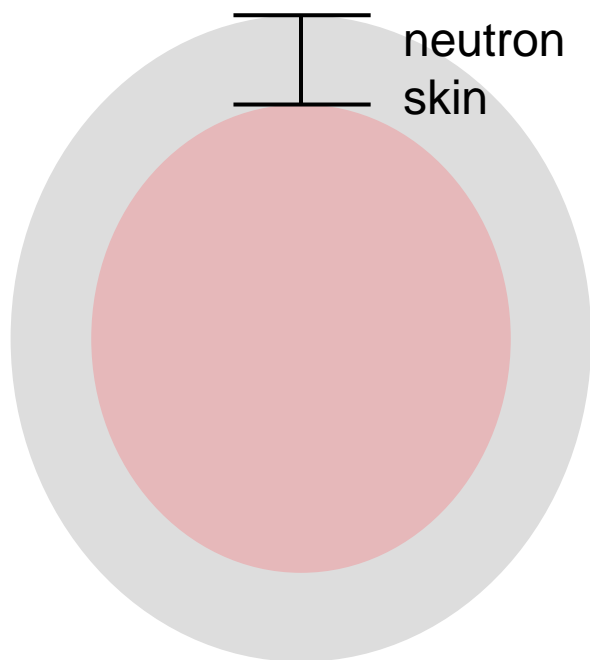




通过重离子碰撞中 逐事件 π 介子不对称性探测中子皮

报告人：田栩华
时间：2025年11月24日

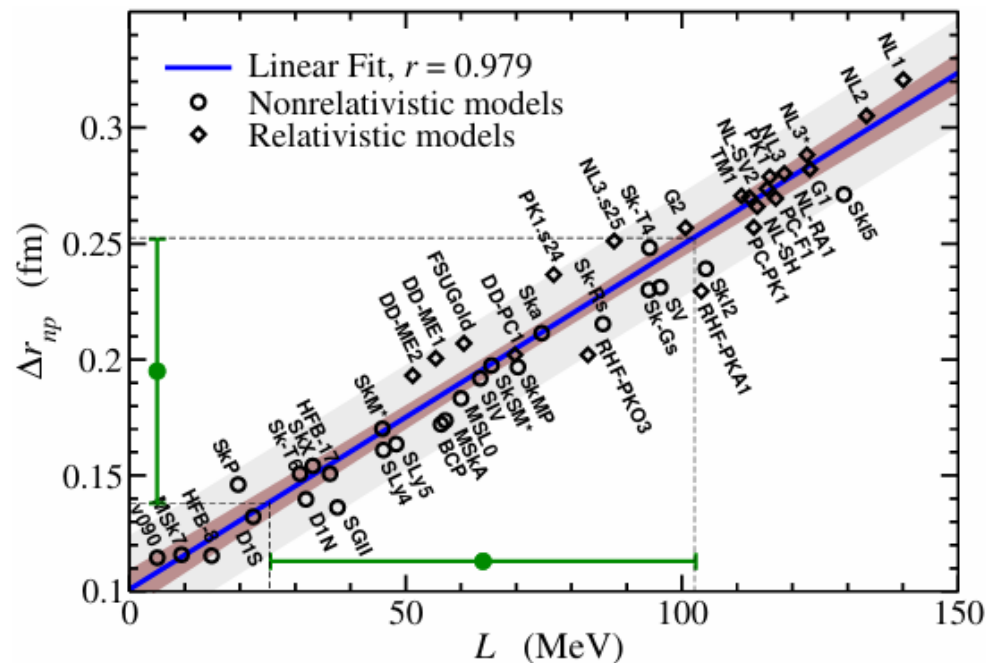
Tian,Xu-Hua and Pang,Long-Gang arXiv: 2510.20166



在富含中子的重原子核中，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: $\Delta r_{np} = \langle r_n^2 \rangle^{1/2} - \langle r_p^2 \rangle^{1/2}$

$$\Delta r_{np} = 0.101 + 0.00147L$$



X. Roca-Maza et al., PRL106 252501 (2011)

^{208}Pb 中子皮厚度 Δr_{np} 与对称能斜率 L 的关系

核子在无限大非对称核物质的平均能量可以表示为

$$E(\rho, \delta) = E_0(\rho) + E_{\text{sym}}(\rho) \delta^2 + \mathcal{O}(\delta^4)$$

