

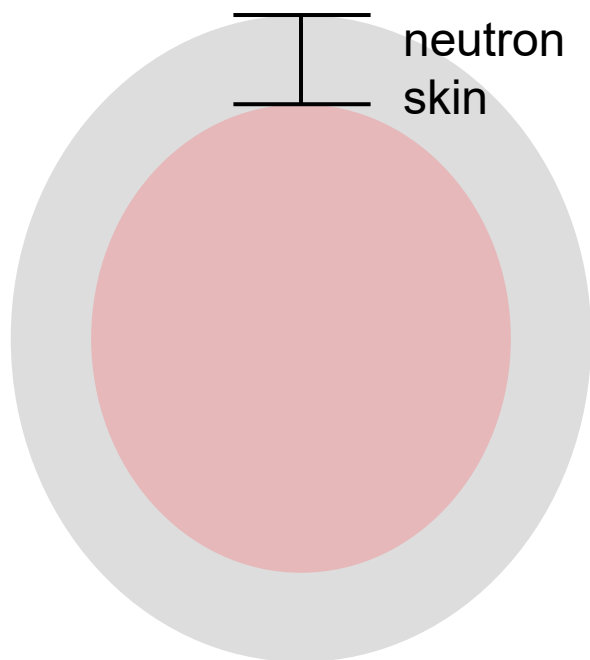


## 通过重离子碰撞中 逐事件 $\pi$ 介子不对称性探测中子皮

---

报告人：田栩华  
时间：2025年11月24日

Tian,Xu-Hua and Pang,Long-Gang arXiv: 2510.20166



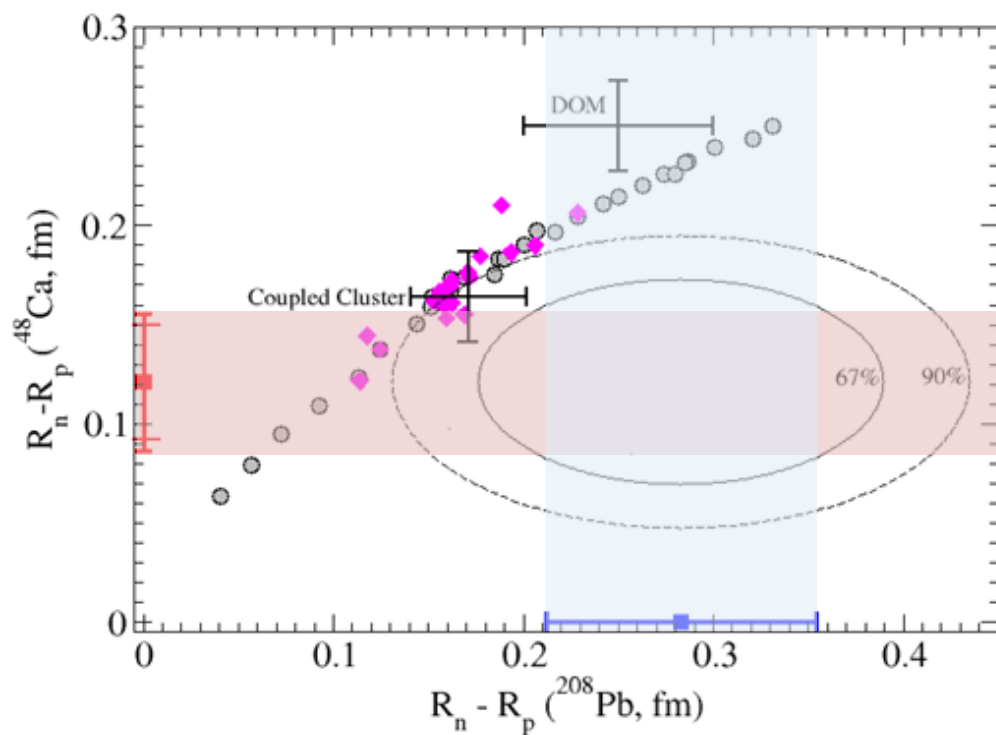
在原子核中，中子和质子混合在一起，中子分布的均方根半径大于质子分布的均方根半径，形成了图中灰色区域所示的中子皮结构。

中子皮厚度:  $\Delta r_{np} = \langle r_n^2 \rangle^{1/2} - \langle r_p^2 \rangle^{1/2}$

Figure 1 is a scatter plot showing the neutron skin thickness  $\Delta r_{np}$  (in fm) on the y-axis versus the nuclear radius  $R$  (in fm) on the x-axis. The x-axis ranges from 0 to 150 fm, and the y-axis ranges from 0.1 to 0.35 fm. A blue line represents the linear fit with a correlation coefficient  $r = 0.979$ . Open circles represent the mean field results. A green vertical line is drawn at  $R \approx 10$  fm, indicating the radius of the nucleus used in the present study. The plot shows a strong positive correlation between  $\Delta r_{np}$  and  $R$ , with a shaded gray region representing the uncertainty of the linear fit.

