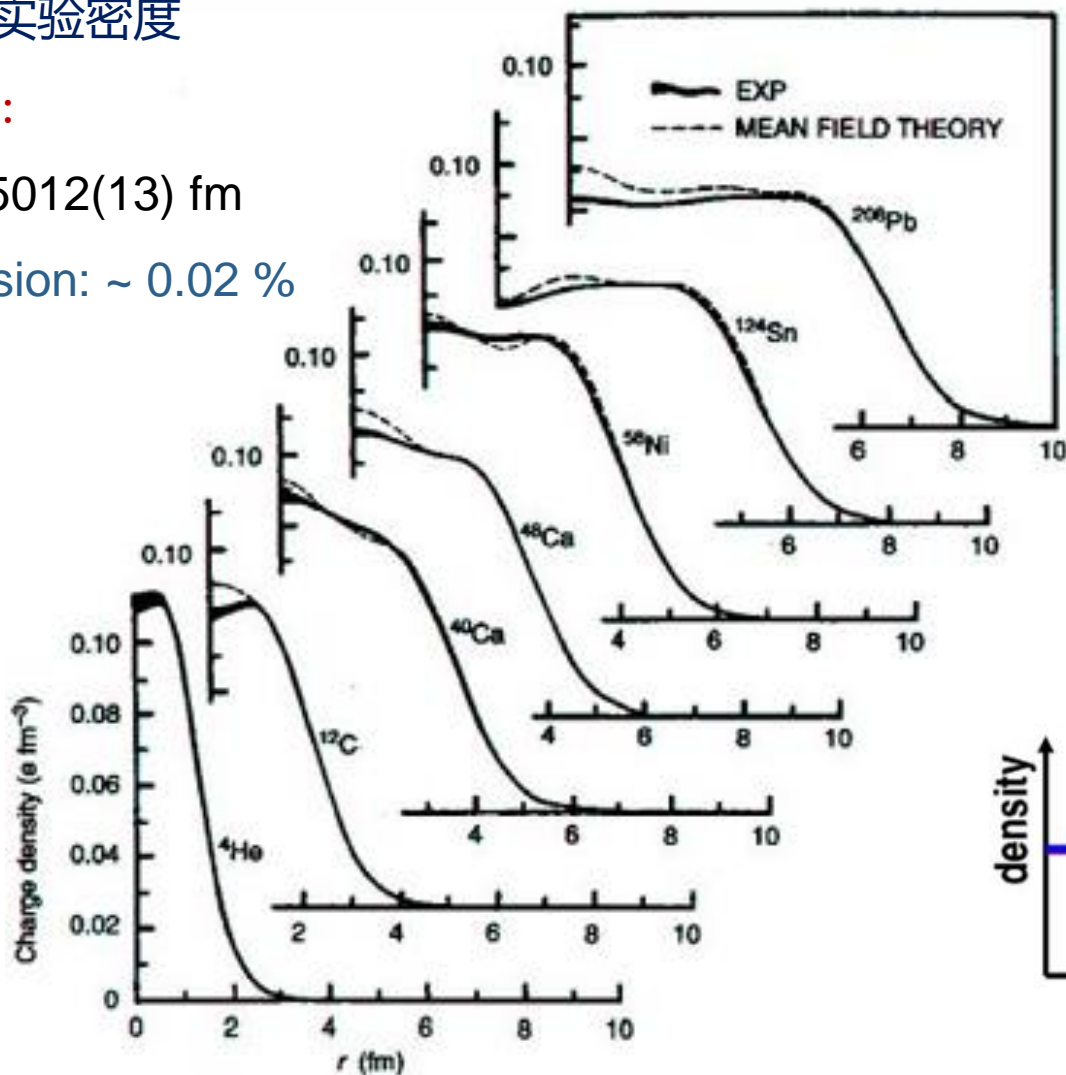
# 研究背景——中子皮

理论-实验密度

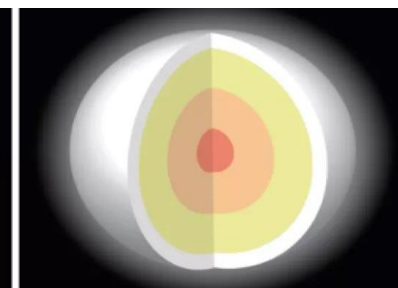
$^{208}\text{Pb}$ :

$$R_{ch} = 5.5012(13) \text{ fm}$$

high precision:  $\sim 0.02\%$



$^{208}\text{Pb}$ 原子核



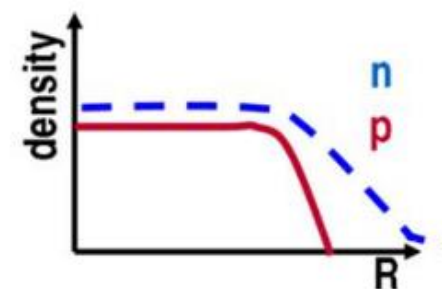
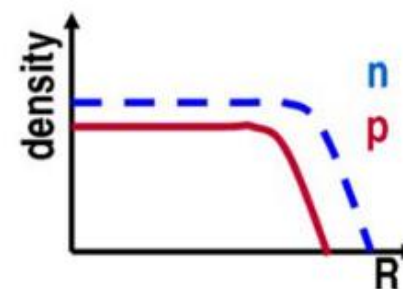
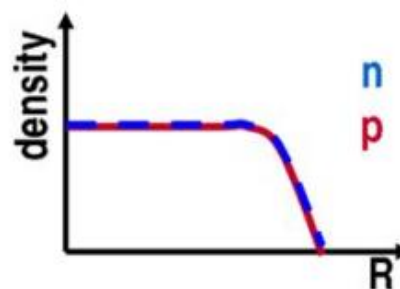
中子星结构

中子皮厚度:

$$\Delta r_{np} = r_n^{rms} - r_p^{rms}$$

$r_n^{rms}$ : 中子均方根半径

$r_p^{rms}$ : 质子均方根半径



# 研究背景——中子皮与对称能

## ➤ 核物质状态方程:

$$E(\rho, \delta) = E(\rho, \delta = 0) + E_{\text{sym}}(\rho)\delta^2 + O(\delta^4)$$

$$E_{\text{sym}}(\rho) = \frac{1}{3} \frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{3}{2} \pi^2 \rho \right)^{2/3} + E_{\text{sym}}^{\text{loc}}(\rho) + E_{\text{sym}}^{\text{mom}}(\rho)$$

$$E_{\text{sym}}^{\text{loc}}(\rho) = \frac{1}{2} C_{\text{sym}} (\rho/\rho_0)^{\gamma_s}$$

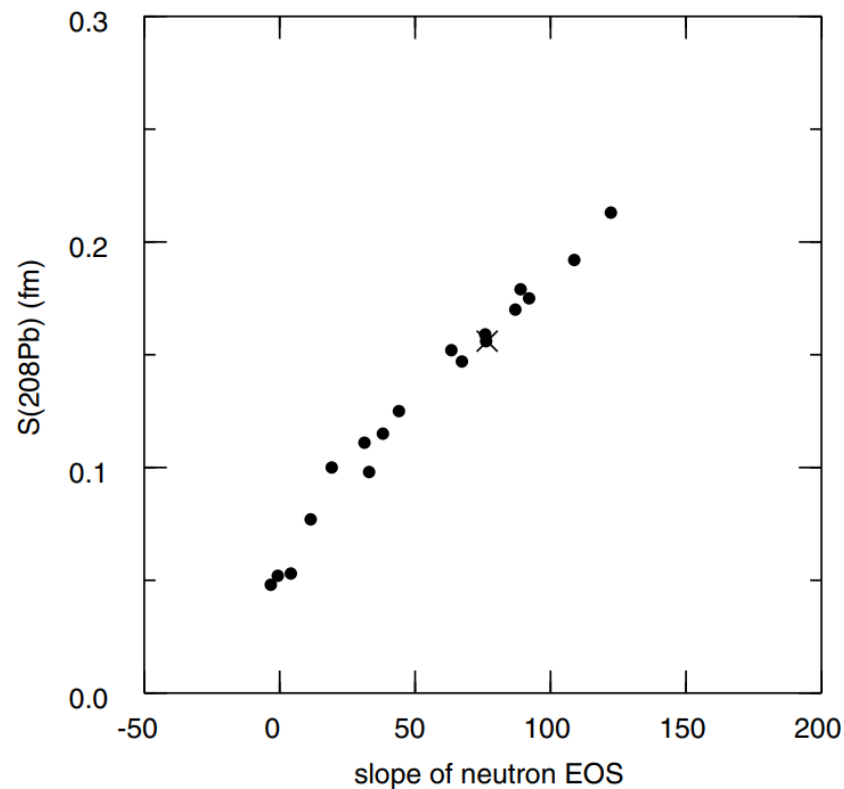
对称能曲率

$$K_{\text{sym}} = 9\rho_0^2 \frac{\partial^2 E_{\text{sym}}(\rho)}{\partial^2 \rho} \Big|_{\rho=\rho_0}.$$

