# 从核形变到团簇结构：高能核碰撞中的核结构研究

## 核结构文献综述

刘骥安

2026/10/08

# 研究动机：从核几何到末态流

## 原子核具有怎样的空间结构？

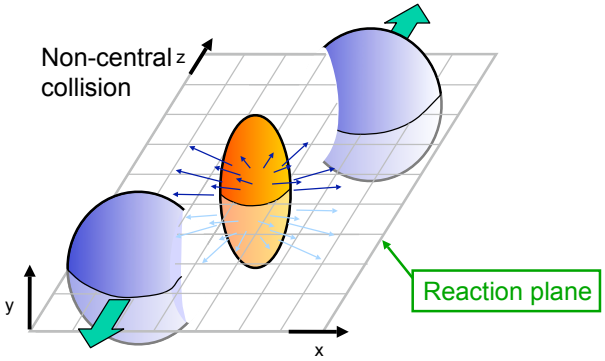
- 原子核不一定是球形，还可能具有整体形变和 $\alpha$ 团簇关联
- Woods–Saxon 密度分布、ab initio 计算等提供结构描述
- 低能实验通过能谱、跃迁和散射等约束这些结构。

## 为什么把核结构与高能核碰撞联系起来？

- 两核穿越时间远短于核内部运动时间：$\tau_{\mathrm{coll}} \ll \tau_{\mathrm{nuc}}$，每次碰撞近似采样一组瞬时核子构型和取向。
- 初态几何造成不同方向的压强梯度，集体膨胀将空间各向异性转化为动量各向异性。

核形变与核子关联 $\rightarrow$ 初态空间各向异性 $\varepsilon_n$ $\rightarrow$ 末态各向异性流 $v_n$

$$v_n \approx \kappa_n \varepsilon_n$$




非中心碰撞的横向几何与反应平面。E. Iancu, QCD in heavy ion collisions (2012), Fig. 23。

## 能否利用测得的流与粒子关联，反过来约束原子核的空间结构？

$\varepsilon_n$ 表征初态横向几何，$v_n$ 表征末态方位角分布，$\kappa_n$ 为介质响应系数。Jia, PRC 105, 014905 (2022)；STAR, Nature 635, 67 (2024)。

# 目录

1 核结构与末态观测量

2 重核形变：U 与 Xe

3 轻核结构：Ne

4 $\alpha$ 团簇的判别

5 附录与参考文献

# 核结构初态与演化

- **核结构输入**：核密度、形变与核子关联
- **碰撞初态**：重叠区的空间各向异性 $\varepsilon_n$ 和横向尺寸 $A_\perp$
  - 碰撞瞬时采样核子构型和取向
- **集体演化**：压强梯度把几何差异转化为粒子运动

**从核结构到末态观测量的计算流程**

| | |
|---|---|
| **核结构** | 密度或核子构型<br>WS 参数化 / NLEFT、PGCM 计算 |
| ↓ **初态** | 逐事件抽样、取向与能量沉积<br>例如 TRENTo、IP-Glasma |
| ↓ **演化** | 膨胀、强子化与强子散射<br>例如 MUSIC，或 Trajectum 模拟链 |
| ↓ **分析** | 末态粒子 $\to v_n$、$[p_T]$ 及关联<br>与实验采用相应的选择和定义 |