$\rho = \rho_n + \rho_p$: 总核子数密度。 $\delta = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho}$: 同位旋不对称度。

$E_0(\rho)$: 对称核物质 ($\delta = 0$) 的能量。

$E_{\text{sym}}(\rho)$: 对称能, 定义为 $E_{\text{sym}}(\rho) = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 E(\rho, \delta)}{\partial \delta^2} \Big|_{\delta=0}$ 。

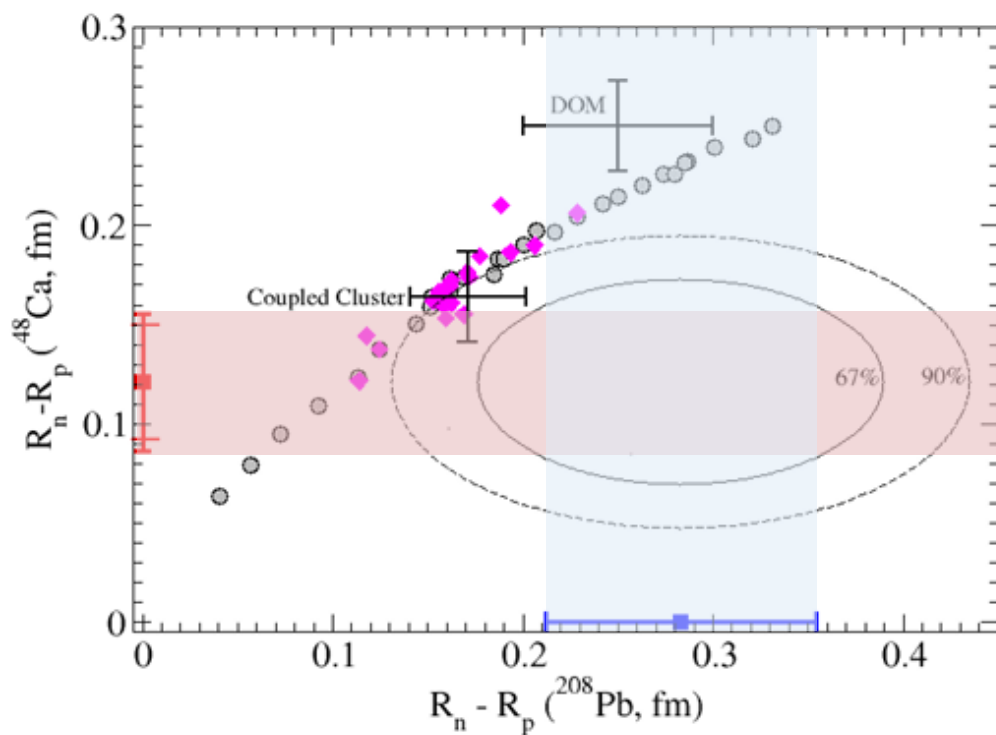
$$E_{\text{sym}}(\rho) = E_{\text{sym}}(\rho_0) + \frac{L}{3} \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right) + \frac{K_{\text{sym}}}{18} \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right)^2 + \dots$$