对称能斜率

$$L = 3\rho_0 \frac{\partial E_{\text{sym}}(\rho)}{\partial \rho} \Big|_{\rho=\rho_0},$$

## ➤ 中子皮与状态方程参数之间存在明确关系:



B. A. Brown. Phys. Rev. Lett **85**,5296(2000).

- R. J. Furnstahl. Nucl. Phys. A 706, 85 (2002).
- L. W. Chen, C. M. Ko, and B. A. Li, Phys. Rev. C 72, 064309 (2005).
- M. Centelles et al., Phys. Rev. Lett 102, 122502 (2009).

- 核子的波函数采用**高斯波包**表示:

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

- 核子的坐标和动量根据**哈密顿方程**进行时间演化:

$$\dot{\mathbf{r}}_i = \frac{\partial H}{\partial \mathbf{p}_i}, \quad \dot{\mathbf{p}}_i = -\frac{\partial H}{\partial \mathbf{r}_i}$$

- 重子哈密顿量:

$$H_B = \sum_i \sqrt{\mathbf{p}_i^2 + m_i^2} + U_{int} + U_{mom}$$

↓

$U_{coul} + U_{loc}$

- 局域相互作用势直接由能量密度泛函得到:

$$U_{loc} = \int V_{loc}[\rho(\mathbf{r})] d\mathbf{r},$$

$$V_{loc} = \frac{\alpha}{2} \frac{\rho^2}{\rho_0} + \frac{\beta}{1+\gamma} \frac{\rho^{1+\gamma}}{\rho_0^\gamma} + \boxed{E_{sym}^{loc}}(\rho) \rho \delta^2 \\ + \frac{g_{sur}}{2\rho_0} (\nabla \rho)^2 + \frac{g_{sur}^{iso}}{2\rho_0} [\nabla(\rho_n - \rho_p)]^2$$

$$E_{sym}^{loc}(\rho) = \frac{1}{2} C_{sym} (\rho/\rho_0)^{\gamma_s}$$

$\gamma^s$  取 0.5, 1, 2  $\longrightarrow$  软 线性 硬

# 研究方法

## Lanzhou Quantum Molecular Dynamics (LQMD)

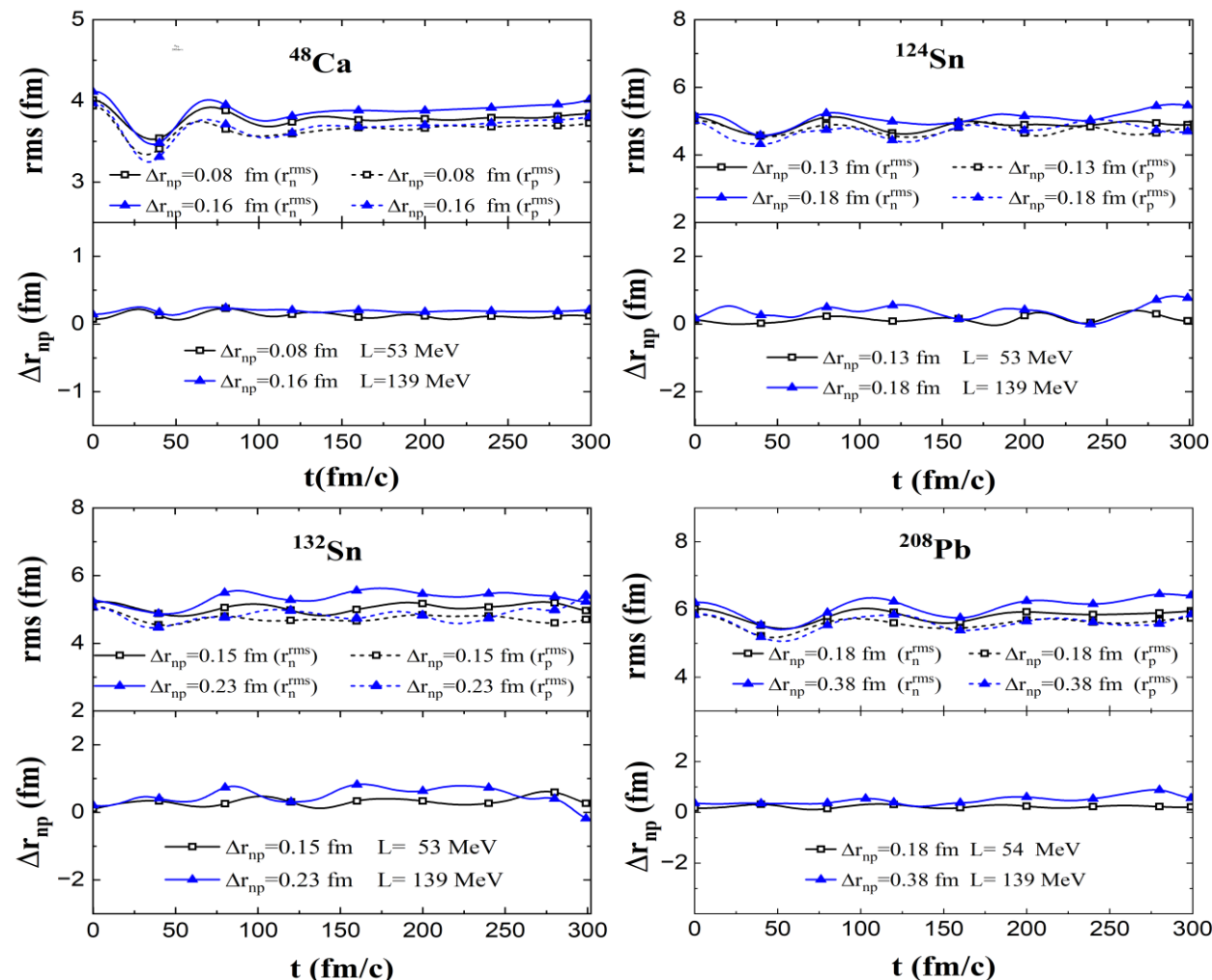
$$\rho_i = \frac{\rho_{0i}}{1 + \exp\left(\frac{r - R_i}{a_i}\right)}, i = n, p$$

$$N = \int \rho_n(r) d^3r, Z = \int \rho_p(r) d^3r$$

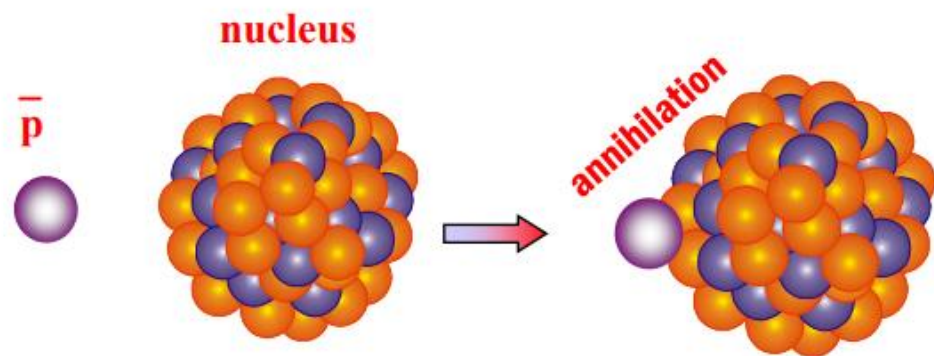
$$\Delta r_{np} = r_n^{rms} - r_p^{rms}$$

$$r_n^{rms} = \frac{1}{N} \left[ \int r^2 \rho_n(r) d^3r \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$r_p^{rms} = \frac{1}{Z} \left[ \int r^2 \rho_p(r) d^3r \right]^{\frac{1}{2}}$$