各程序属于不同环节；表中为举例，不表示这些程序在每篇研究中全部串联。Giacalone et al., PRL 135, 012302 (2025)。

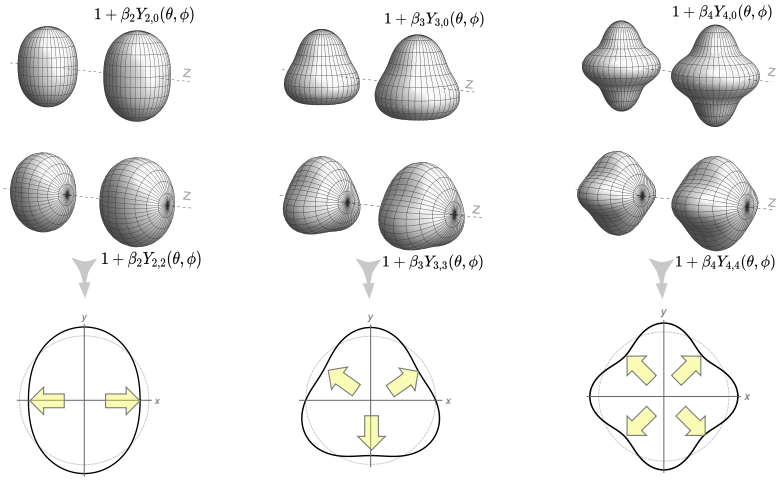
# 核结构描述——Woods-Saxon 密度参数化

## Woods-Saxon：用少量参数描述平均核子数密度

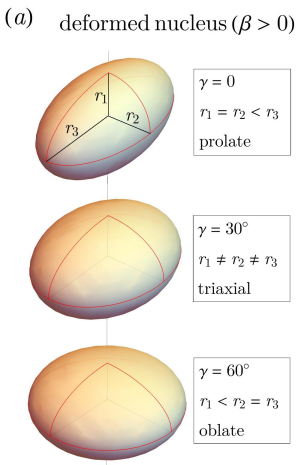
$$\rho(r,\theta,\varphi)=\frac{\rho_0}{1+\exp\left(\frac{r-R(\theta,\varphi)}{a_0}\right)}$$

$$R=R_0[1+\beta_2(\cos\gamma Y_{20}+\sin\gamma Y_{22}^c)+\beta_3 Y_{30}+...]$$

- 核内部密度较高，经过表面后逐渐下降；$R(\theta,\varphi)$ 给出半密度半径
- 形变通过 $R(\theta,\varphi)$ 来体现
  - $\beta_n$ 给出四极、八极等$n$阶形变的大小
  - $\gamma$ 描述三条内禀轴的相对长短；核的空间取向另行抽样
- $R_0$ 控制半径尺度，$a_0$ 控制表面下降的缓急




四极、八极与十六极形变产生不同的横向几何。箭头表示较强的压强梯度方向。Jia, PRC 105, 014905 (2022), Fig. 1。




$\beta_2>0$ 时，$\gamma=0°$、$30°$、$60°$ 的典型形状。Bally et al., PRL 128, 082301 (2022), Fig. 2(a)。

# 核结构计算——NLEFT 与 PGCM

## ab initio：从核相互作用求解多体态

$$\hat{H}\Psi = E\Psi \rightarrow \text{密度、形变与核子关联}$$

## NLEFT(Nuclear Lattice Effective Field Theory)

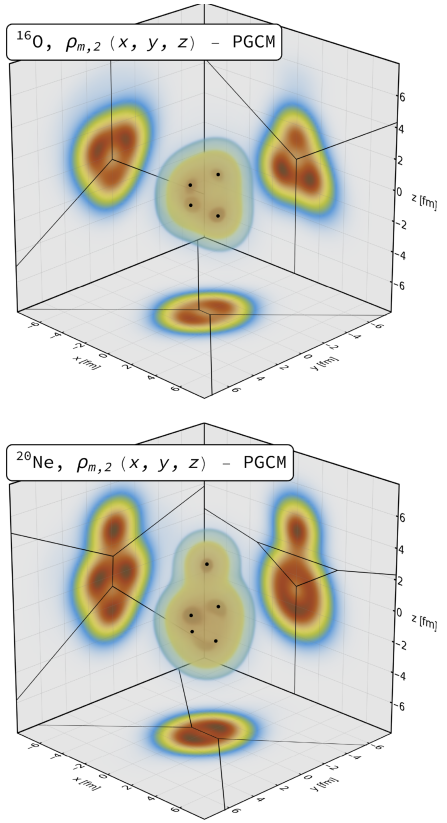
- 核格点有效场论，在格点上计算核多体态
- EFT 相互作用结合 Monte Carlo
- 该 O、Ne 研究通过 pinhole 算法采样**关联核子构型**