$E_{\text{sym}}(\rho_0)$: 饱和密度处对称能。

L : 密度斜率。

K_{sym} : 对称能曲率参数

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



^{208}Pb 与 ^{48}Ca 的中子皮厚度之间的关系

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

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

σ_R : 入射右手极化电子被靶核散射的截面。

σ_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

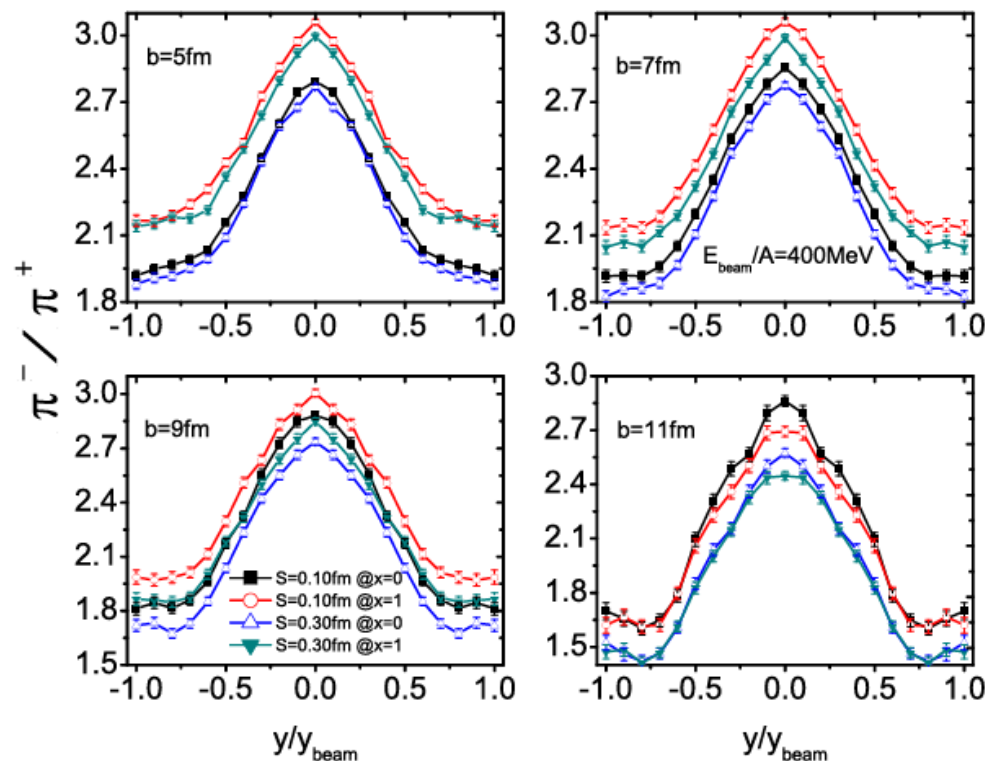
$$\rho_W(\vec{r}) = q_p \rho_p(\vec{r}) + q_n \rho_n(\vec{r})$$