# 反质子引起的核反应研究中子皮

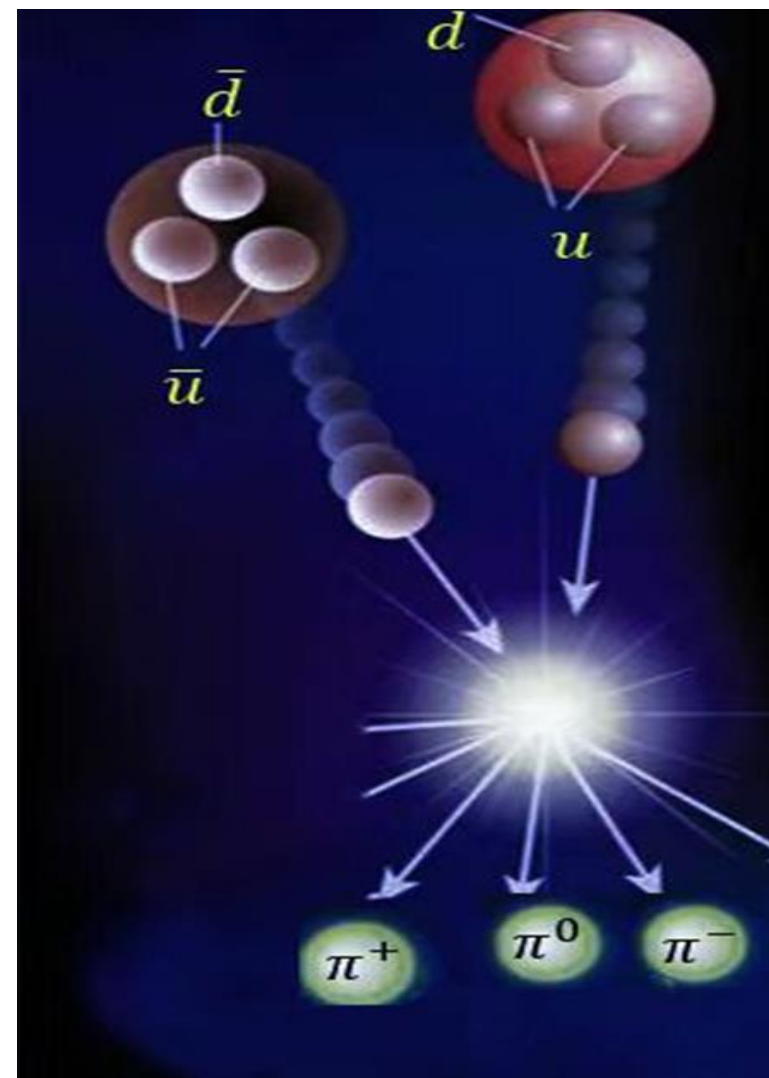


反质子相关反应道:

$$\bar{p}N \rightarrow \bar{N}N, \bar{N}N \rightarrow \bar{N}N,$$

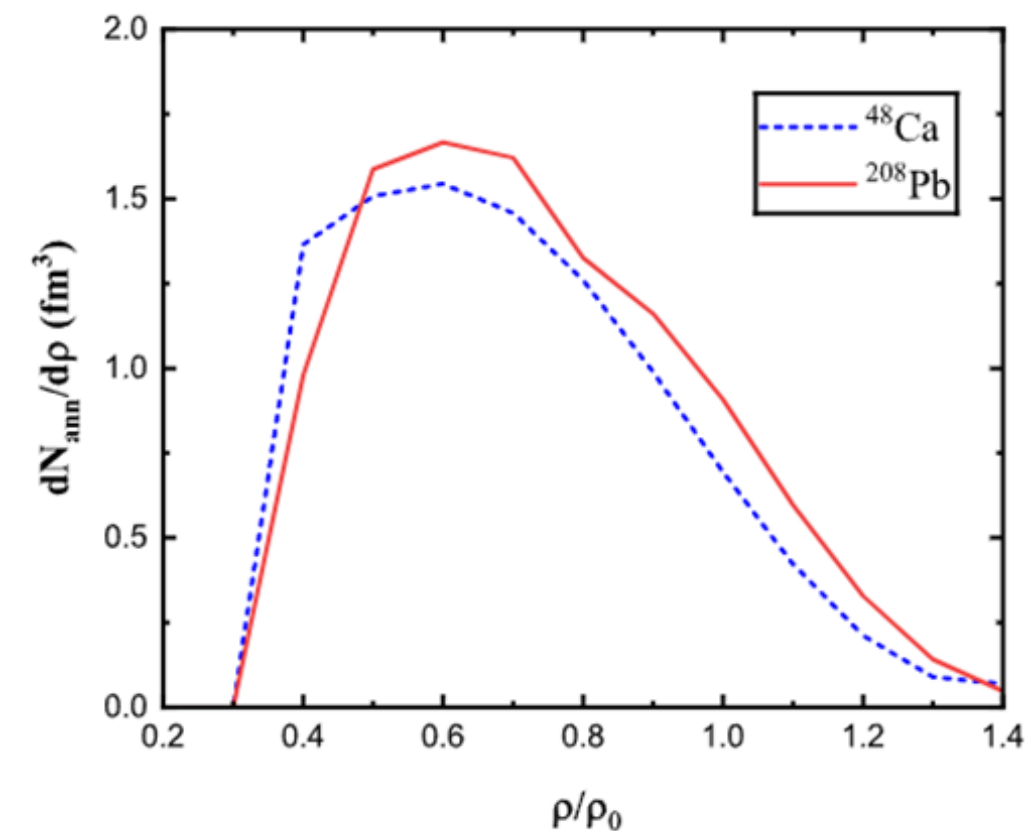
$$\bar{N}N \rightarrow \bar{B}B, \bar{N}N \rightarrow \bar{Y}Y,$$

$$\bar{N}N \rightarrow \text{annihilation}(\pi, \eta, \rho, \omega, K, \bar{K}, K^*, \phi)$$

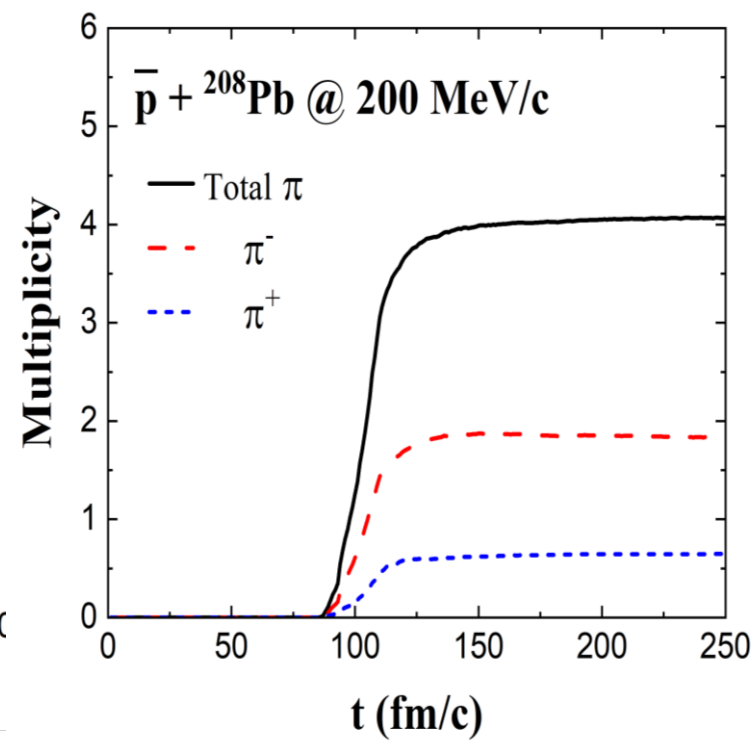
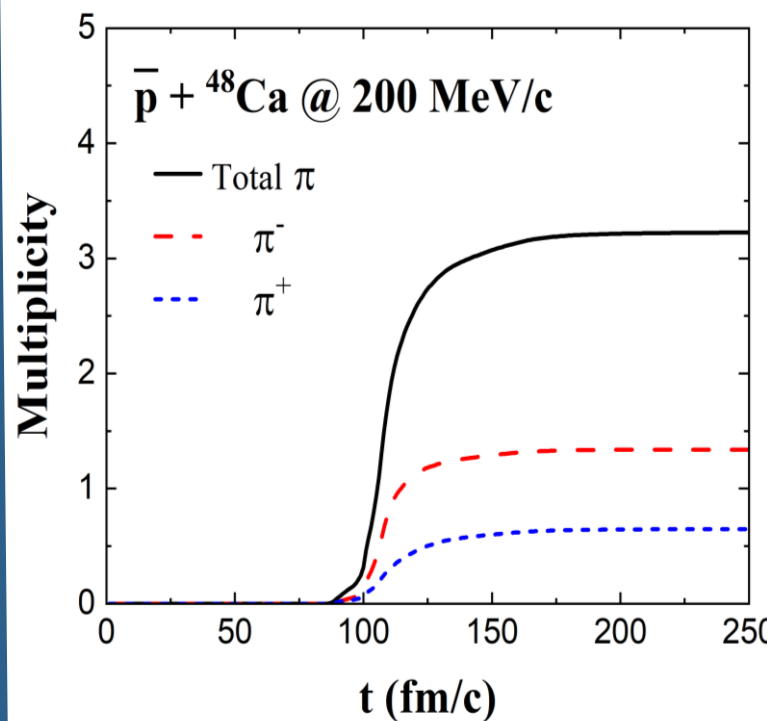