## PGCM(Projected Generator Coordinate Method)

- 对一系列形变求平均场参考态，例如用 HFB（Hartree–Fock–Bogoliubov）同时处理平均场与 pairing 相互作用
- 投影恢复量子数，投影并叠加不同形变的参考态
- 该 O、Ne 研究提取**代表性密度**，指定核子抽样

**核结构计算提供起点，WS 也可以拟合这些计算给出的密度**

PGCM 是否属于 ab initio 取决于具体实现：Bally 的 Xe 研究采用 EDF；右图的 O、Ne 研究采用 ab initio PGCM。




Giacalone et al., PRL 135, 012302 (2025), Fig. 1。PGCM 所确定形变下的代表性 HFB 密度：$^{16}$O（上）、$^{20}$Ne（下）；图示为核结构输入。

# 观测量——椭圆流与三角流：几何的末态信号

## 看粒子往哪些方向发射

$$\frac{dN}{d\varphi_p} = \frac{N}{2\pi}\left[1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos\big(n(\varphi_p - \Psi_n)\big)\right]$$

$\varphi_p$：动量方位角；$v_n$：第 $n$ 阶幅度；$\Psi_n$：该谐波的方向。

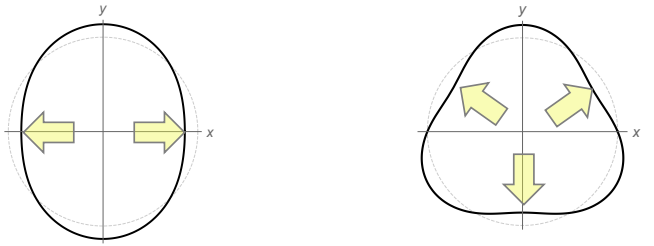
- **椭圆流** $v_2$、**三角流** $v_3$ 分别描述二阶、三阶动量各向异性

## 实验通过多粒子关联测量流

$$v_n\{2\}^2 \approx \langle v_n^2 \rangle$$

- $v_n\{m\}$ 由 $m$ 粒子累积量定义，包含流分布中不同阶矩的组合

例如 $v_n\{4\}^4 = 2\langle v_n^2\rangle^2 - \langle v_n^4\rangle$。矩关系要求流主导、忽略非流并匹配事件权重；$\langle\cdot\rangle$ 表示事件平均。Bilandžić et al., PRC 83, 044913 (2011)。