$\rho_p(\vec{r})$ 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

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

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

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



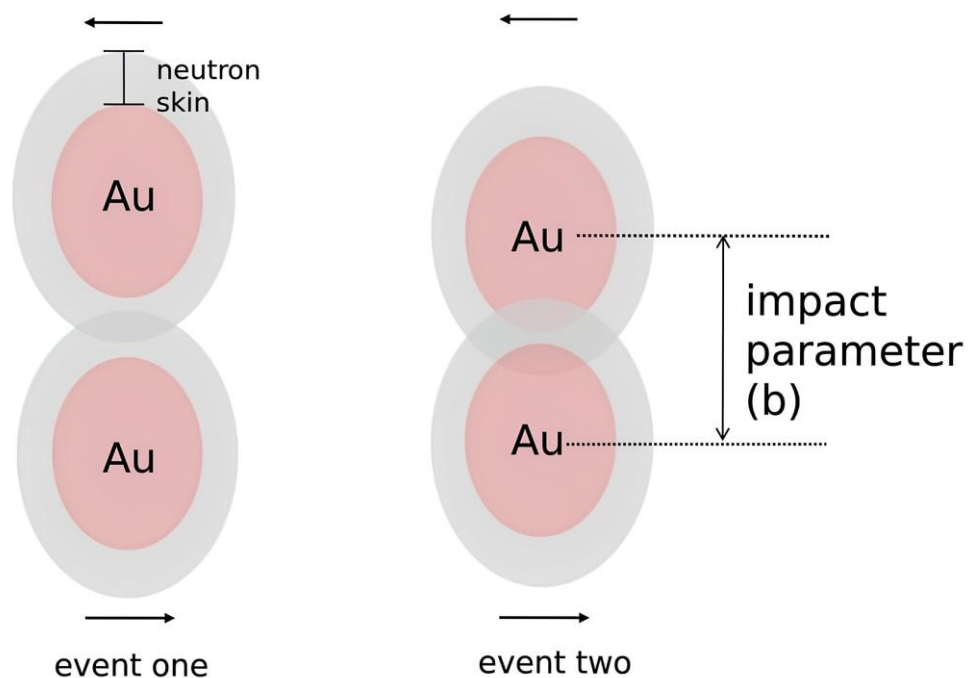
Phys.Rev.C 90 (2014) 1, 014610

X = 0时: L = 62.1 Mev

X = 1时: L = 16.4 Mev

中心碰撞时 π^-/π^+ 对L敏感，对中子皮厚度的变化不敏感。

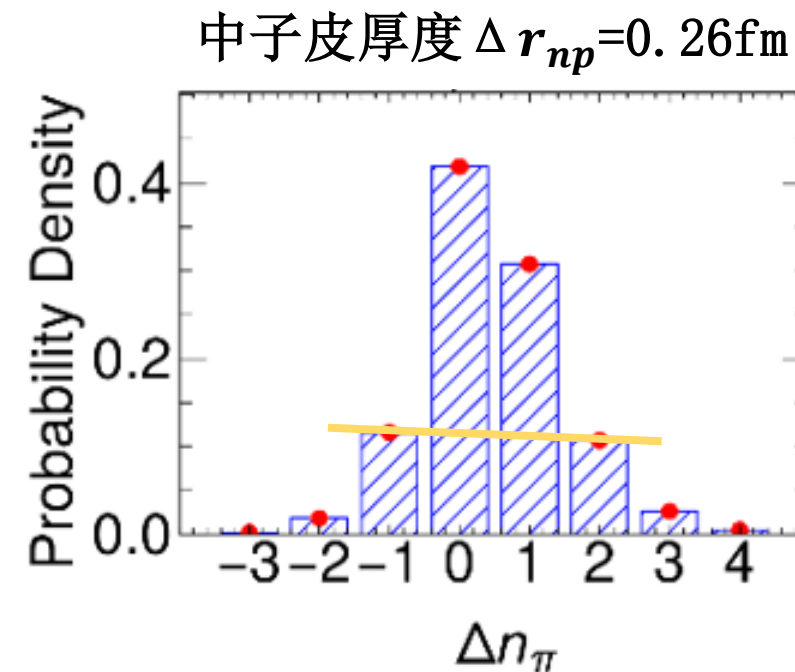
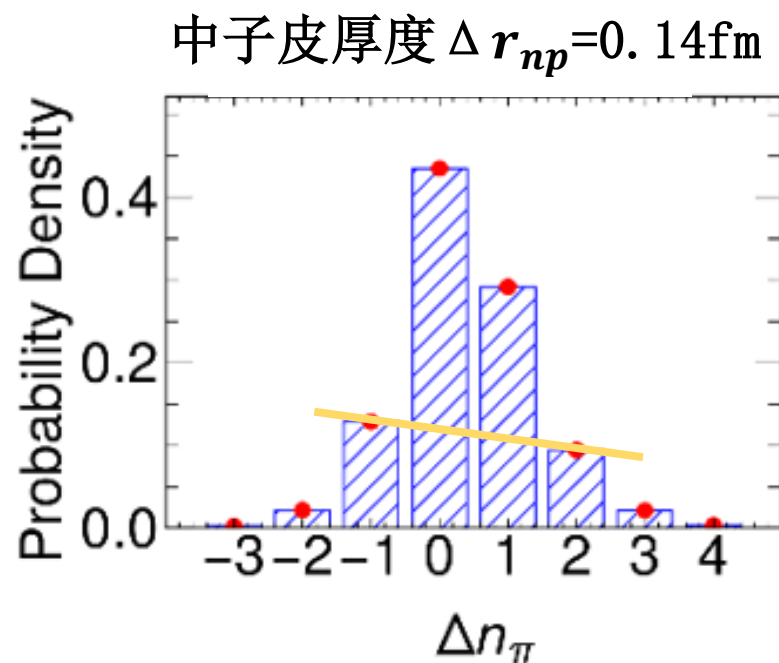
偏心碰撞时 π^-/π^+ 对中子皮厚度的变化敏感，其影响等同甚至超过对称能的影响。