# 研究结果 (一)

- 反质子湮灭主要发生在 $0.4\rho_0 - 0.8\rho_0$ 的亚饱和密度区域



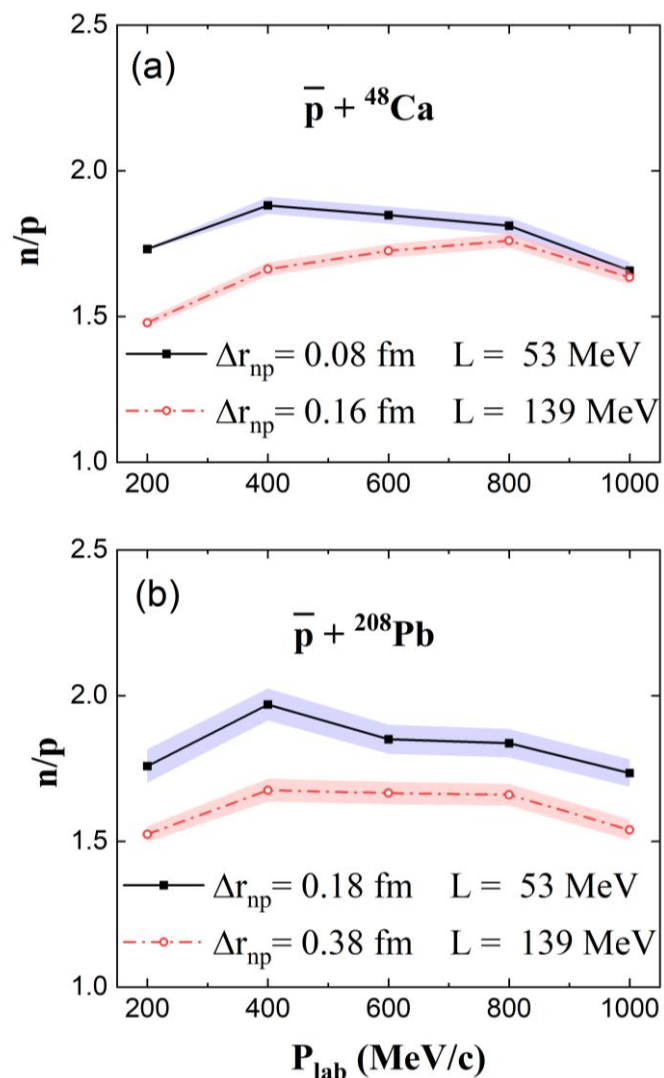
- $\pi$ 介子主要是反质子的湮灭产生, 湮灭完成之后 $\pi$ 介子多重数保持稳定不变



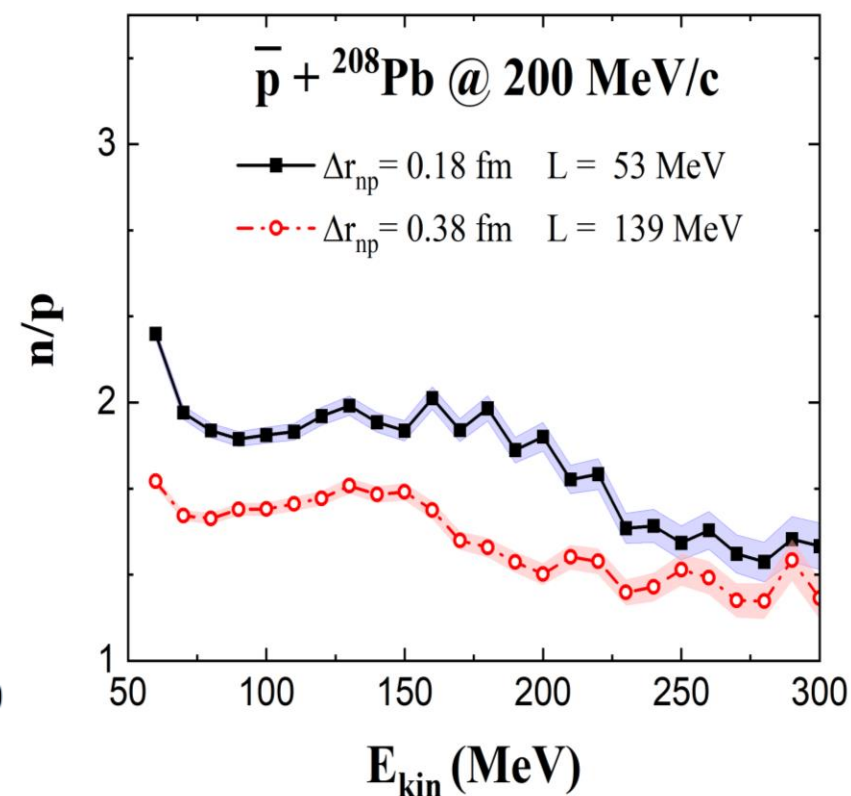
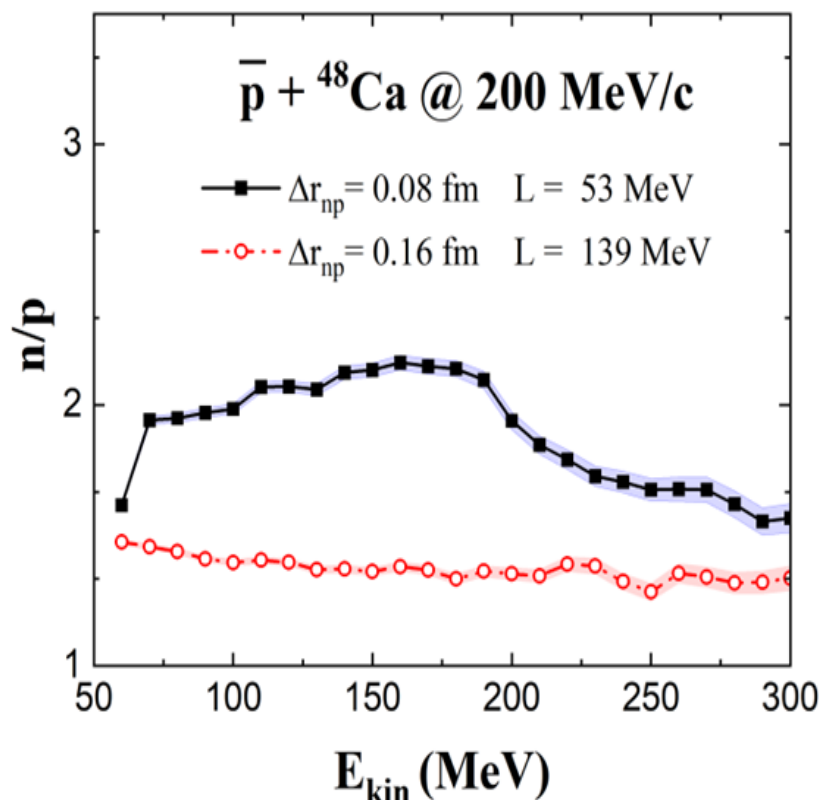