# $^{208}\text{Pb}$ 中子皮厚度 $\Delta r_{np}$ 与对称能斜率 $L$ 的关系

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



$^{208}\text{Pb}$  与  $^{48}\text{Ca}$  的中子皮厚度之间的关系

Phys.Rev.Lett. 129 (2022) 4, 042501

$$A_{PV} = \frac{\sigma_R - \sigma_L}{\sigma_R + \sigma_L} \approx \frac{G_F Q^2 |Q_W|}{4\sqrt{2}\pi\alpha Z} \frac{F_W(Q^2)}{F_{ch}(Q^2)}$$

$\sigma_R$ : 入射右手极化电子被靶核散射的截面。

$\sigma_L$ : 入射左手极化电子被靶核散射的截面。

$G_F$ : 费米常数, 表征弱相互作用的强度。

$Q^2$ : 四动量转移的平方。表征电磁相互作用的强度。

$F_{ch}(Q)$ : 核子的电荷形状因子。是核内质子空间分布的傅里叶变换。

$F_W(Q)$ : 核子的弱形状因子。

$$F_W(Q) = \int \rho_W(\vec{r}) e^{i\vec{q}\cdot\vec{r}} d^3r$$

$\rho_W(\vec{r})$  是弱电荷密度

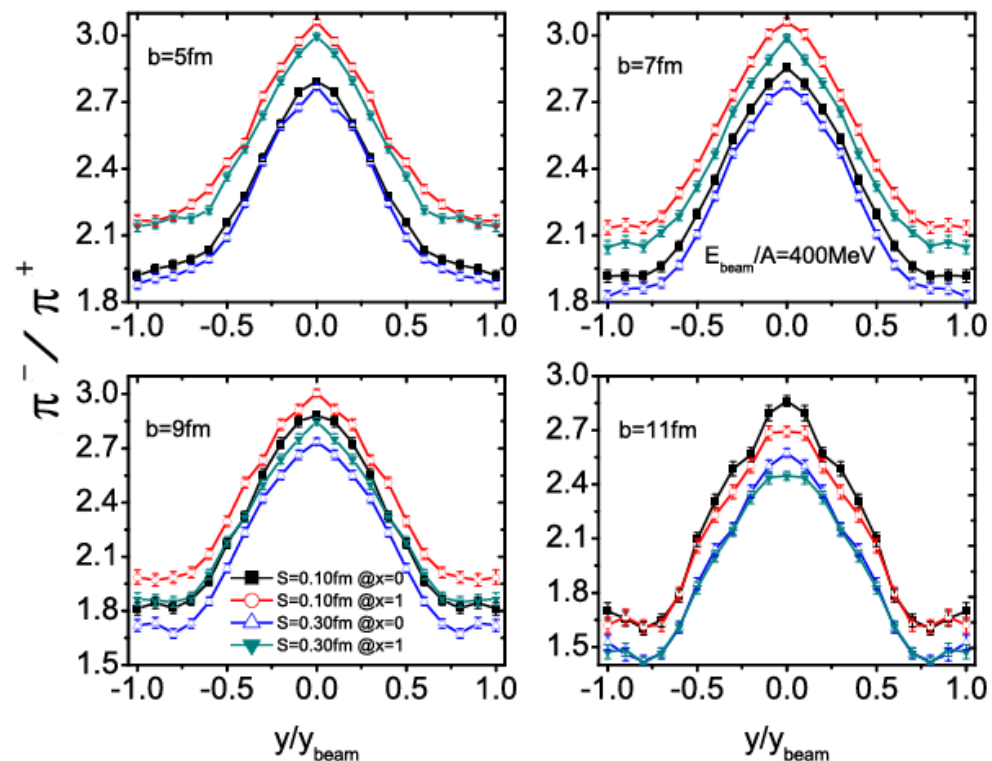
$$\rho_W(\vec{r}) = q_p \rho_p(\vec{r}) + q_n \rho_n(\vec{r})$$

$\rho_p(\vec{r})$  为质子密度,  $\rho_n(\vec{r})$  为中子密度,  $q_p$  和  $q_n$  分别为质子中子与  $Z^0$  玻色子的耦合常数