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。

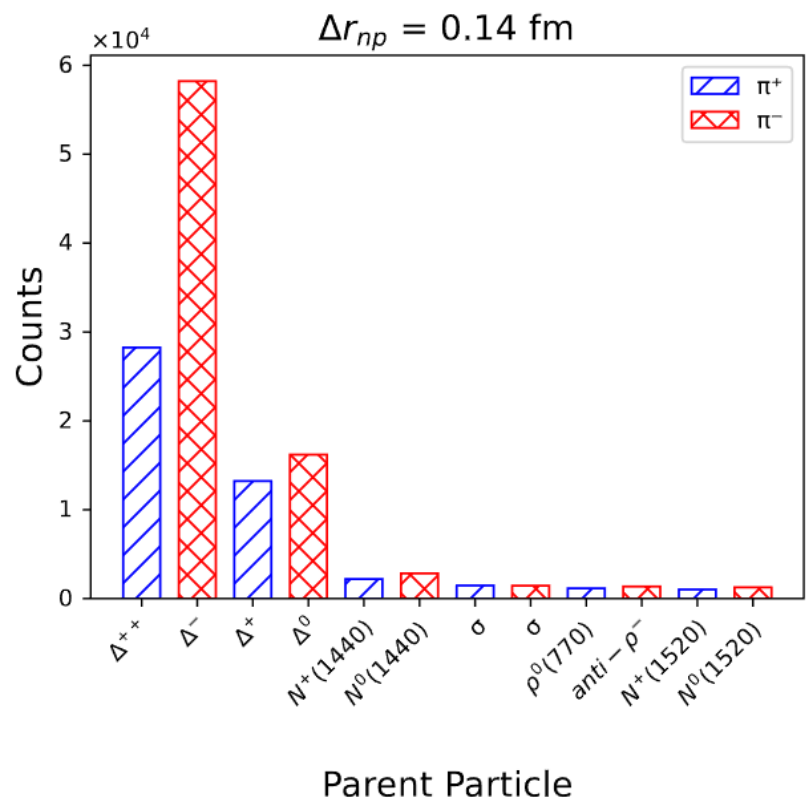
利用 SMASH (Simulating Many Accelerated Strongly-interacting Hadrons) 模型模拟质心能量 $\sqrt{s_{NN}} = 3 \text{ GeV}$ 的不同中子皮厚度的金金偏心碰撞，并对结果进行逐事件分析，以约束中子皮厚度。



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 Δn_π 的均值大于0
- 2、特定的 Δn_π 值与中子皮厚度 Δr_{np} 之间存在肉眼可见的相关性

在 Au+Au SMASH 中，共振衰变产生 π^- 和 π^+ 介子的六个最主要的衰变通道。



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

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

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

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

π^- 和 π^+ 主要来自 Δ 的衰变

在SMASH仿真中 π^- 远多于 π^+

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

Phys. Rev. C 94, 054905 (2016)