Jia, PRC 105, 014905 (2022), Fig. 1 下排局部。初态椭圆／三角几何；箭头表示较强的压强梯度方向。

$$v_n \approx \kappa_n \varepsilon_n, \quad n = 2, 3$$

- $\varepsilon_n$：初态几何；$\kappa_n$：介质响应

**① 流把初态空间各向异性，联系到末态动量分布。**

核形变 $\beta_n$、初态 $\varepsilon_n$、末态 $v_n$ 属于三个层次；右图不是末态粒子的方位角分布。

# 观测量 ②——平均横动量及其涨落：横向尺寸信息

## 定义单事件均值与事件间偏离

$$[p_T]_e = \frac{1}{M_e}\sum_{i=1}^{M_e} p_{T,i}$$

$$\delta[p_T]_e = [p_T]_e - \langle [p_T] \rangle$$

$M_e$：该事件粒子数；方括号是粒子平均，尖括号是事件平均

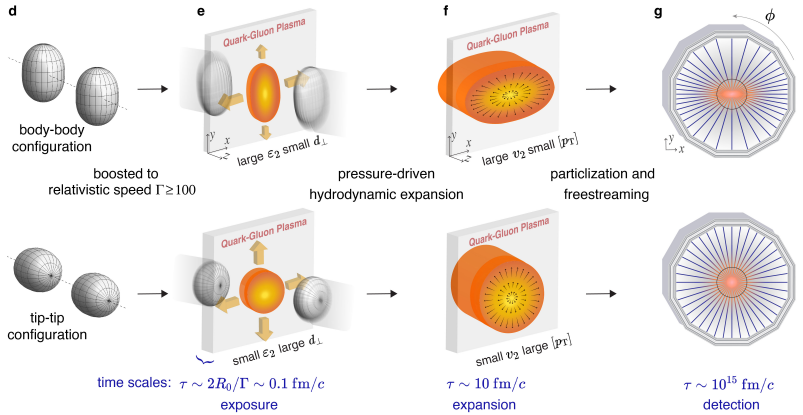
## 实验中提取动力学涨落

$$C_{p_T} \equiv \left\langle (\delta[p_T])^2 \right\rangle_{\mathrm{dyn}}$$

- 使用不同粒子的协方差排除自项，去除有限粒子数的独立抽样贡献

**② 平均横动量及其涨落，补充初态紧致程度的信息。**

$C_{p_T}$ 不是样本均值的原始方差；真实关联和中心度混合仍需处理。Bożek, PRC 93, 044908 (2016)。




STAR, Nature 635, 67 (2024), Fig. 1(d–g)。同类中心事件中，上排较展开、$[p_T]$ 较低；下排更紧致、$[p_T]$ 较高。机制示意。

## 相近熵或多重数下，越紧致通常膨胀越强

$$A_\perp = 2\pi\sqrt{\langle x^2\rangle_\perp \langle y^2\rangle_\perp}, \quad d_\perp \propto \frac{1}{A_\perp}$$

$$\delta[p_T] \propto \delta d_\perp, \quad \delta d_\perp = d_\perp - \langle d_\perp \rangle$$

空间矩在密度中心与主轴系中定义。这里沿用 STAR 的逆面积 $d_\perp$；平均横动量与它的联系是相近熵或多重数下的模型近似。面积约定见 Schenke et al., PRC 102, 034905 (2020)。

# 观测量 ③——流与横动量的关联：形状和尺寸的联系

**流更大的事件，平均横动量也更高吗？** 相关对象是 $v_n^2$ 与 $[p_T]$，常用动力学 Pearson 估计量：

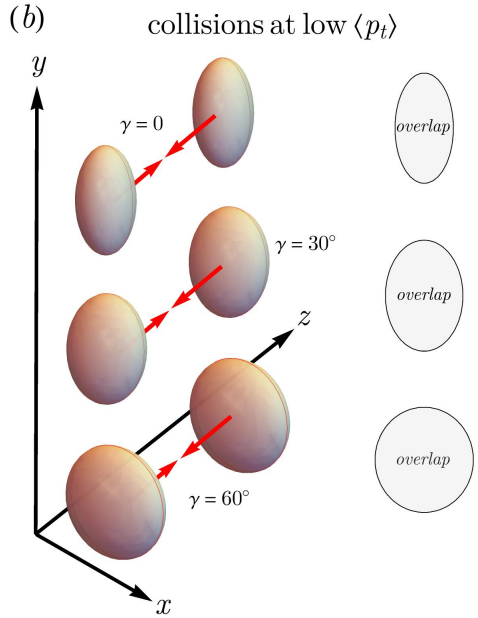
$$\rho_n = \frac{\left\langle v_n^2 \delta[p_T] \right\rangle_{\mathrm{dyn}}}{\sqrt{\mathrm{Var}_{\mathrm{dyn}}(v_n^2)}\sqrt{C_{p_T}}}$$

分子：混合协方差；分母：两者的动力学标准差之积

- $\rho_n > 0$：较大的流平方通常伴随较高的平均 $p_T$；$\rho_n < 0$ 则相反
- 取向同时改变重叠区的形状和尺寸，二者的联系还随 $\gamma$ 改变

