

# 半擦边重离子碰撞中库仑势与对称势的 相互竞争

(The competition between Coulomb and symmetry potential in semi-peripheral HICs)

吴强华

- 1, 广西师范大学(GXNU);
- 2, 中国原子能科学研究院(CIAE);

合作者: 张英逊(CIAE), 李祝霞(CIAE), 肖志刚  
(TsingHua), 王仁生(TsingHua), 王宁(GXNU)

# 提纲

- 引言
- 库仑势与对称势的相互竞争
- 如何观测到库仑势与对称势的相互竞争?
- 总结与展望

# 引言

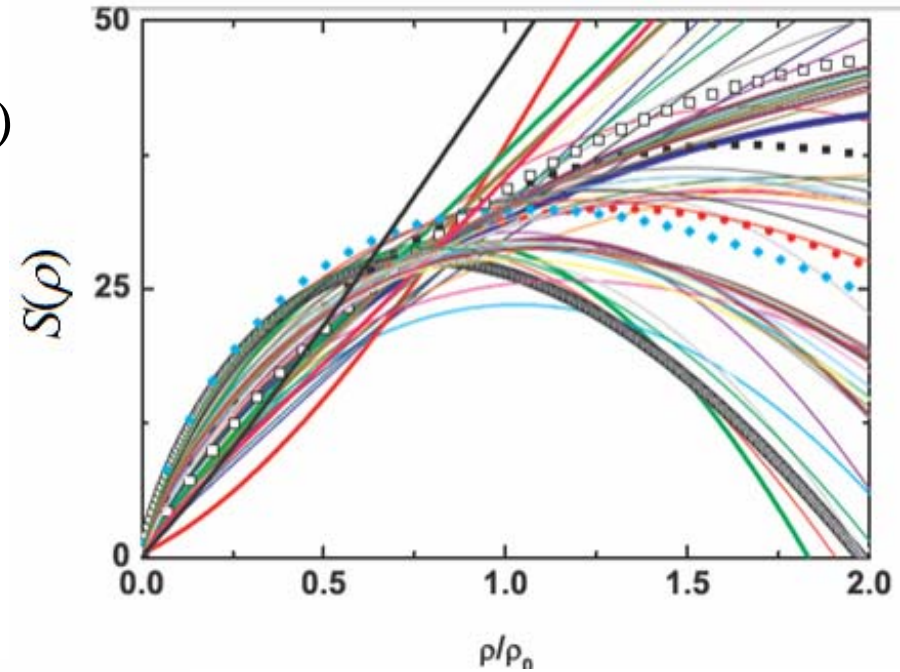
同位旋非对称核物质状态方程(EOS)对于理解远离 $\beta$ 稳定线的核结构、反应以及中子星的性质等有都非常重要。

$$E(\rho, \delta) = E(\rho, \delta = 0) + S(\rho)\delta^2 + o(\delta^4)$$

$$S(\rho) = S_0 + \frac{L}{3} \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right) + \frac{K_{sym}}{18} \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right)^2 + \dots$$

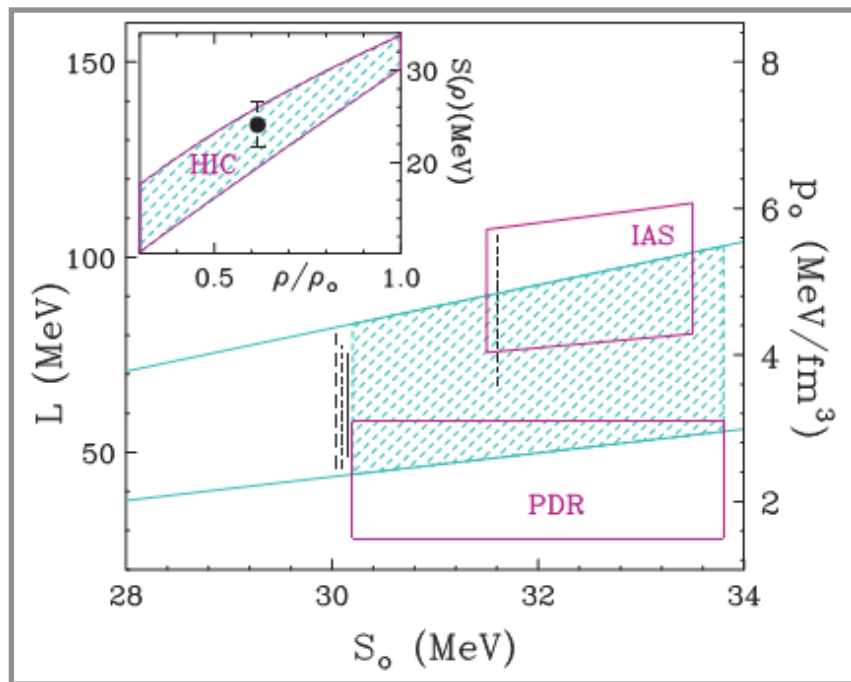
$$L = 3\rho_0 \left. \frac{\partial E_{sym}}{\partial \rho} \right|_{\rho=\rho_0} \quad (\text{Many-body Theory: } L: -50 \sim 200;)$$

$$K_{sym} = 9(\rho_0)^2 \left. \frac{\partial^2 E_{sym}(\rho)}{\partial \rho^2} \right|_{\rho=\rho_0} \quad (\text{Many-body Theory: } K_{sym}: -700 \sim 466 \text{ MeV;})$$

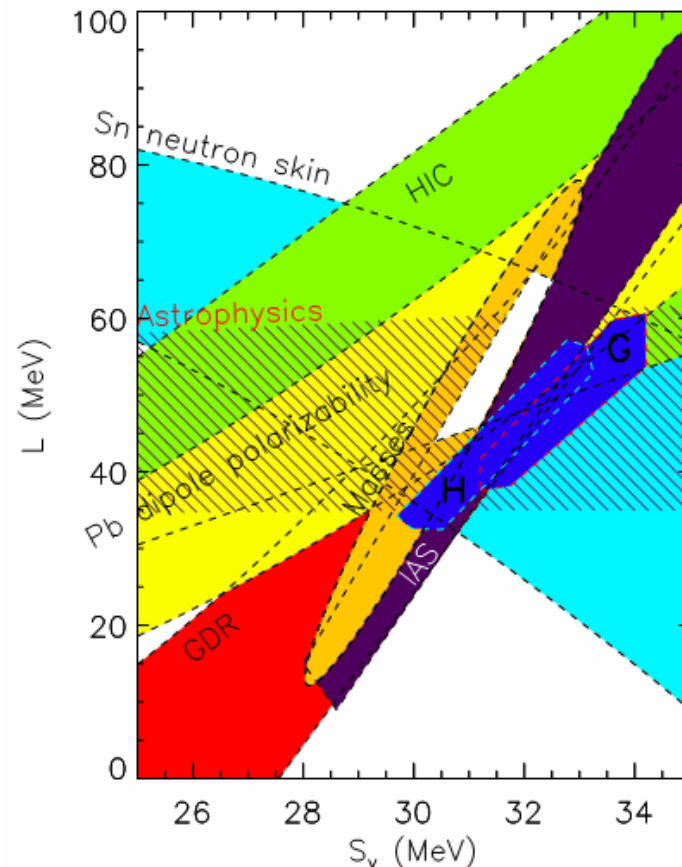


L.W. Chen, C.M. Ko and B.A. Li, Phys. Rev. C72, 064309 (2005)