# 研究结果 (一)

在较低入射动量下效应更明显

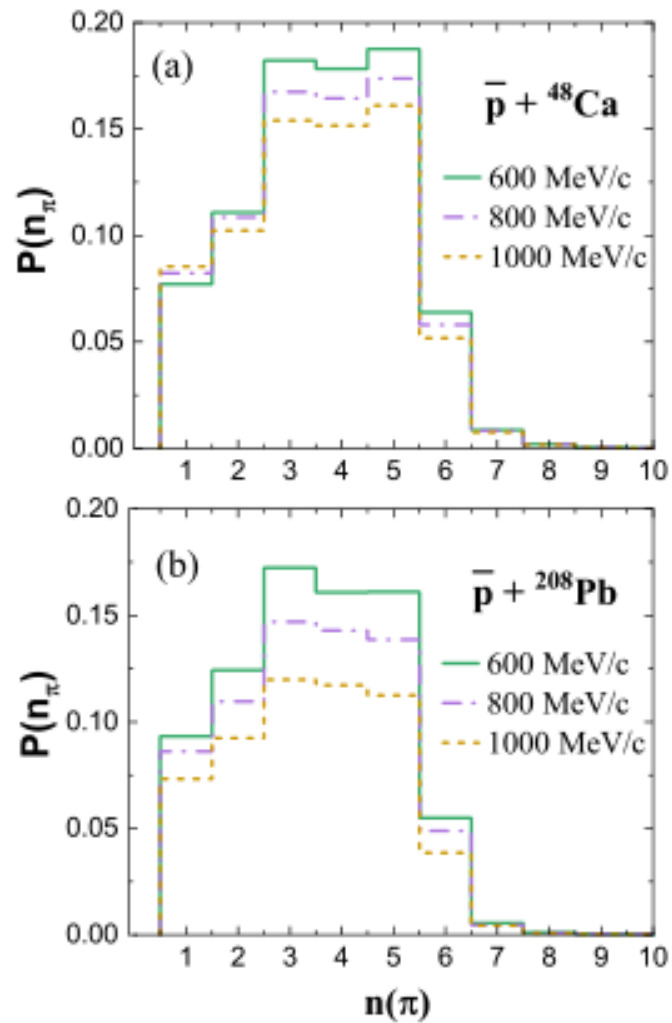


在低密情况下，较软的对称能具有较强的对称势， $n/p$ 增大

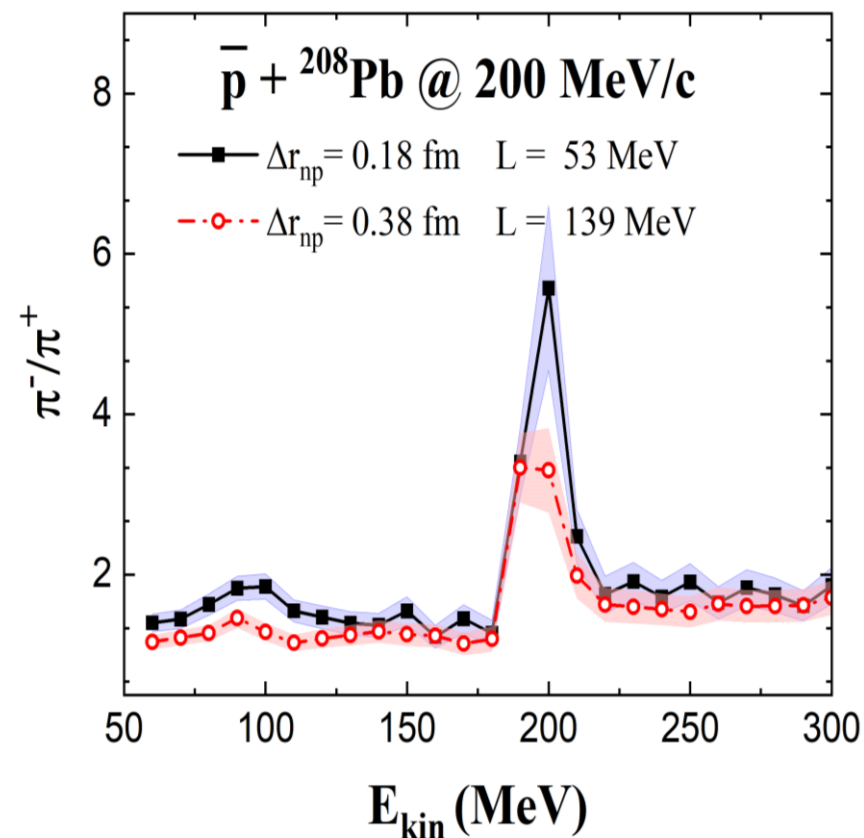
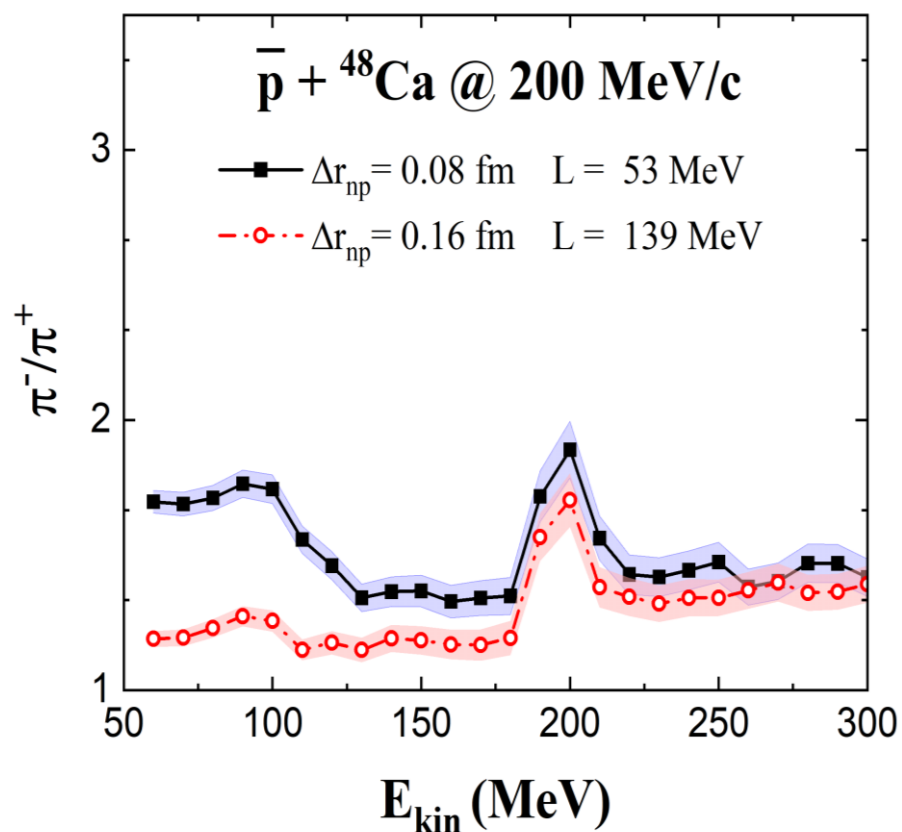


# 研究结果 (一)

## ➤ 反质子湮灭产生2-8个 $\pi$ 介子



## ➤ 反应中 $\pi$ 介子主要由湮灭产生，产生的介子与核子进行吸收和衰变

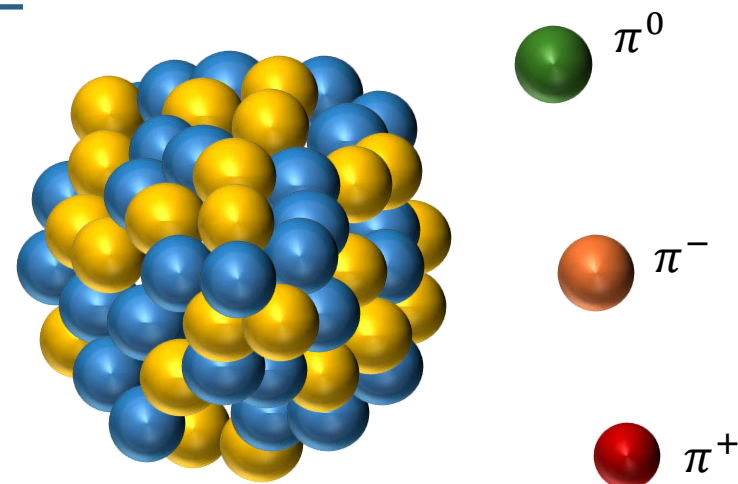


# $\pi$ 介子引起的核反应研究中子皮

$\pi$ 和 $\Delta(1232)$   $N^*(1440)$   $N^*(1535)$  的产生:

$NN \leftrightarrow N\Delta$ ,  $NN \leftrightarrow NN^*$ ,  $NN \leftrightarrow \Delta\Delta$ ,  $\Delta \leftrightarrow N\pi$ ,

$N^* \leftrightarrow N\pi$ ,  $NN \leftrightarrow NN\pi(s - state)$ ,  $N^*(1535) \leftrightarrow N\eta$



- 产生pion的强子密度 —— 核-核碰撞: 部分pion产生在高饱和密度处 (**提取核对称能的高密信息**)
- Pion与核的碰撞产物主要为pion以及它形成的共振态 (**理解pion和 $\Delta$ 共振的性质**)
- 能量沉积——**研究高激发核的核碎裂**

**实验:** pion工厂

Los Alamos Meson Physics Facility (LAMPF)

Paul Scherrer Institute (PSI)

Tri-University Meson Facility (TRIUMF)

superconducting kaon spectrometer (SKS)

**理论:**

BUU

Giessen BUU

**Pion-核** —— 快核子发射, 粒子蒸发, 中等质量碎片, 裂变

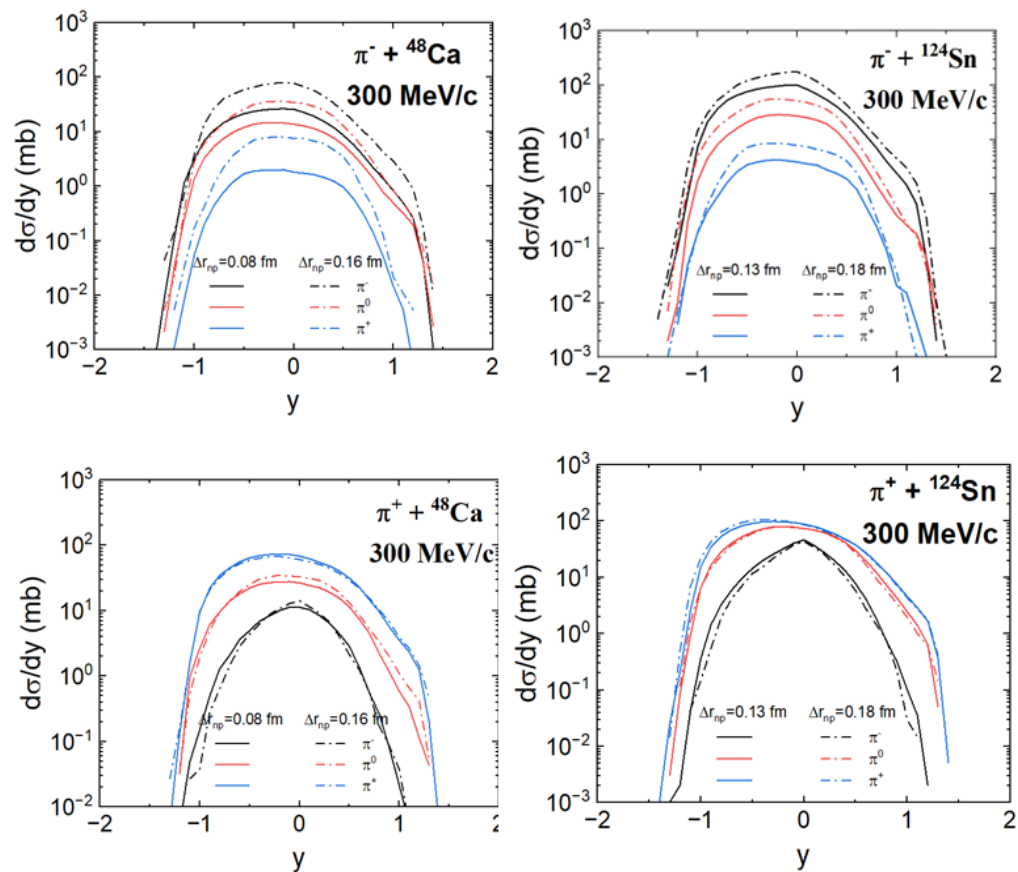
微观输运方法——**LQMD模型**

**双电荷交换反应**

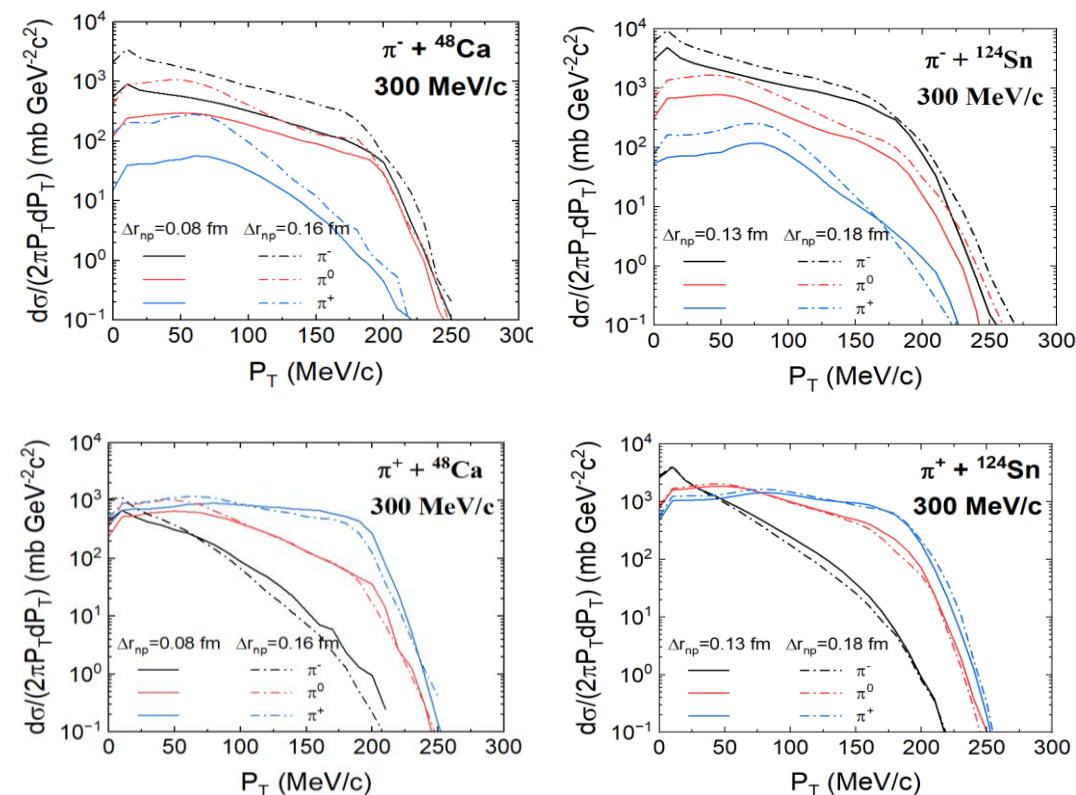
**靶核碎片机制**

# 研究结果 (二)

## 快度分布

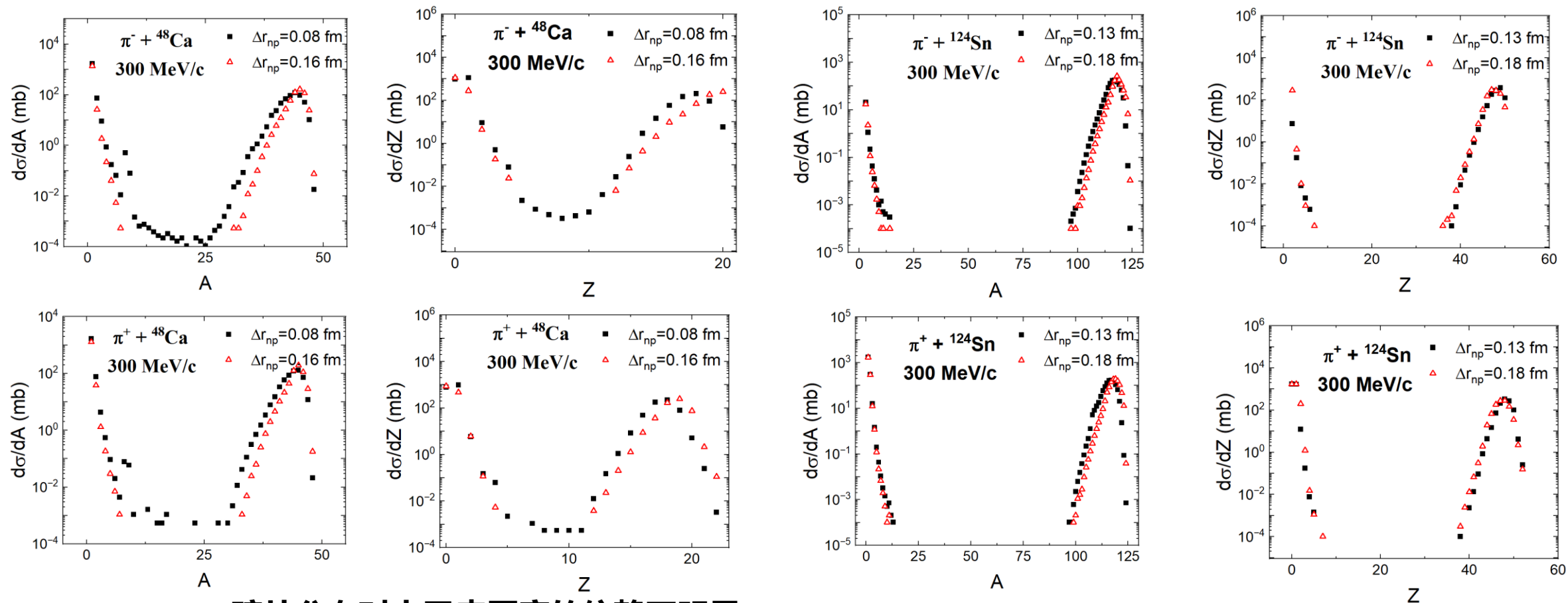


## 横动量分布



- $\pi^-$  入射的反应对**中子皮厚度**的依赖更明显
- 中子皮厚度对**电荷交换反应**有不可忽略的影响

## 研究结果 (二)

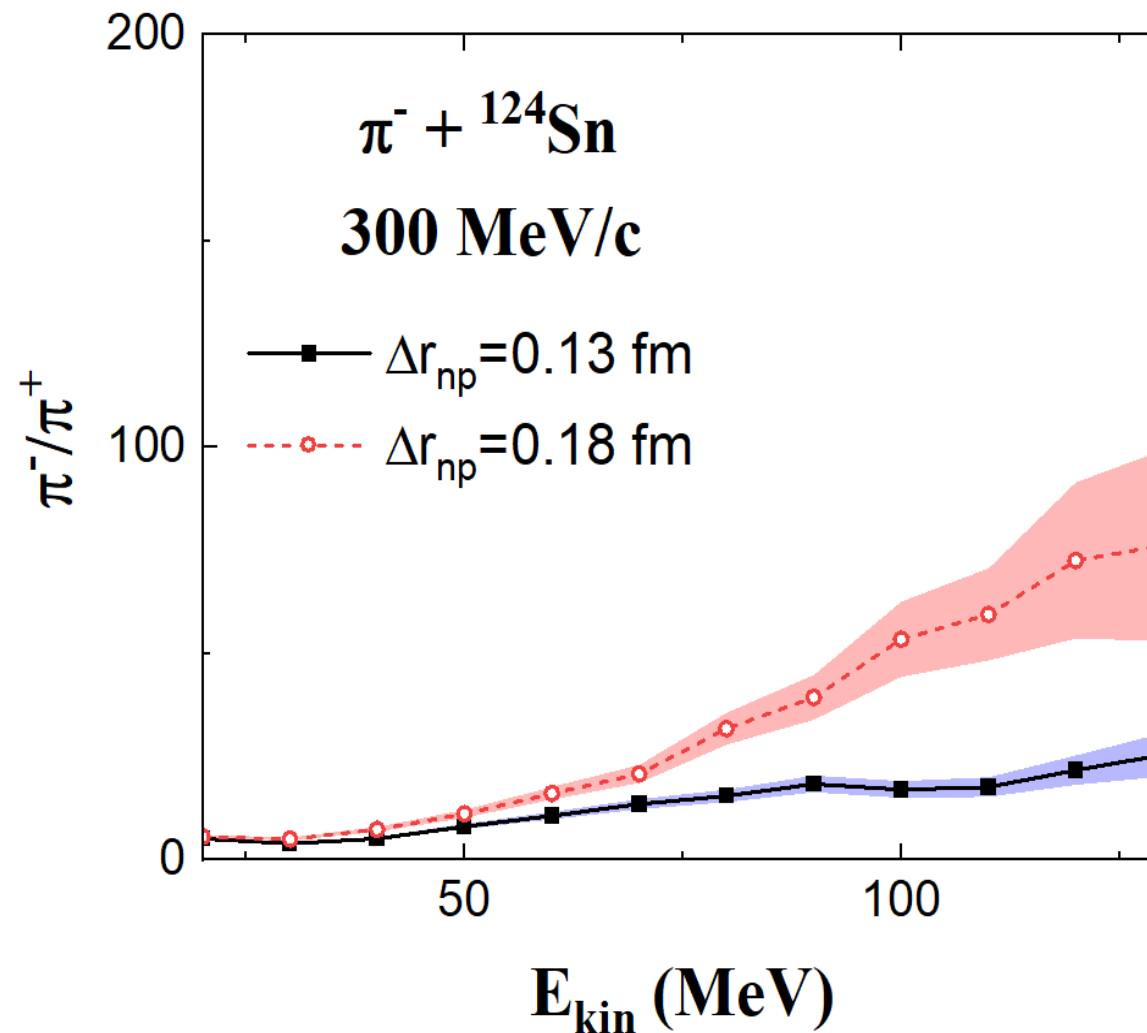
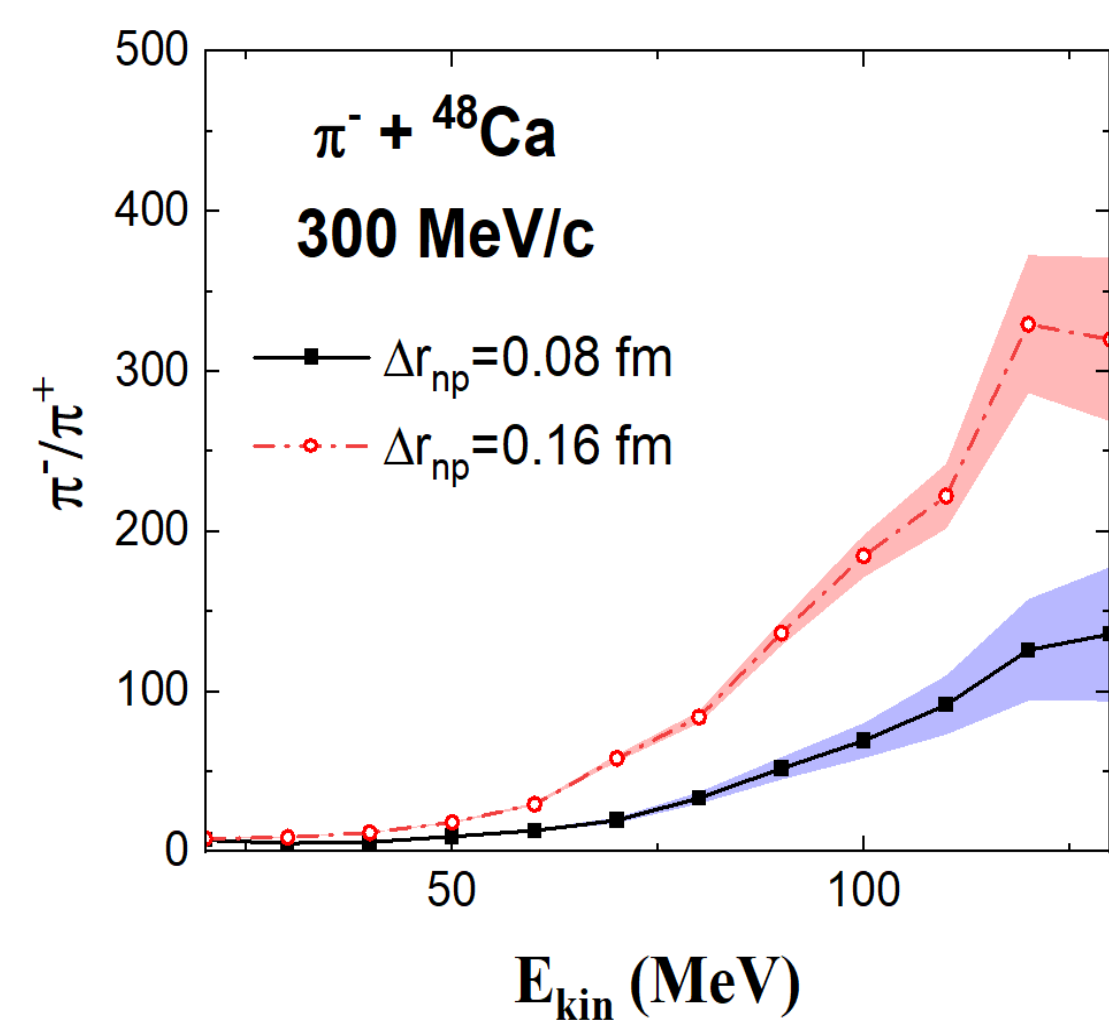