$$q_p = 1 - 4 \sin^2 \theta_w \approx 0.07 \quad q_n = -1$$

$$\rho_W(\vec{r}) \approx -\rho_n(\vec{r})$$

$$F_W(Q) \approx -\int \rho_n(\vec{r}) e^{i\vec{q}\cdot\vec{r}} d^3r = -F_n(Q)$$



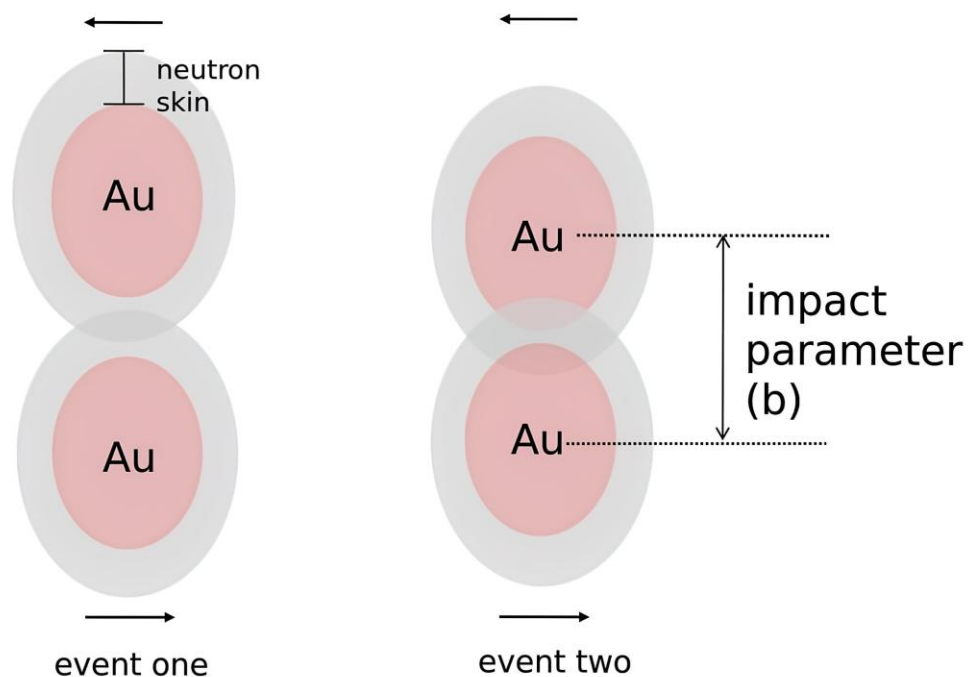
*Phys.Rev.C* 90 (2014) 1, 014610

X = 0时: L = 62.1 Mev

X = 1时: L = 16.4 Mev

中心碰撞时  $\pi^-/\pi^+$  对L敏感，对中子皮厚度的变化不敏感。

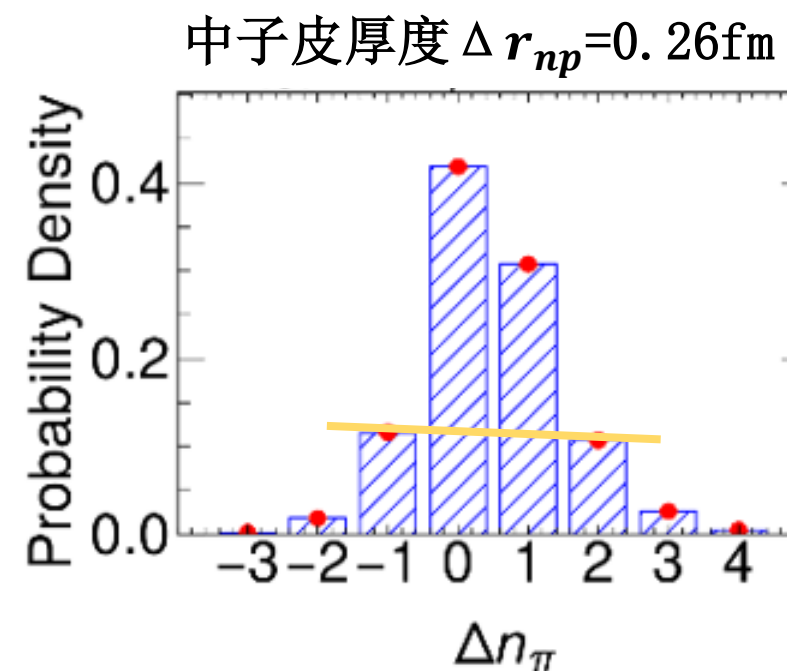
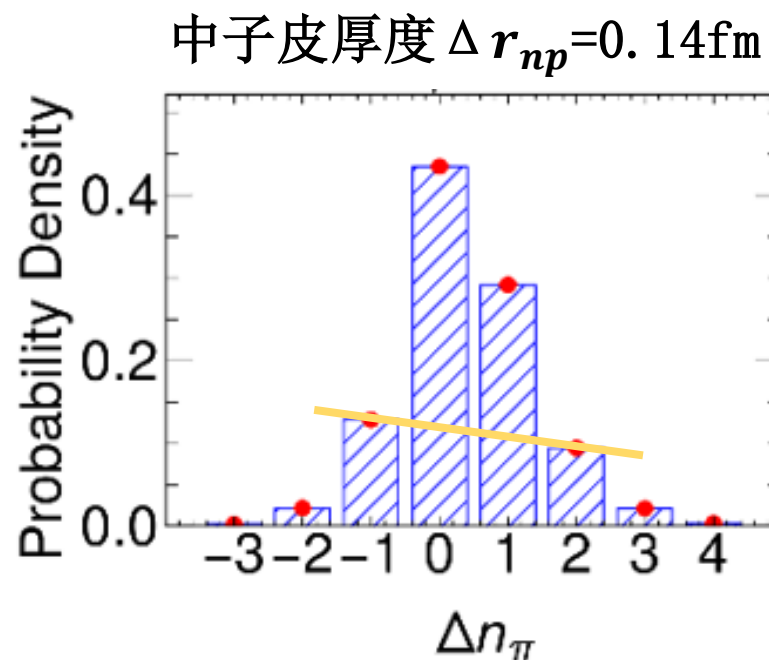
偏心碰撞时  $\pi^-/\pi^+$  对中子皮厚度的变化敏感，其影响等同甚至超过对称能的影响。