核物理学家们已经做过很多尝试来约束对称能.



M. B. Tsang, Yingxun Zhang, p. Danielewicz, et al, PRL 102, 122701 (2009)



J. Lattimer, et al., arXiv:1403.1186

•理解这些模型之间的差异成为准确约束对称能的一个重要挑战!

## 差异性来源何处?以运输模型为例:

- 平均场，核子核子碰撞的不同处理；（复杂巨大的工程，目前国际国内同行正在进行）
- 丰中子核的反应机制；

• .....

需要做新的实验！寻找新的物理探针！来深入理解反应机制

F. Amorini, et al., Phys.Rev.Lett.102, 112701(2009).

P. Russotto, et al., Phys.Rev.C81, 064605(2010).

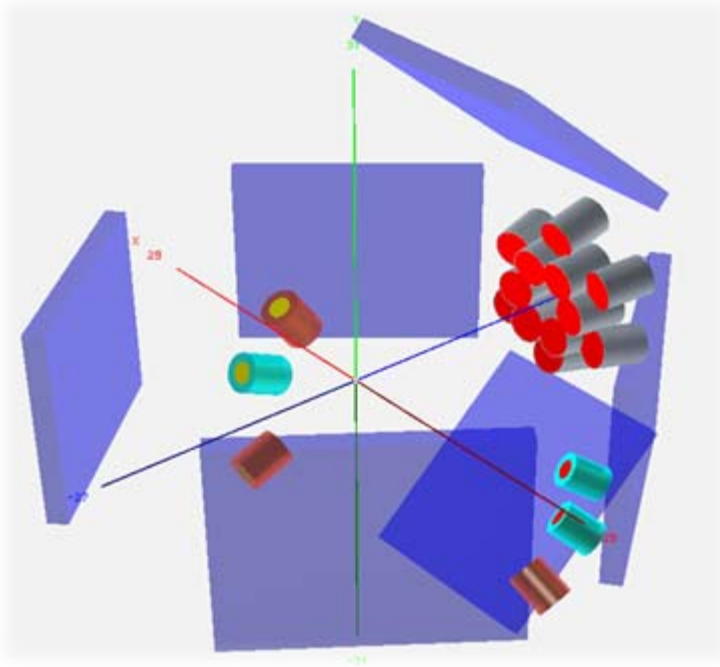
S. Hudan, et al., Phys.Rev.C86, 021603(2012).

R. S. Wang, Y. Zhang, Z. G. Xiao, J. L. Tian, Y. X. Zhang, et al.,

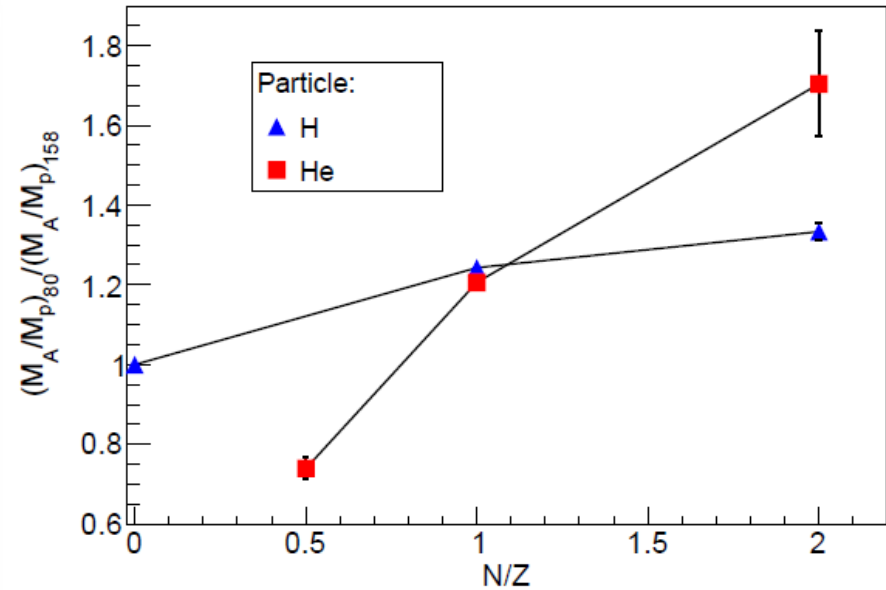
Phys.Rev.C89, 064613(2014).

.....

$^{40}\text{Ar}+^{197}\text{Au}$  35MeV/u



R. S. Wang, Y. Zhang, Z. G. Xiao, et al.,  
Phys.Rev.C89, 064613(2014).



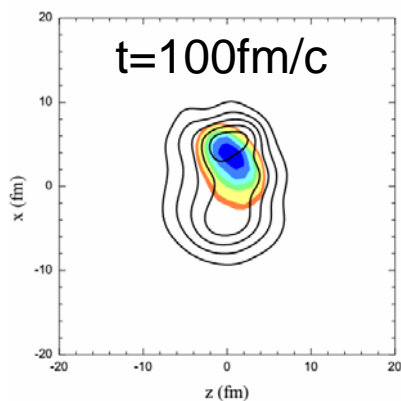
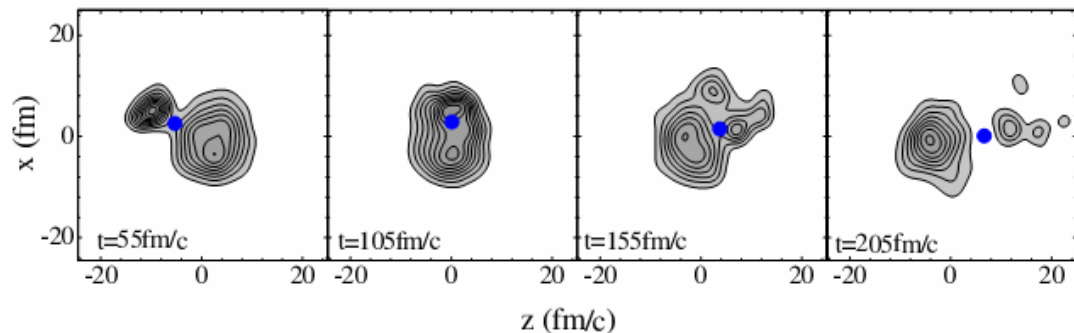
$$\frac{[Y(X)/Y(p)]_{80^\circ}}{[Y(X)/Y(p)]_{158^\circ}}$$