**③ 联合关联帮助区分“同样变形，但形状不同”的核。**

分母须有定义；实验用不同粒子的关联构造各项。STAR 部分图采用另一归一化，随后单独说明。Bożek, PRC 93, 044908 (2016)。




Bally et al., PRL 128, 082301 (2022), Fig. 2(b)。同为低 $[p_T]$ 的大面积取向，椭圆度随 $\gamma$ 改变。图内 $\langle p_t \rangle$ 对应本报告的单事件 $[p_T]$。

# 三类观测量怎样约束核形变?

| 类别 | 核心统计量 | 提供什么信息? |
| --- | --- | --- |
| ① 流 | $\langle v_2^2 \rangle$ | 各向异性强度，对 $\beta_2$ 敏感 |
| ② 横动量涨落 | $C_{p_T}$ | 紧致程度的变化，补充形变约束 |
| ③ 混合关联 | $\langle v_2^2 \delta[p_T] \rangle$，或归一化后的 $\rho_2$ | 形状—尺寸联系，对 $\gamma$ 敏感 |

**在给定模型与中心度下**

$$\langle v_2^2 \rangle \approx a_1 + b_1 \beta_2^2$$

$$C_{p_T} \approx a_2 + b_2 \beta_2^2$$

$$\langle v_2^2 \delta[p_T] \rangle \approx a_3 - b_3 \beta_2^3 \cos(3\gamma)$$

- 前两类量主要约束**形变幅度**，第三类量增加对**三轴性**的敏感性
- 比较 U／Au、Xe／Pb 等体系，可减小部分共同演化效应

$a_i$ 为背景项，$b_i$ 为形变响应系数，均依赖模型与事件选择，与 Woods–Saxon 的 $a_0$ 无关。STAR, Nature 635, 67–72 (2024)。

# 目录

1 核结构与末态观测量

2 重核形变：U 与 Xe

3 轻核结构：Ne

4 $\alpha$ 团簇的判别

5 附录与参考文献

# 重核形变 —— $^{238}$U 核取向与初态几何

**重核：**形变描述核的内禀平均密度偏离球对称

## U/Au 体系

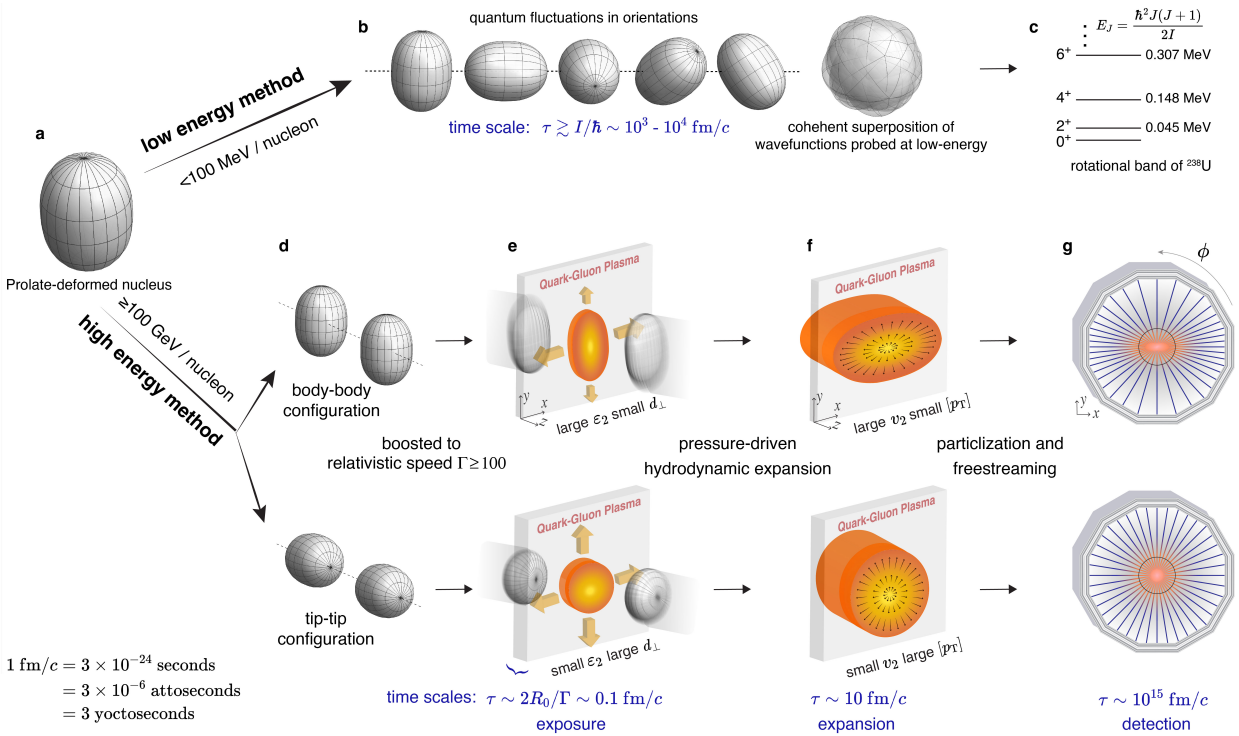
- U 为强长轴(prolate)，Au 形变较弱、偏扁球(oblate)
- 两者能量接近，可减小部分共同演化影响；Au 并非无形变基准。