事件一：碰撞参数较大时仅出现中子-中子碰撞

事件二：碰撞参数减小，开始出现质子中子碰撞。

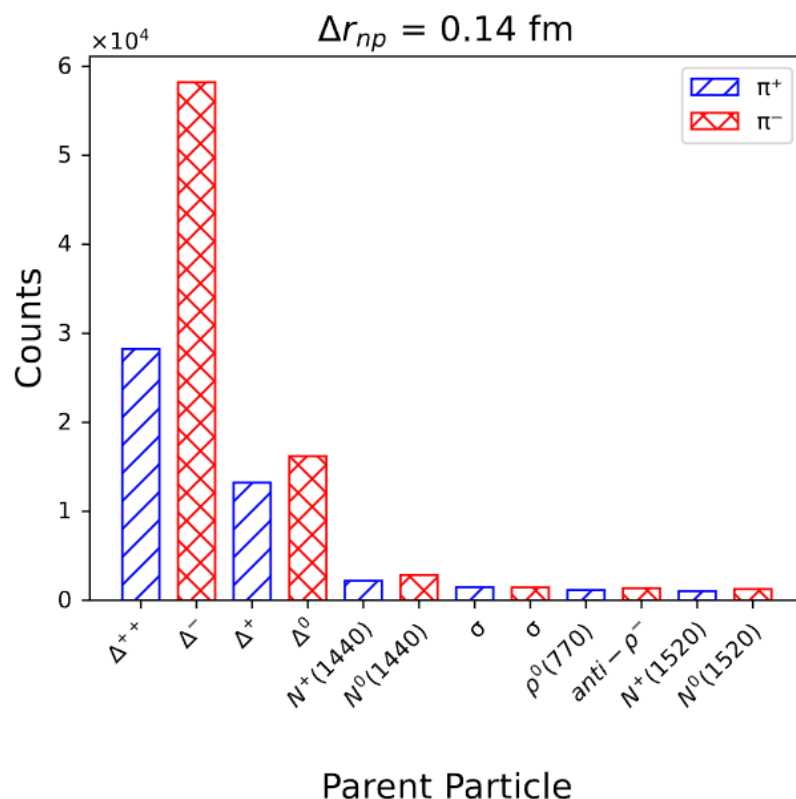
利用 SMASH (Simulating Many Accelerated Strongly-interacting Hadrons) 模型模拟质心能量  $\sqrt{s_{NN}} = 3$  GeV 的不同中子皮厚度的金金偏心碰撞，并对结果进行逐事件分析，以约束中子皮厚度。



不同中子皮厚度下金-金碰撞 $\Delta n_\pi = n_{\pi^-} - n_{\pi^+}$ 的密度图。

- 1、偏心碰撞中 $\Delta n_\pi$ 的均值大于0
- 2、特定的  $\Delta n_\pi$  值与中子皮厚度  $\Delta r_{np}$  之间存在肉眼可见的相关性

在 Au+Au 偏心碰撞的 SMASH 仿真中，共振衰变产生  $\pi^-$  和  $\pi^+$  介子的六个最主要的衰变通道。



$$|\Delta^{++}\rangle \leftrightarrow |p\rangle|\pi^+\rangle$$

$$|\Delta^+\rangle \leftrightarrow \sqrt{\frac{2}{3}}|p\rangle|\pi^0\rangle + \sqrt{\frac{1}{3}}|n\rangle|\pi^+\rangle$$

$$|\Delta^0\rangle \leftrightarrow \sqrt{\frac{2}{3}}|n\rangle|\pi^0\rangle + \sqrt{\frac{1}{3}}|p\rangle|\pi^-\rangle$$

$$\Delta^- \leftrightarrow |n\rangle|\pi^-\rangle$$

$\pi^-$  和  $\pi^+$  主要来自  $\Delta$  的衰变  
在 SMASH 仿真中  $\pi^-$  远多于  $\pi^+$



Reaction	Clebsch	Symmetry	Total
$pp \rightarrow p\Delta^+$	1/4	1/2	1/8
$pp \rightarrow n\Delta^{++}$	3/4	1/2	3/8
$pn \rightarrow n\Delta^+$	1/4	1	2/8
$pn \rightarrow p\Delta^0$	1/4	1	2/8
$nn \rightarrow p\Delta^-$	3/4	1/2	3/8
$nn \rightarrow n\Delta^0$	1/4	1/2	1/8
$pp \rightarrow \Delta^0\Delta^{++}$	6/20	1/2	18/120
$pp \rightarrow \Delta^+\Delta^+$	8/20	1/4	12/120
$pn \rightarrow \Delta^-\Delta^{++}$	67/120	1	67/120
$pn \rightarrow \Delta^+\Delta^0$	43/120	1	43/120
$nn \rightarrow \Delta^+\Delta^-$	6/20	1/2	18/120
$nn \rightarrow \Delta^0\Delta^0$	8/20	1/4	12/120