轻带电粒子(LCPs)动力学发射有很强的同位旋效应，特别是对于丰中子轻带电离子而言更易在小角度分布！

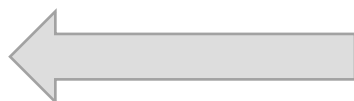
意味着轻粒子(LPs)角分布各向异性含有反应机制及对称能的重要信息。

$^{40}\text{Ar}+^{197}\text{Au}$  , 35MeV/u,  $b=6\text{fm}$

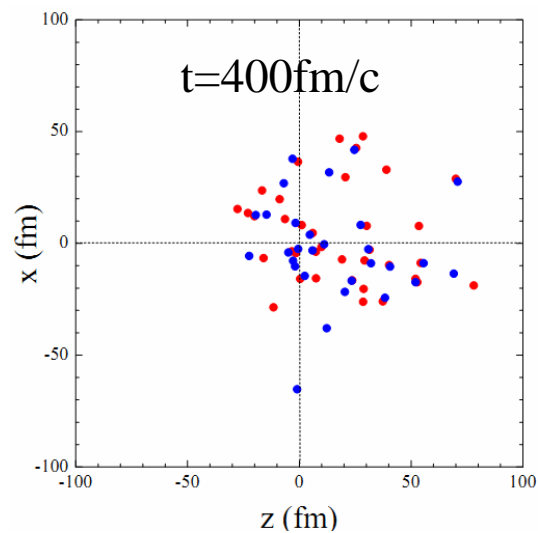
# 动力学发射的轻粒子来源何处？



追溯到100fm/c



$^{40}\text{Ar}+^{197}\text{Au}, b=6\text{fm}, 35\text{MeV}/u$



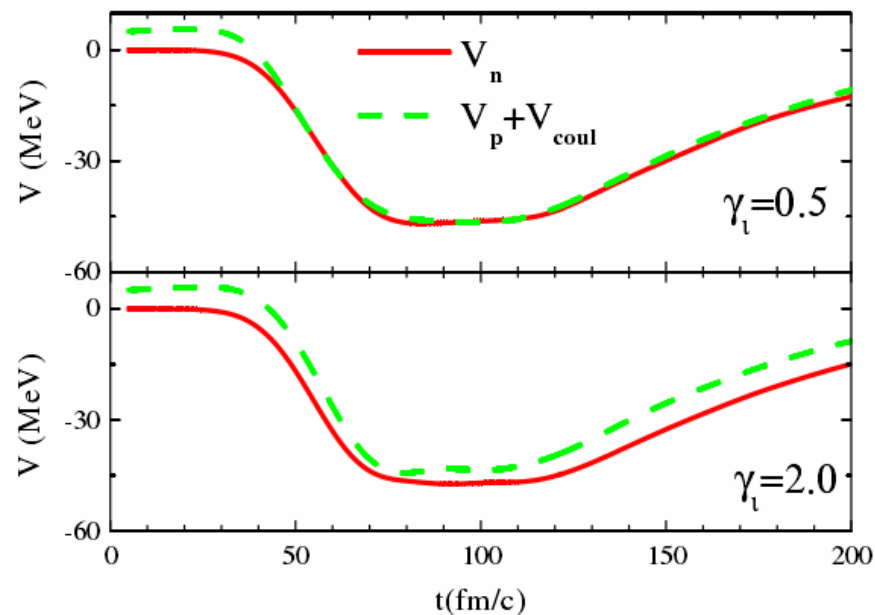
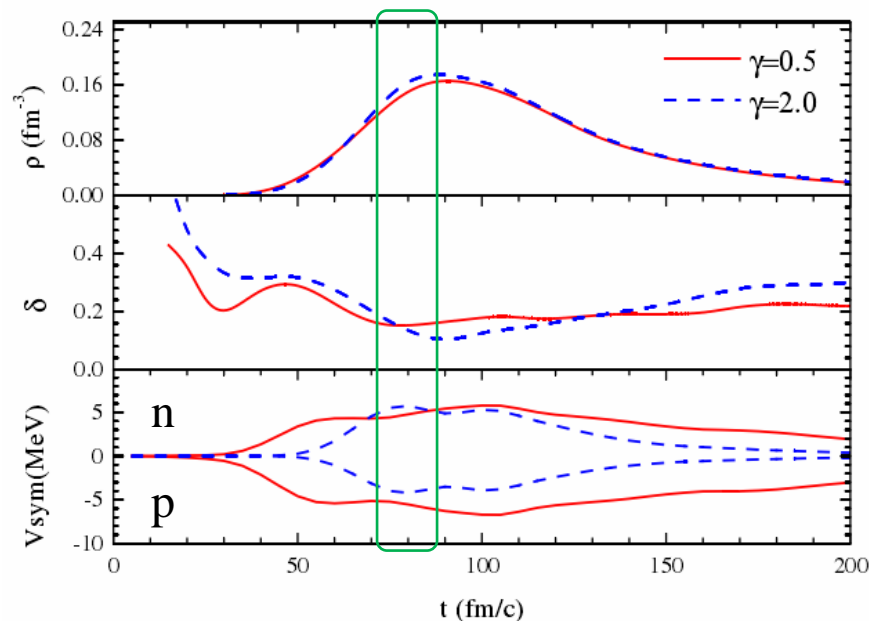
发射的核子主要来源于弹靶重叠区(半擦边碰撞的脖子区)

# 库仑势与对称势的相互竞争

弹靶重叠区密度、同位旋不对称度、对称势、单粒子势随时间的演化

$^{40}\text{Ar}+^{197}\text{Au}$ ,  $E_{\text{beam}}=35\text{MeV/u}$ ,  $b=6\text{fm}$

脖子区是丰中子区



- 1, 除了80fm/c附近, 对于中子质子,  $\gamma_i=0.5$ 的对称势强度大于  $\gamma_i=2.0$ 对应的对称势的强度;
- 2, 80fm/c附近,  $\gamma_i=0.5$ 的对称势强度小于  $\gamma_i=2.0$ 对应的对称势的强度  
~80fm/c 对35AMeV。.....