➤ 碎片分布对中子皮厚度的依赖不明显

➤ 中等质量碎片来自于靶核的裂变，与pion介子的入射能量以及靶核的大小有关

## 研究结果 (二)

在 $\pi^-$ 入射的反应中, 中子皮大,  $\pi^-/\pi^+$ 也大





## 研究结果 (二)

### 双电荷交换反应



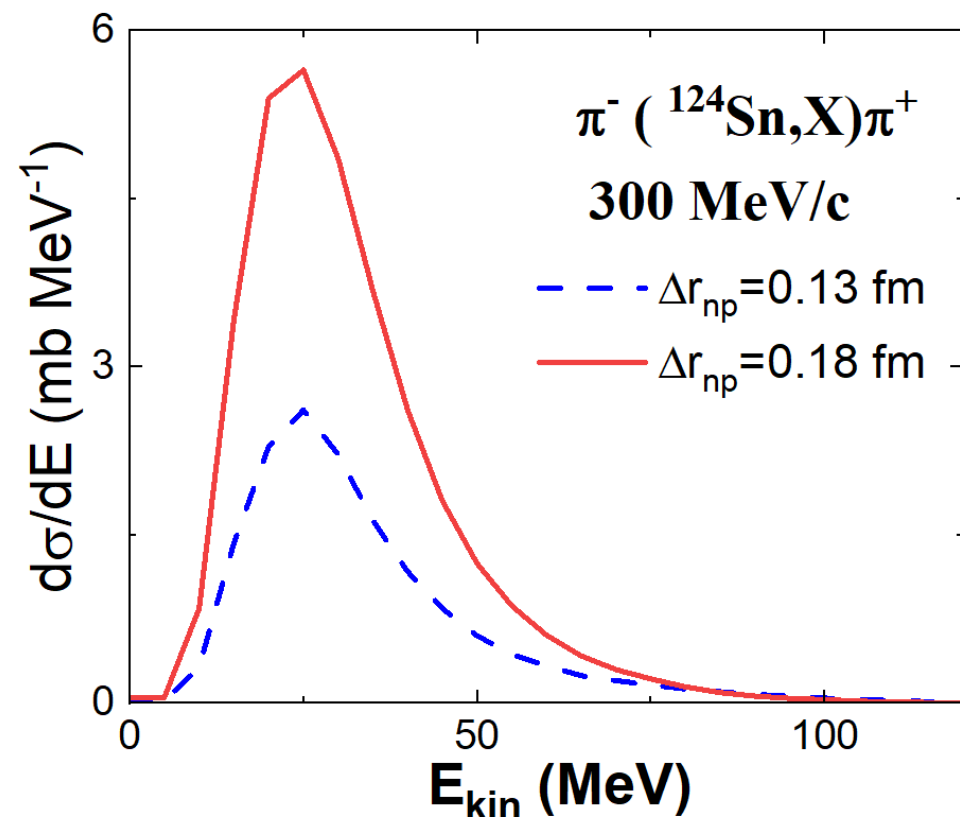
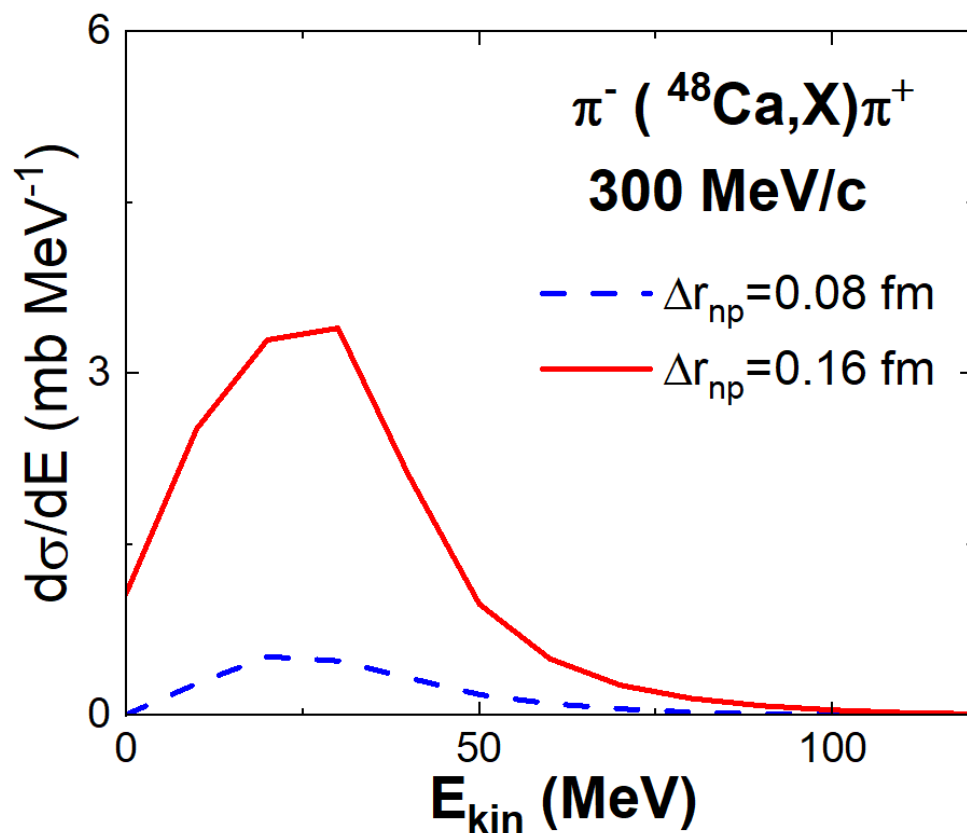
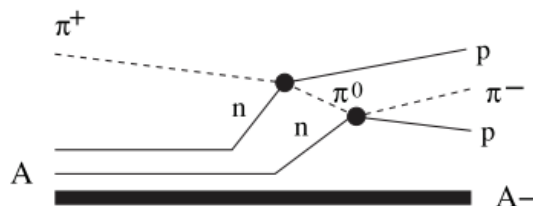
$\pi^+(\pi^-)$ 与原子核中多个核子发生碰撞, 将核中的两个中子(或质子)转变为两个质子(或中子)

$$\pi^- + p \rightarrow \Delta^0$$

$$\Delta^0 \rightarrow \pi^0 + n$$

$$\pi^0 + p \rightarrow \Delta^+$$

$$\Delta^+ \rightarrow \pi^+ + n$$



➤ 电荷交换反应对中子皮非常敏感

# 总 结

- 反质子与核子的湮灭在亚饱和密度区域产生大量的pion介子, pion介子与核子吸收与衰变可以看到 $\pi^-/\pi^+$ 对中子皮的十分敏感
- 在  $\bar{p} + {}^{48}\text{Ca}$  和  $\bar{p} + {}^{208}\text{Pb}$  的反应系统中, 高动能(>50MeV)区的n/p和 $\pi^-/\pi^+$ 可以作为提取中子皮厚度的敏感探针
- 在pion介子引起的核反应中 $\pi^-/\pi^+$ 会受到靶核的同位旋的影响
- 在共振能区附近( $E = 0.19 \text{ GeV}$ ,  $p = 0.298 \text{ GeV}/c$ )中子皮厚度影响了动能谱, 但对碎裂过程的贡献可以忽略不计



# 谢 谢

汇报人：张班

导师：冯兆庆教授

日期：2024.11.17