$\Delta^-$  主要来自于 中子-中子 (nn) 碰撞

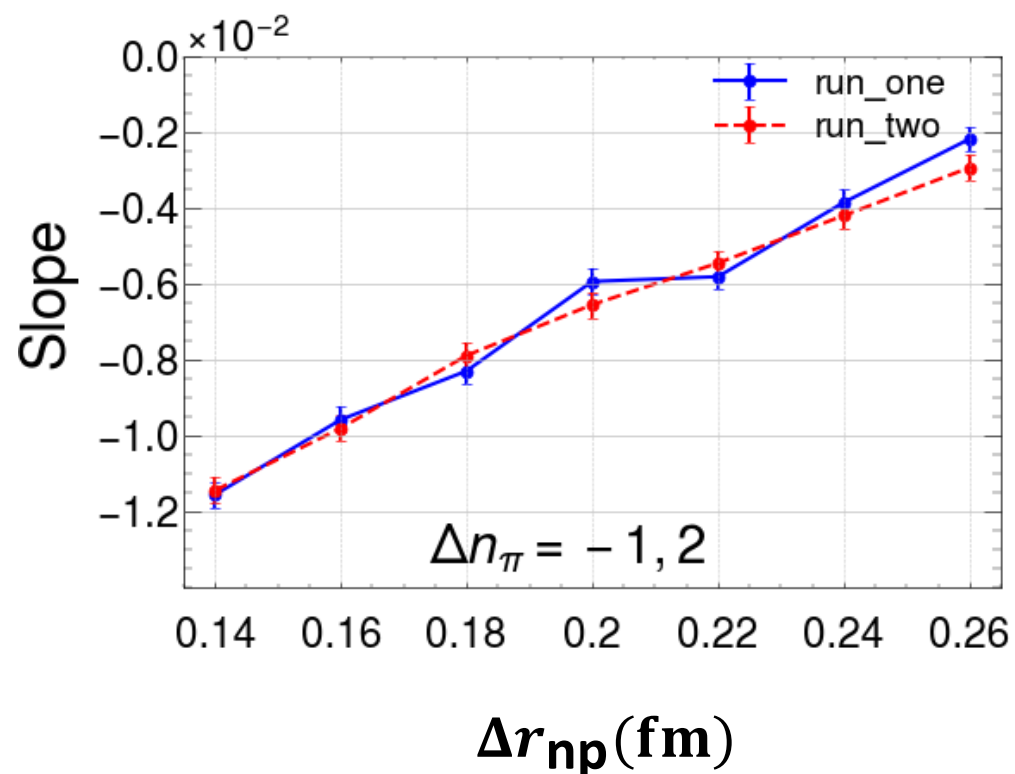
$\Delta^{++}$  主要来自于质子-质子 (pp) 碰撞

重原子核中的中子数多于质子数

最终导致  $\pi^-$  多于  $\pi^+$

Phys. Rev. C 94, 054905 (2016)

# $\Delta n_{\pi}=(-1,2)$ 的slope与中子皮厚度的关系



$\Delta n_{\pi} = (-1, 2)$  所构成斜率与中子皮厚度之间的关系。两条曲线代表两组初始条件完全相同的 SMASH 碰撞数据（每组的约21w事件数）。

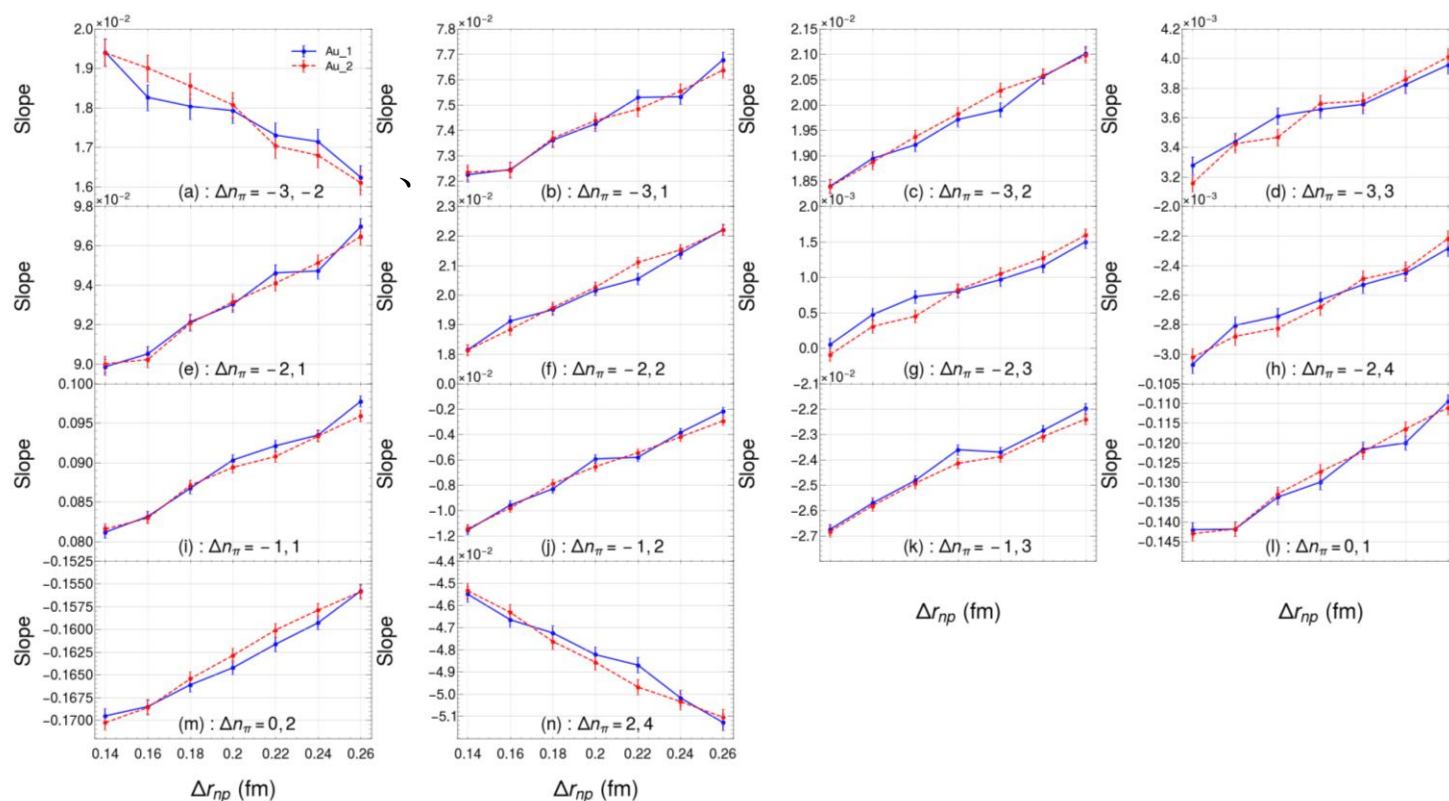
$$1、K = \frac{1}{|a|} [P(\Delta n_{\pi 2}) - P(\Delta n_{\pi 1})]$$