- 3, 质子与中子单粒子势的差距:  $\gamma_i=2.0$ 对应的结果大于  $\gamma_i=0.5$ 对应的结果

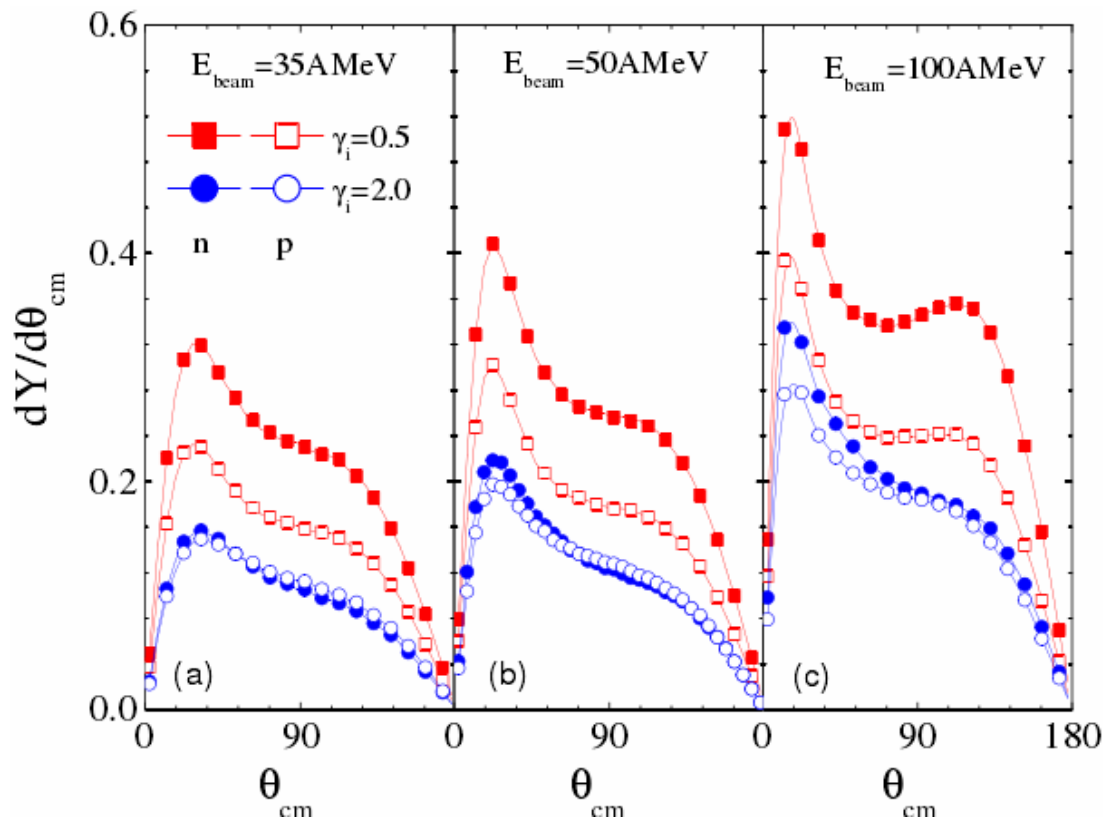


# 如何观测到库仑势与对称势的相互竞争?

为了回避运输模型对LPs产额描写不准确的问题, 我们构建出并合不变产额(Coalescence invariant):

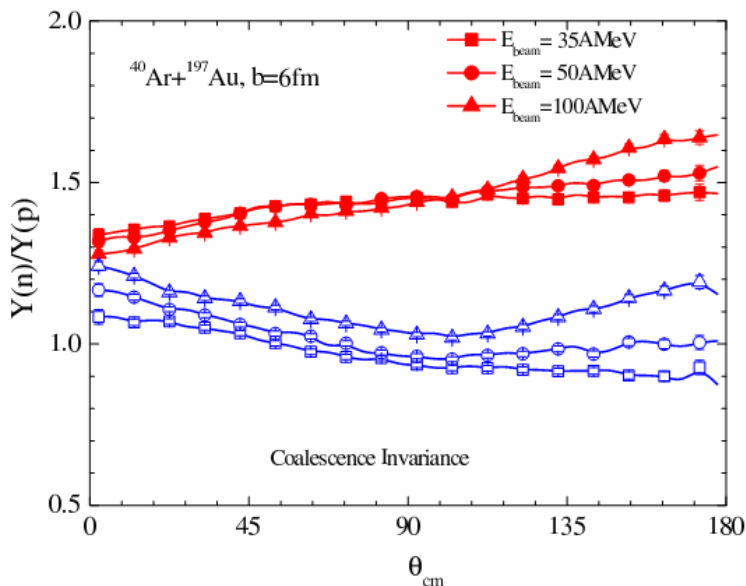
$$dM_{n,ci} = \sum_{N,Z} N \cdot dY(N,Z)$$

$$dM_{p,ci} = \sum_{N,Z} Z \cdot dY(N,Z).$$



A,  $\gamma_i = 0.5$ 对应的CI核子的产额大于  $\gamma_i = 2.0$ 的CI核子对应的产额;

B, 对于  $\gamma_i = 0.5$ , CI中子的产额总是大于CI质子的产额;  $\gamma_i = 2.0$ , 在  $E_{\text{beam}} < 80 \text{ MeV/u}$ , CI质子的产额大于CI中子的产额;



1,  $\gamma_i=0.5$ , CI n/p 的值随着  $\theta_{cm}$  的增加而增加,  $V_n \sim V_p$ ;