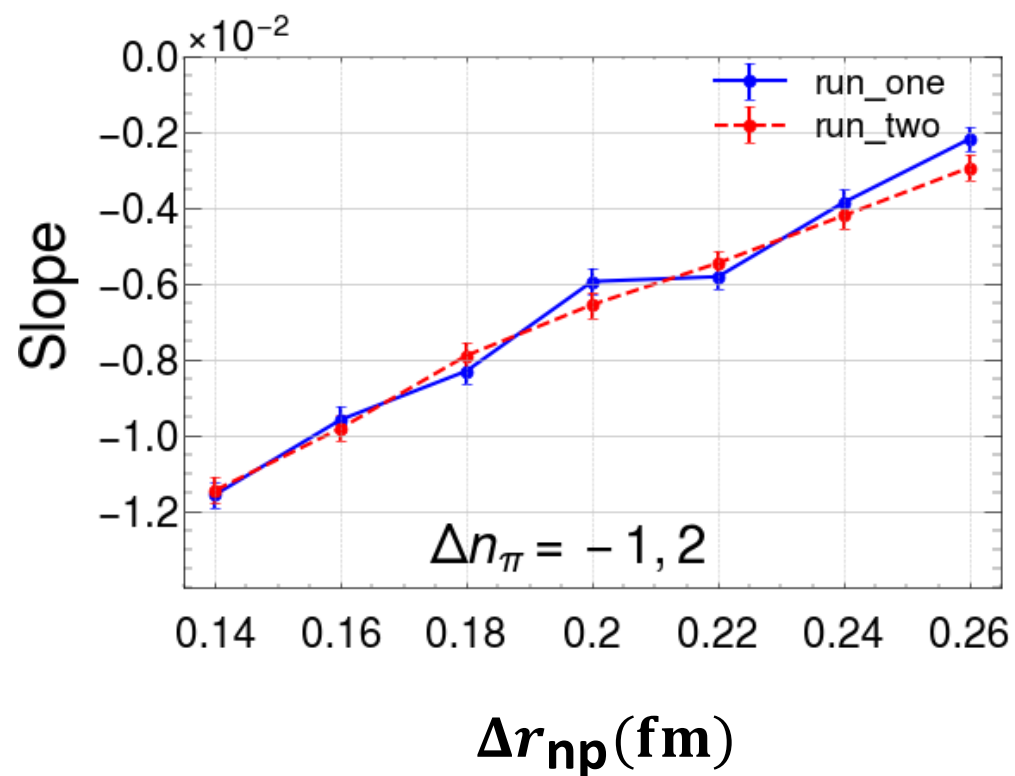
Δ^- 主要来自于 中子-中子 (nn) 碰撞

Δ^{++} 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 π^- 多于 π^+

$\Delta n_{\pi}=(-1,2)$ 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）。

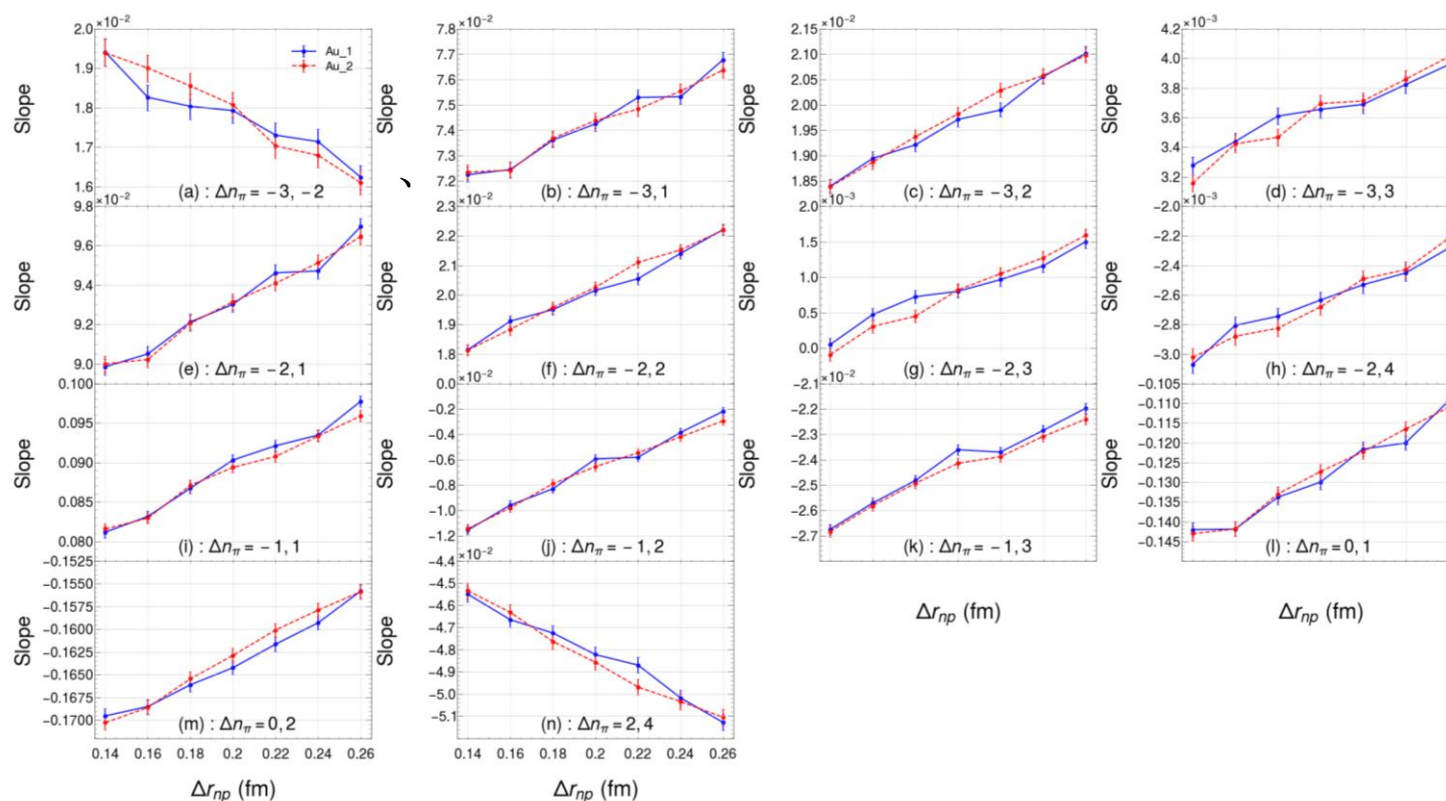
$$1、K = \frac{1}{|a|} [P(\Delta n_{\pi 2}) - P(\Delta n_{\pi 1})]$$