$$a = \Delta n_{\pi 1} - \Delta n_{\pi 2}$$

$\Delta n_{\pi 1}$ 和  $\Delta n_{\pi 2}$ 表示两个不同的  $\Delta n_{\pi}$  值。

2、slope与 $\Delta r_{np}$ 呈线性关系。

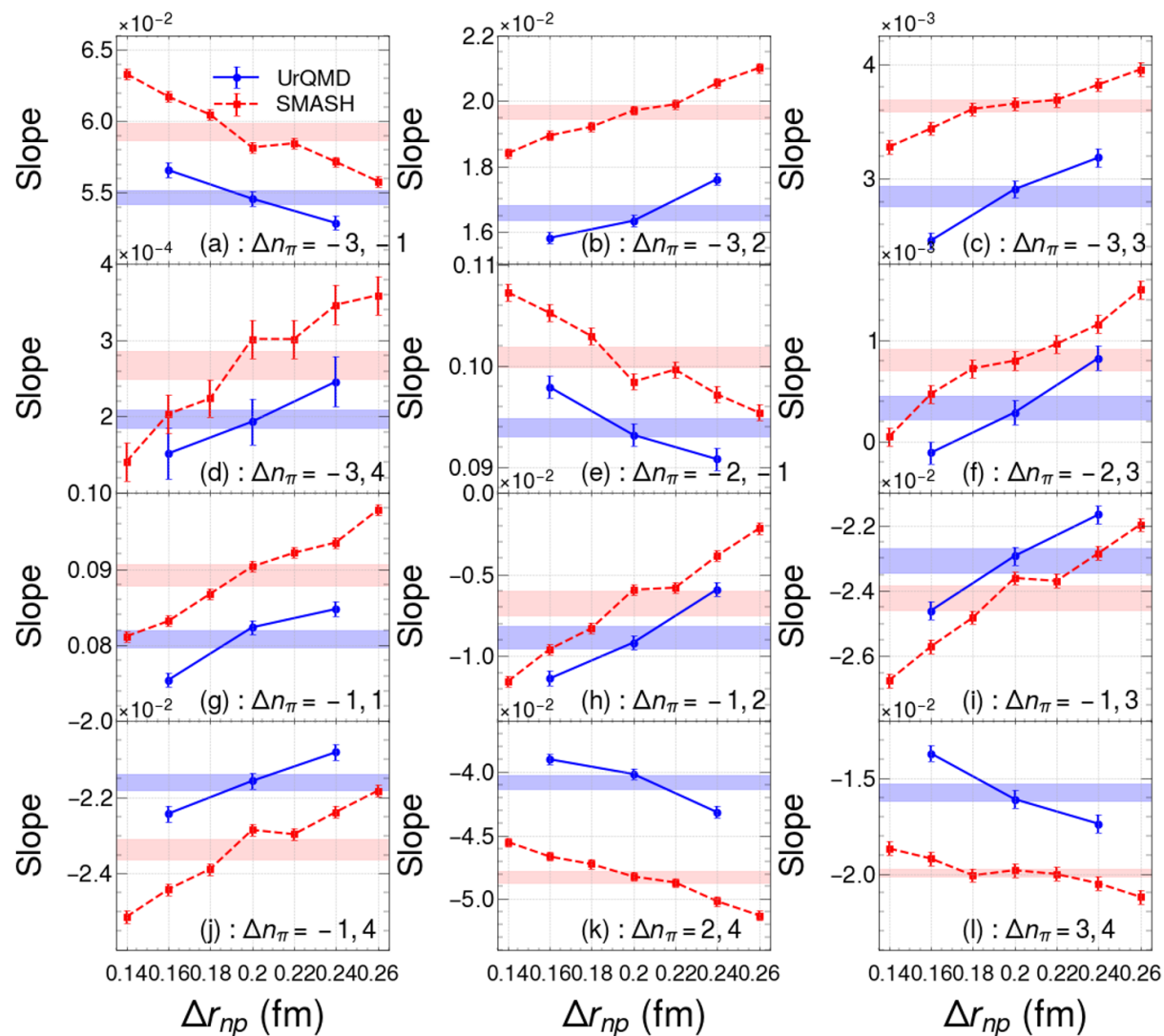
# $\Delta n_\pi$ 的 slope 与中子皮厚度的关系



- 1、对中子皮厚度变化最敏感的为 (i)  $\Delta n_\pi = (-1, 1)$  、 (j)  $\Delta n_\pi = (-1, 2)$  、 (l)  $\Delta n_\pi = (0, 1)$  及 (m)  $\Delta n_\pi = (0, 2)$  。