2,  $\gamma_i=2.0$ , CI n/p 的值随着  $\theta_{cm}$  的增加一直减小,  $V_n < V_p$ 。

$$R_{iso1} = R_{n/p}(20^\circ) / R_{n/p}(90^\circ)$$

$$R_{iso2} = R_{n/p}(90^\circ) / R_{n/p}(160^\circ)$$

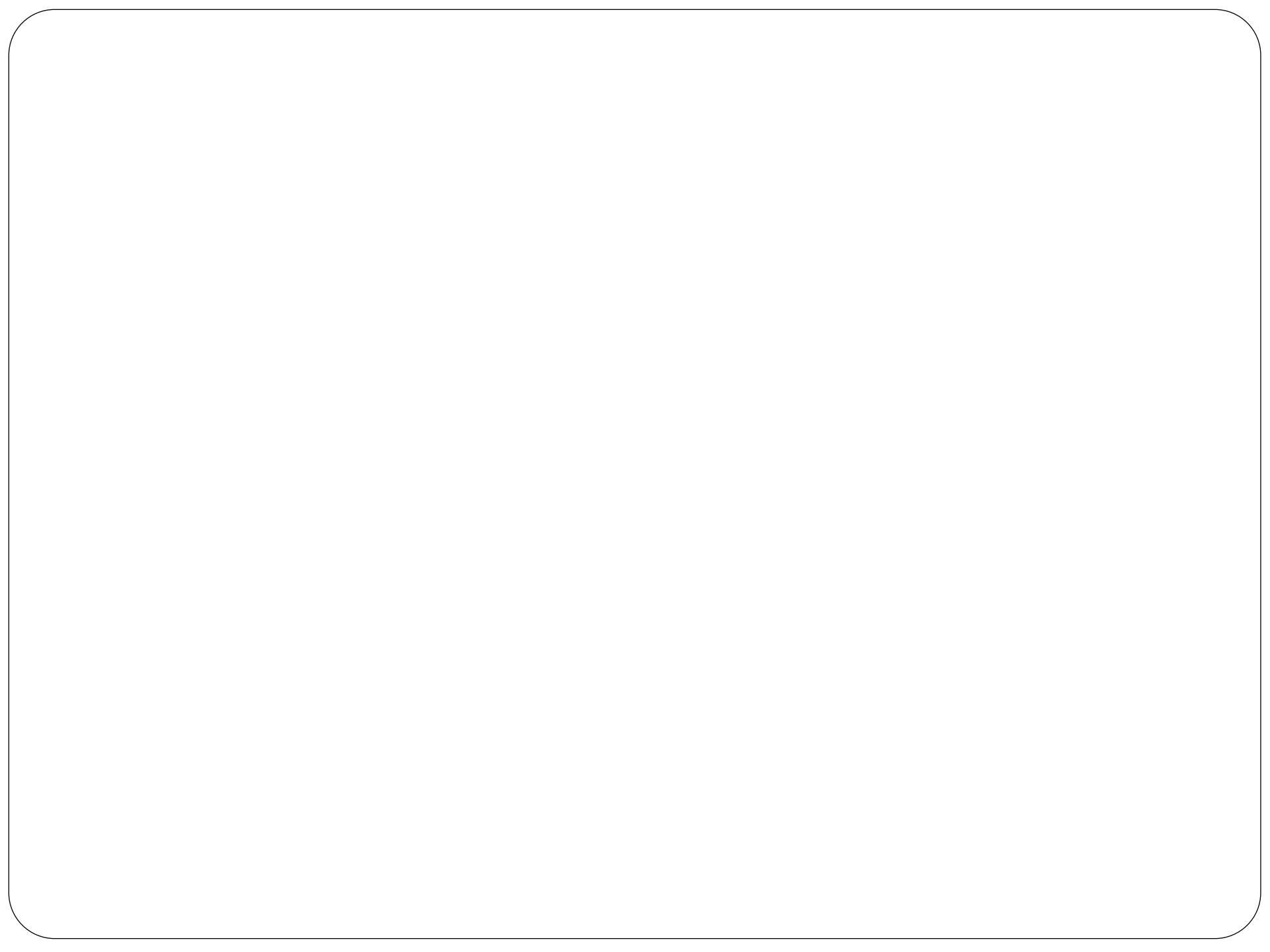
$E_{beam}$	$R_{iso1}(\gamma_i = 0.5)$	$R_{iso1}(\gamma_i = 2.0)$	$R_{iso2}(\gamma_i = 0.5)$	$R_{iso2}(\gamma_i = 2.0)$
35MeV/u	$0.94 \pm 0.01$	$1.14 \pm 0.01$	$0.99 \pm 0.01$	$1.04 \pm 0.01$
50MeV/u	$0.93 \pm 0.01$	$1.15 \pm 0.01$	$0.96 \pm 0.01$	$0.96 \pm 0.01$
100MeV/u	$0.92 \pm 0.01$	$1.13 \pm 0.01$	$0.88 \pm 0.01$	$0.88 \pm 0.01$

所以，我们可以通过CI n/p值的角分布来观测库仑势与对称势的相互竞争

# 总结与展望

- 1, 半擦边非对称重离子碰撞中, 通过在弹区、靶区测量,  $CI_{n/p}$ , 可以明显的观测到对称势和库仑势的竞争;
- 2, 对于Ar+Au系统, 前角发射的 $CI_{n/p}$ 比值角分布值敏感依赖于对称能的硬度;  $\gamma_i=0.5$ ,  $CI_{n/p}$ 随角度的增加而增加, 而对于  $\gamma_i=2.0$ ,  $CI_{n/p}$  随角度的增加而减小;
- 3, 在更进一步的实验中, 测量LPs在大角度范围内的同位旋构成将很有意思。

*thanks*



# Remark

## 量子分子动力学模型简介

量子分子动力学模型是由 [aichelin](#) 等人[xx]于上世纪 90 年代提出的动力学模型。模型简单描述为：每个核子可以简单地描述为一个高斯波包的形式：

$$\phi_i(\vec{r}) = \frac{1}{(2\pi\sigma_r^2)^{3/4}} \exp\left[-\frac{(\vec{r} - \vec{r}_i)^2}{4\sigma_r^2}\right] \exp\left[\frac{i \cdot \vec{p}_i \cdot \vec{r}}{\hbar}\right]$$

将单个高斯波包进行 Winger 变换，得到单个核子在相空间的分布形式为：

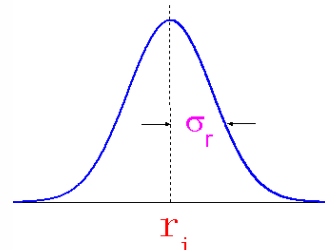
$$\begin{aligned} f_i(\vec{r}, \vec{p}) &= \frac{1}{(2\pi\hbar)^3} \int \exp\left[-\frac{i \cdot \vec{p}_{12} \cdot \vec{r}_{12}}{\hbar}\right] \phi_i^*(\vec{r}) \phi_i(\vec{r}) d\vec{r}_{12} \\ &= \frac{1}{(\pi\hbar)^3} \exp\left[-\frac{(\vec{r} - \vec{r}_i)^2}{2\sigma_r^2}\right] \exp\left[-\frac{(\vec{p} - \vec{p}_i)^2}{2\sigma_p^2}\right] \end{aligned}$$