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

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

2、slope与 Δr_{np} 呈线性关系。

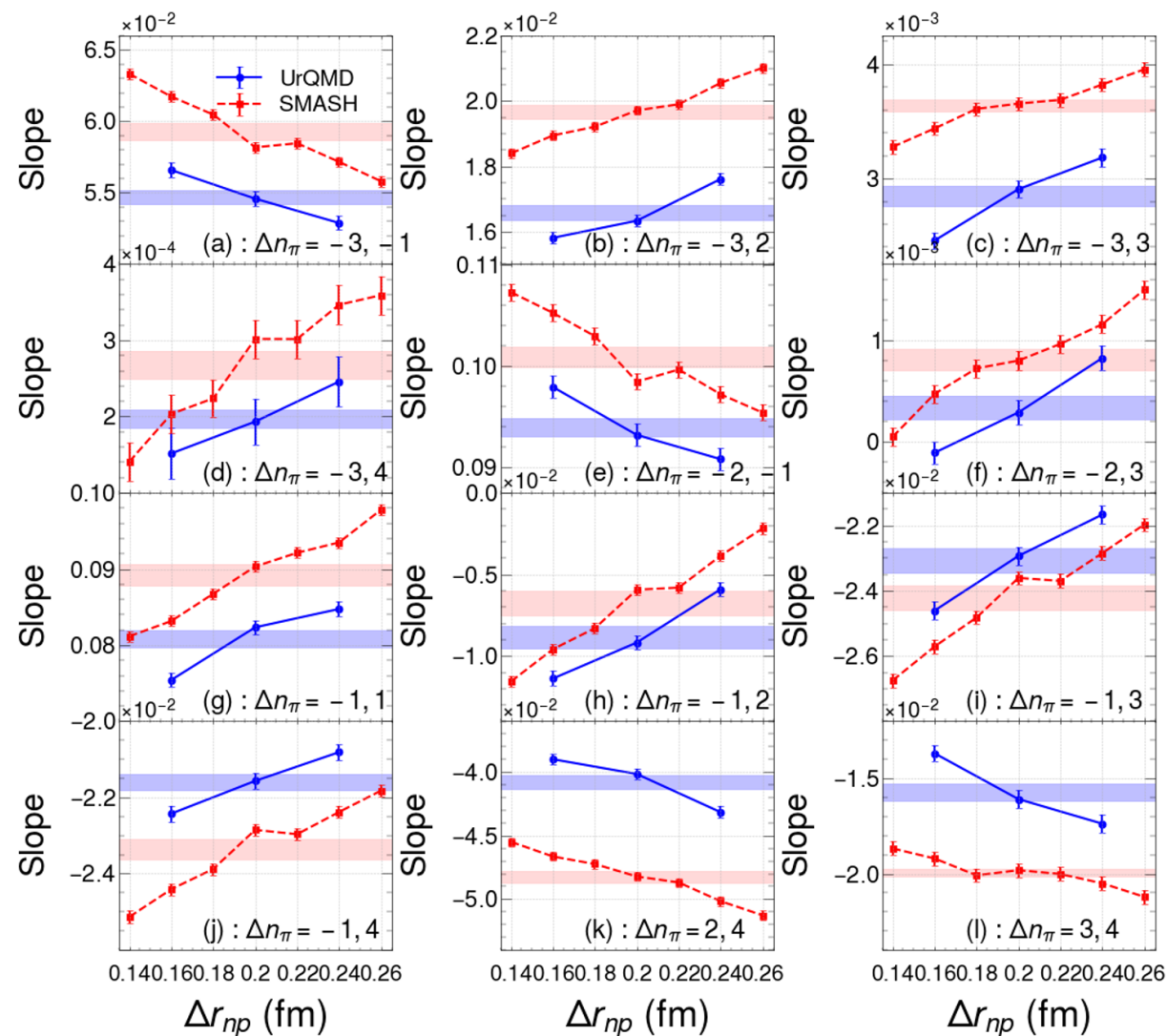
Δn_π 的 slope 与中子皮厚度的关系



直方图中两个不同 Δn_π 值所构成斜率与中子皮厚度之间的关系。

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

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。

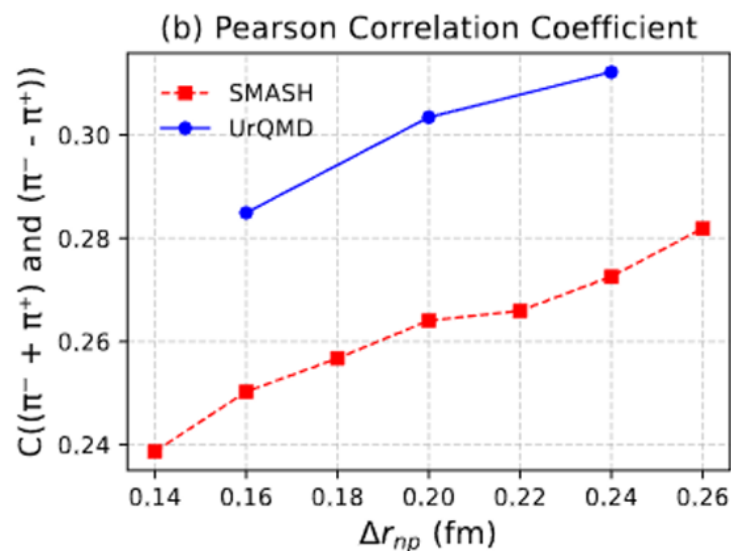
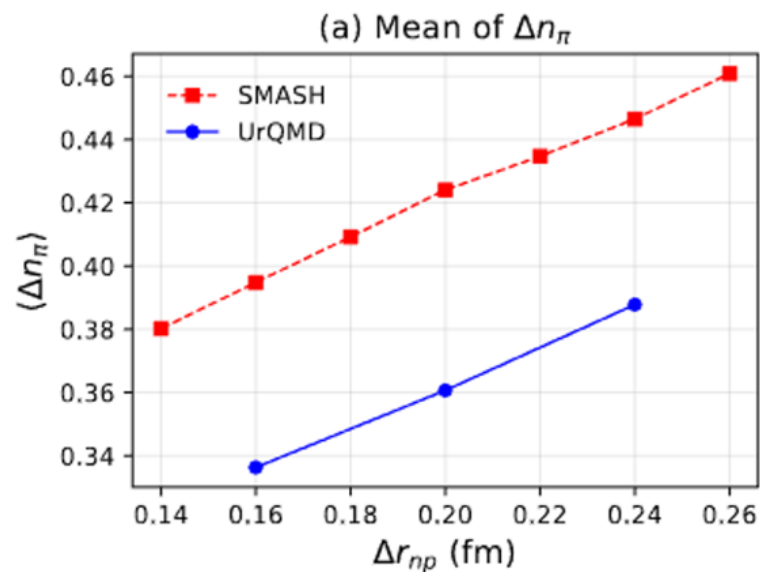
2、将 $\sqrt{s_{NN}}=3\text{Gev}$ 超偏心 Au+Au 碰撞实验数据中的多个 Δn_π 对的斜率结果与该图对比，可进一步判断哪种模型更接近真实值。

Δr_{np} 与 Δn_{π} 的平均值、 $(\pi^{-} + \pi^{+})$ 与 $(\pi^{-} - \pi^{+})$ 之间皮尔逊系数的关系

中子皮厚度 Δr_{np} 与以下物理量的关系:

(a) Δn_{π} 平均值

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



(a) Δn_{π} 均值

- 随中子皮厚度增加而上升。

(b) 皮尔逊相关性

- 与 Δr_{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。

- 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 Δn_{π} 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； Δn_{π} 的平均值，以及 $(\pi^{-} + \pi^{+})$ 与 $(\pi^{-} - \pi^{+})$ 的皮尔逊相关系数，与 Δr_{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 Δn_{π} 结果来加以消除。



Thank you