- 2、 $\Delta n_\pi$  对的两个值正负相同时，斜率随中子皮厚度增加而减小； $\Delta n_\pi$  对的两个值正负相反时，斜率随中子皮厚度增加而增大；表明，随着中子皮厚度增大， $\Delta n_\pi$  分布的整体平均值向更大的正值方向移动。

直方图中两个不同  $\Delta n_\pi$  值所构成斜率与中子皮厚度之间的关系。

# SMASH和UrQMD的模型依赖对比



蓝色带表示 UrQMD 模型数据中对应于 0.19 - 0.21 fm 中子皮厚度的斜率范围，红色带显示 SMASH 模型数据对应的范围。

1、两模型的趋势相似，但表现出强烈的模型依赖性。

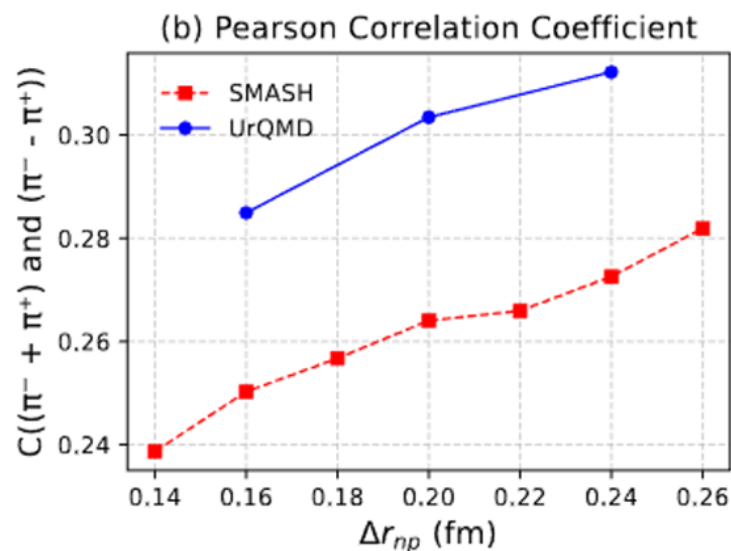
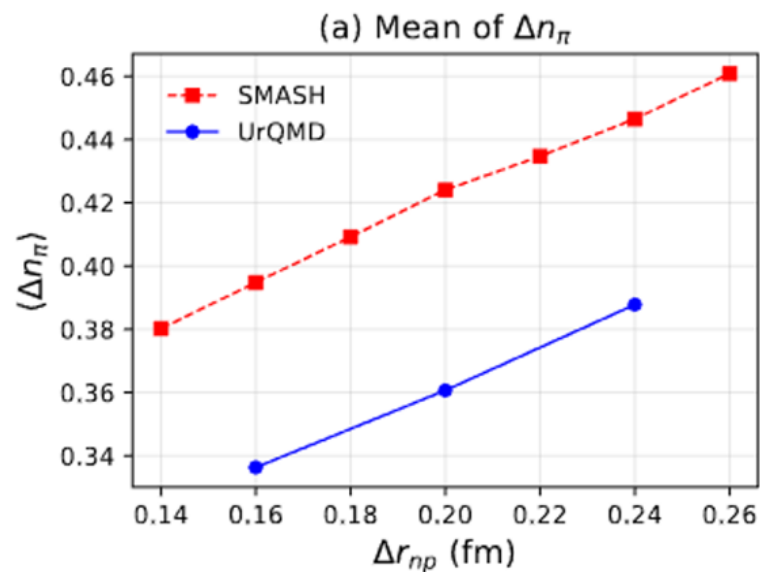
2、将  $\sqrt{s_{NN}}=3\text{Gev}$  超偏心 Au+Au 碰撞实验数据中的多个  $\Delta n_{\pi}$  对的斜率结果与该图对比，可进一步判断哪种模型更接近真实值。