由于根据守恒关系，相空间的所有核子分布为满足：

$$\int \int f(\vec{r}, \vec{p}) d\vec{p} d\vec{r} = \int \int \sum_{i=1}^A f_i(\vec{r}, \vec{p}) d\vec{p} d\vec{r} = A$$

通过将原子核密度在相空间中的分布在动量空间中积分得到原子核在坐标空间中的密度分布为：↵

$$\rho(\vec{r}) = \int f(\vec{r}, \vec{p}) d\vec{p} = \frac{1}{(2\pi\sigma^2_r)^{\frac{3}{2}}} \sum_{i=1}^A \exp\left[-\frac{(\vec{r} - \vec{r}_i)^2}{2\sigma_r^2}\right] \quad \leftarrow$$

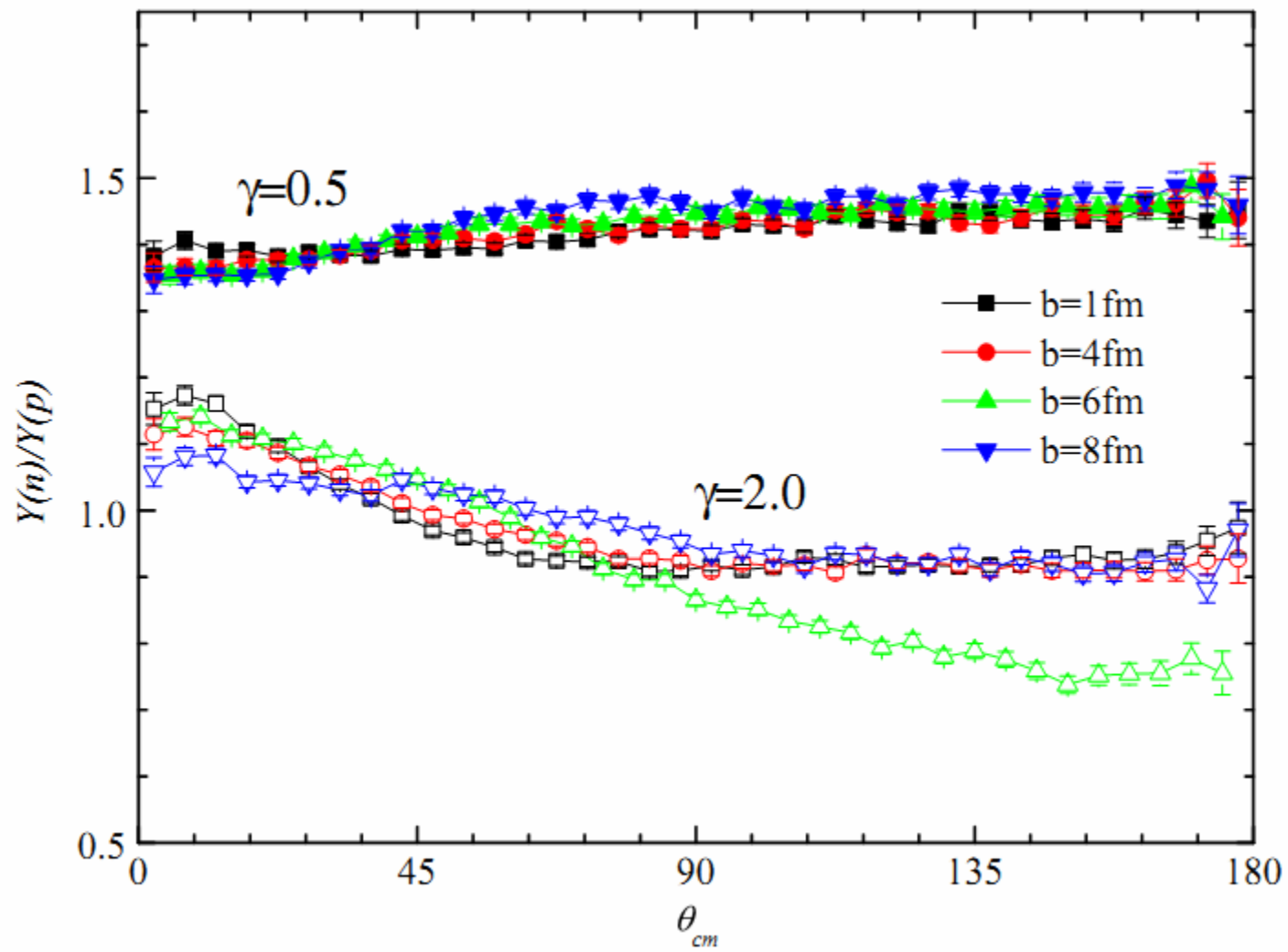


相应的将原子核在动量空间中的密度分布在坐标空间中进行积分得到核子在动量空间中的密度分布为：↵

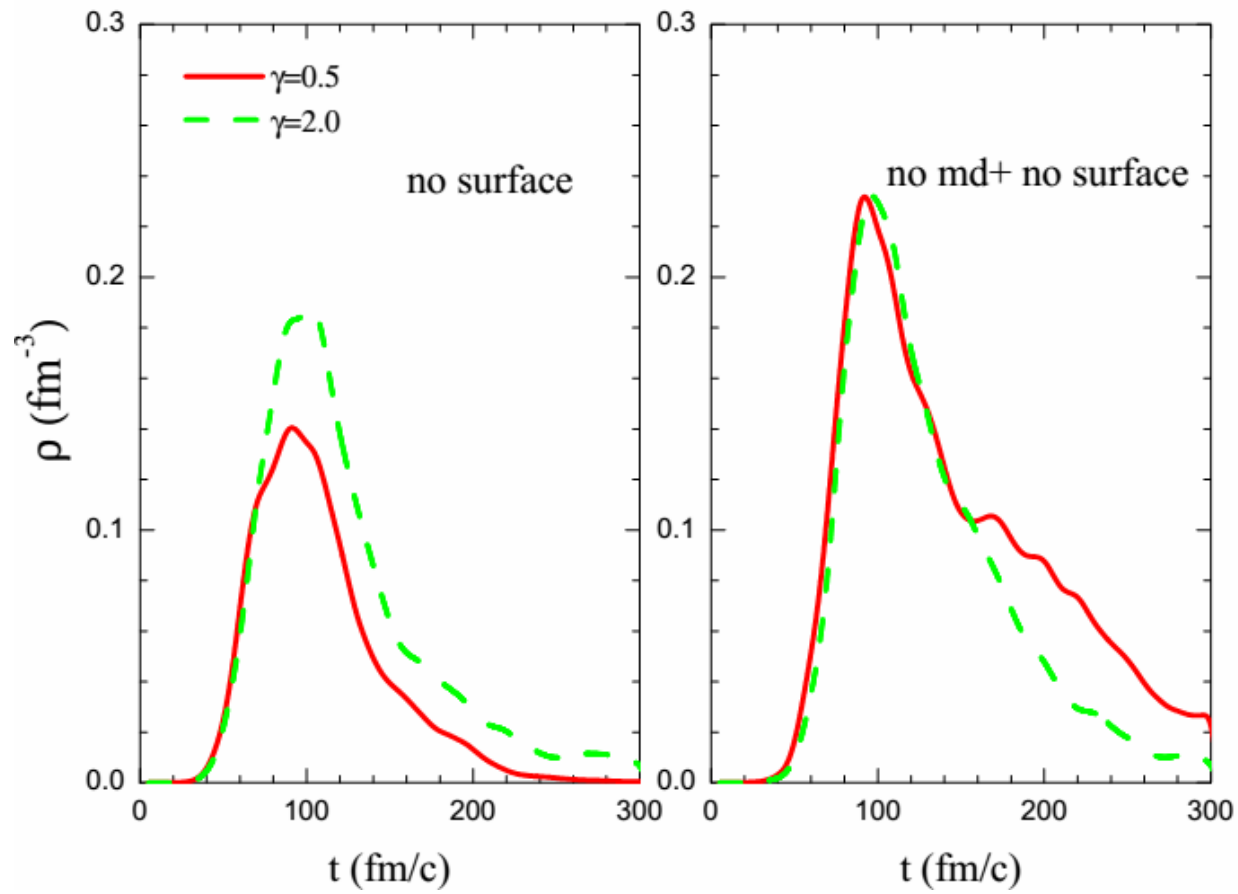
$$g(\vec{p}) = \int f(\vec{r}, \vec{p}) d\vec{r} = \frac{1}{(2\pi\sigma^2_p)^{\frac{3}{2}}} \sum_{i=1}^A \exp\left[-\frac{(\vec{p} - \vec{p}_i)^2}{2\sigma_p^2}\right] \quad \leftarrow$$