# $\Delta r_{np}$ 与 $\Delta n_{\pi}$ 的平均值、 $(\pi^{-} + \pi^{+})$ 与 $(\pi^{-} - \pi^{+})$ 之间皮尔逊系数的关系

中子皮厚度  $\Delta r_{np}$  与以下物理量的关系:

(a)  $\Delta n_{\pi}$  平均值

(b)  $(\pi^{-} + \pi^{+})$  与  $(\pi^{-} - \pi^{+})$  的皮尔逊相关性



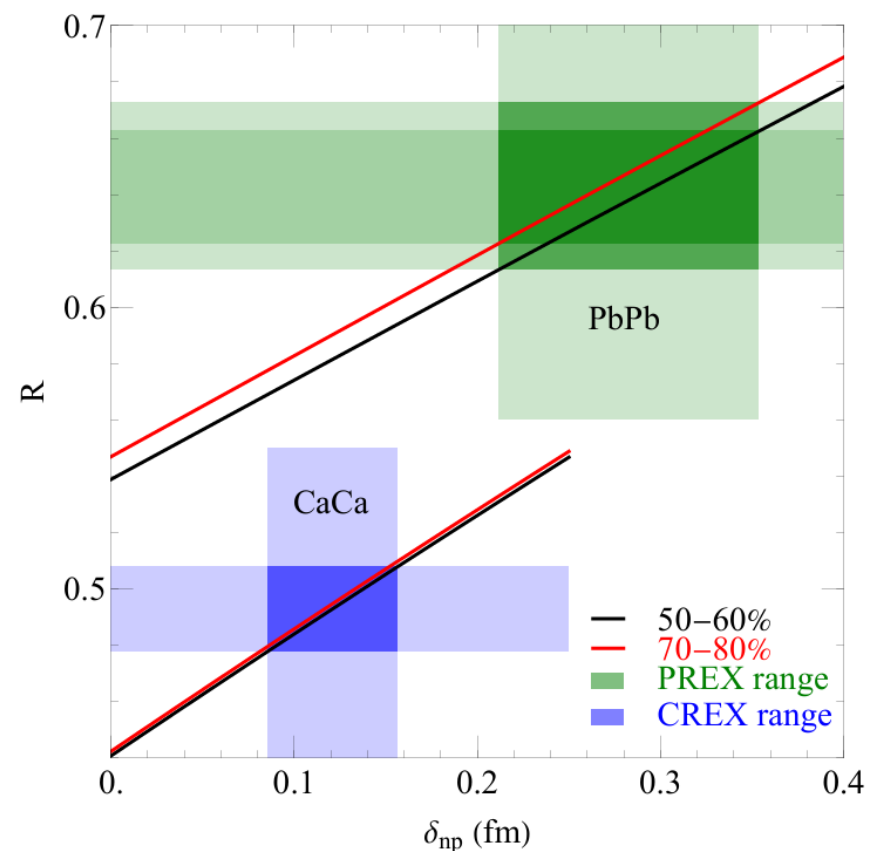
(a)  $\Delta n_{\pi}$  均值

- 随中子皮厚度增加而上升。

(b) 皮尔逊相关性

- 与  $\Delta r_{np}$  正相关，中子皮越厚，线性相关性越强。

- **UrQMD** 预测值始终高于 **SMASH**，表明其相关性更强。



Hui Zhang, Alex Akridge, Charles J. Horowitz, Jinfeng Liao, Hongxi Xing  
*arXiv: 2510.07816*

$$R = (Y_{\pi^-} - Y_{\pi^+}) / (Y_P - Y_{\bar{P}})$$

其中  $Y_{\pi^-}$ 、 $Y_{\pi^+}$ 、 $Y_P$ 、 $Y_{\bar{P}}$  分别为  $\pi^-$ 、 $\pi^+$ 、质子和反质子的产额。

偏心碰撞时R与中子皮存在线性关系。

1. 5.02 TeV Pb+Pb 与 Ca+Ca
2. 使用了多事件平均产额

- 在本研究中，我们利用 SMASH 模型和UrQMD模型模拟了质心能量  $\sqrt{s_{NN}} = 3\text{Gev}$  的不同中子皮厚度下 Au+Au 的超偏心碰撞。
- 对结果进行逐事件分析，发现不同  $\Delta n_{\pi}$  值的逐事件分布斜率与中子皮厚度呈线性关联，其中  $\Delta n_{\pi} = (-1, 1)$ 、 $(-1, 2)$ 、 $(0, 1)$  和  $(0, 2)$  对中子皮厚度的变化最为敏感； $\Delta n_{\pi}$  的平均值，以及  $(\pi^{-} + \pi^{+})$  与  $(\pi^{-} - \pi^{+})$  的皮尔逊相关系数，与  $\Delta r_{np}$  呈正相关。
- 通过比较 SMASH 与 UrQMD 模型的碰撞结果，我们发现结果有一定的模型依赖性。但是，这种模型依赖性通过从逐事件的实验数据中提取多组  $\Delta n_{\pi}$  结果来加以消除。





# Thank you

---