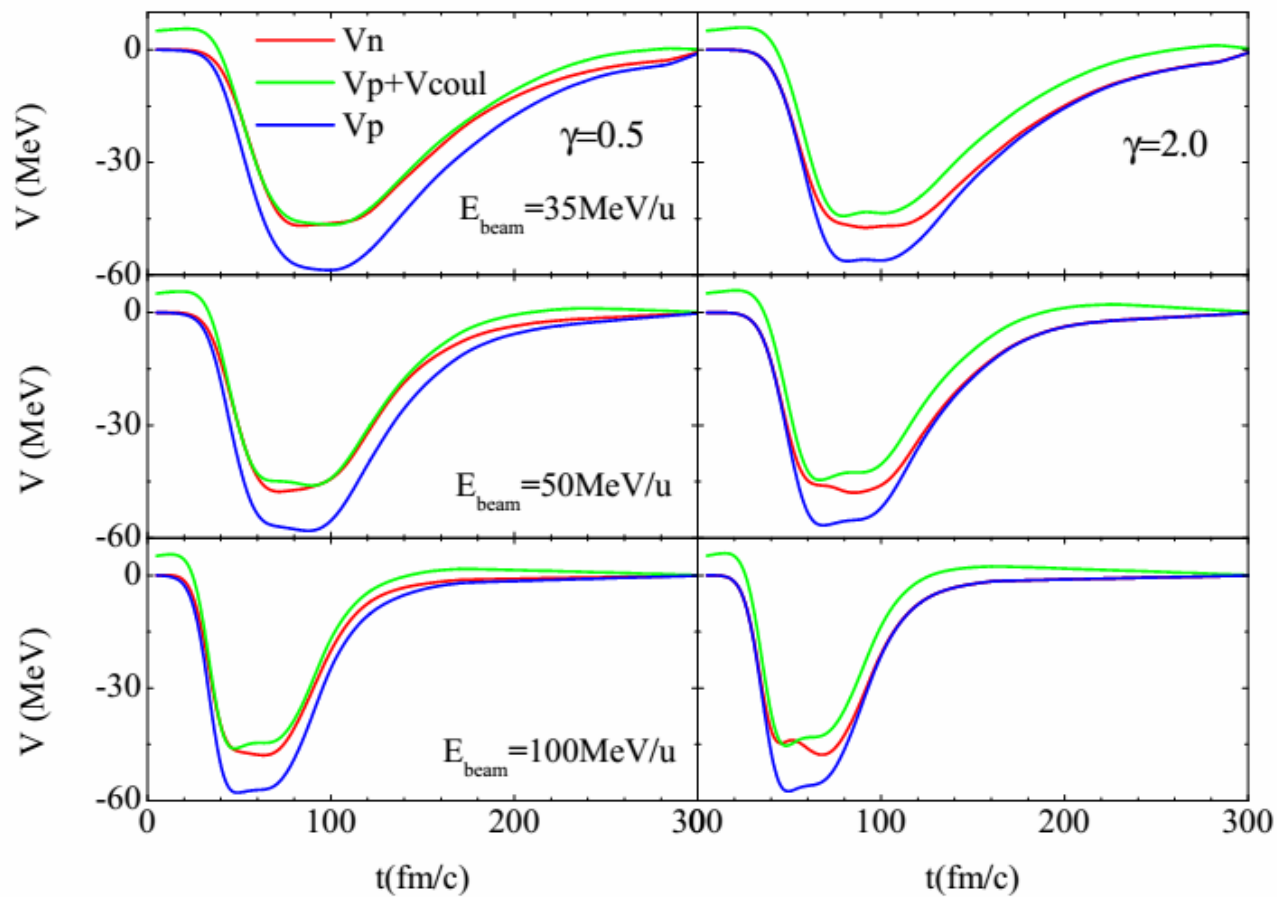
核子在坐标空间中的运动遵循正则方程，表述如下：↵

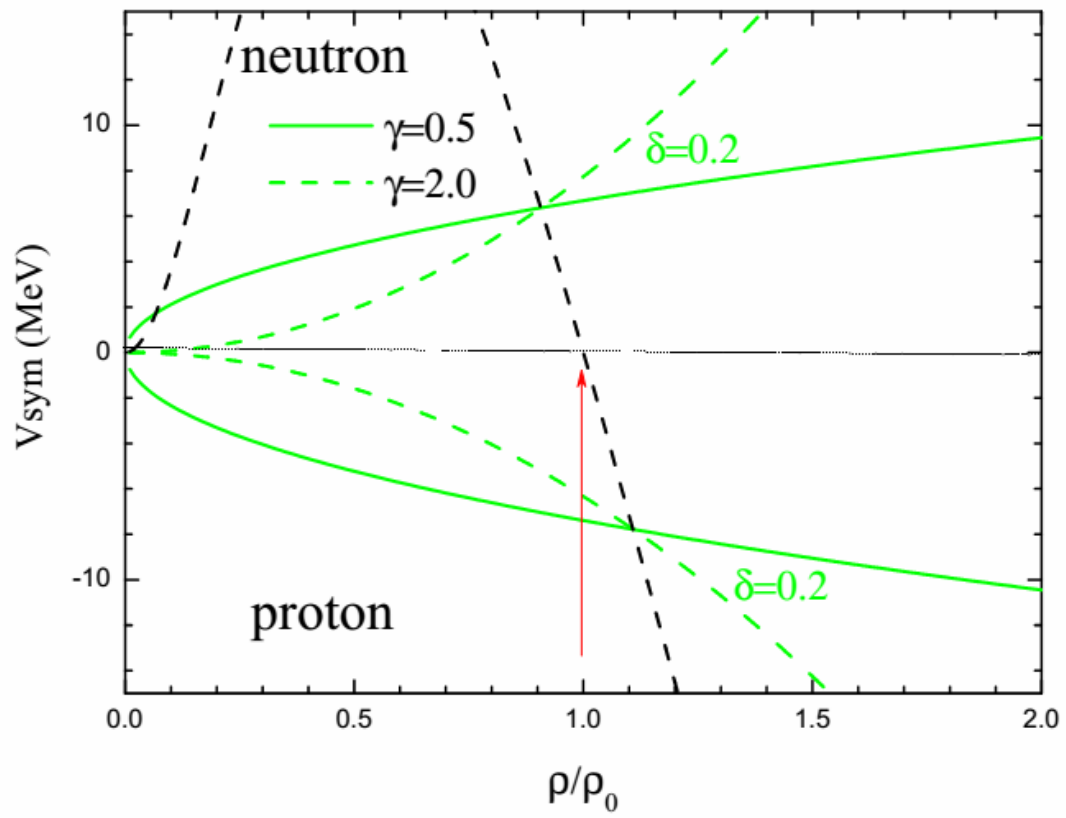
$$\dot{\vec{r}}_i = \frac{\partial H}{\partial \vec{p}_i} \quad , \quad \dot{\vec{p}}_i = -\frac{\partial H}{\partial \vec{r}_i} \quad \leftarrow$$





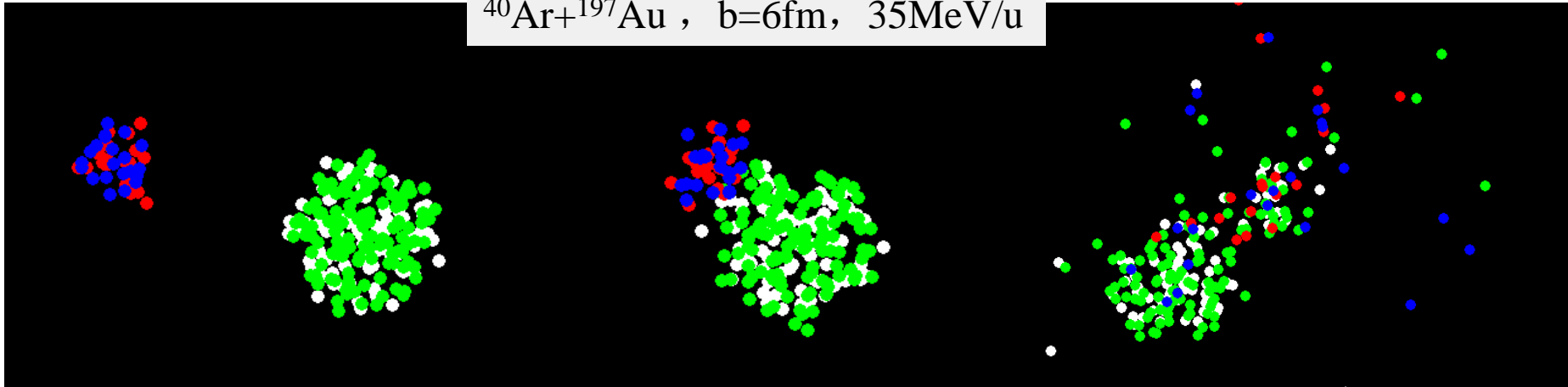






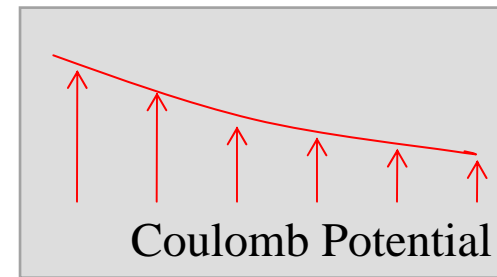
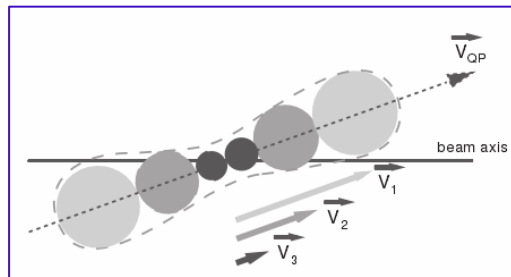
# Ar+Au擦边碰撞的三个重要阶段

$^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$  ,  $b=6\text{fm}$  ,  $35\text{MeV/u}$



碎块的分布具有明显的层级结构:

- 重碎块沿束流方向的速度相对于较轻碎块的速度更大;
- 弹区、靶区的库仑势相对较强,而在中心快度区库仑势相对较弱



J. Colin, D. Cussol, J. Normand, et al, PHYSICAL REVIEW C 67, 064603 2003

- 可以预期,在计算中对称势不同的形式也许会导致LPs角分布的各向异性

采用ImQMD05来探索导致LPs动力学发射各向异性的库仑势与对称势竞争机制问题