$^{238}$U 接近长椭球。在相近熵或多重数的中心事件中，取向改变横向几何。

- **tip-tip**：长轴沿束流，横向更紧致，$\varepsilon_2$ 小，平均 $p_T$ 大。
- **body-body**：长轴横置，横向更椭圆，$\varepsilon_2$ 大，平均 $p_T$ 小。

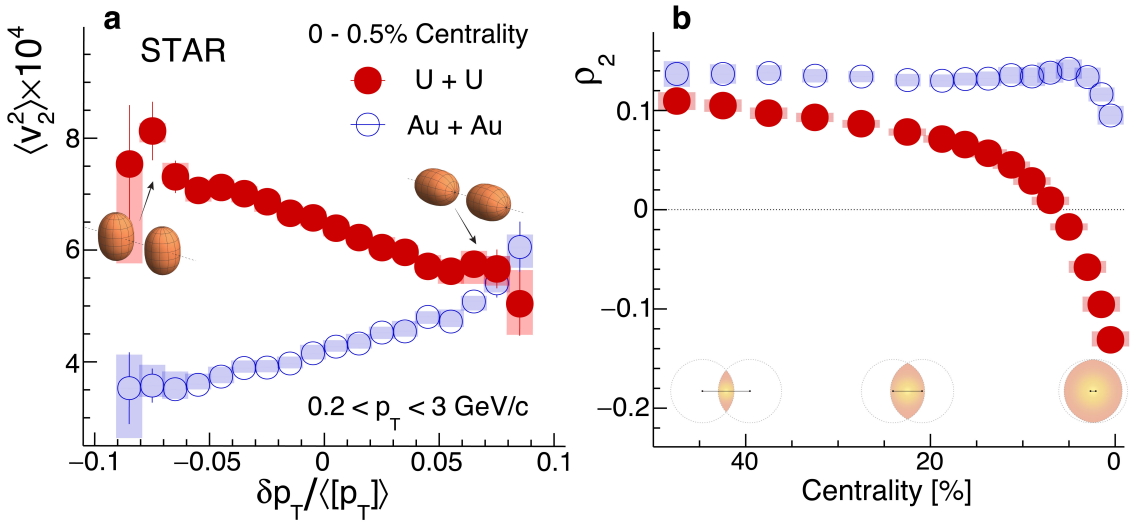
**核形变留下两种相互关联的信号：椭圆流与平均横动量。**

STAR：U+U 193 GeV，Au+Au 200 GeV。




STAR, Nature 635, 67 (2024), Fig. 1。下方两行：取向 → 初态几何 → 集体膨胀。

# RHIC/STAR UU/AuAu —— 流与横动量关联




STAR Nature (2024), Fig. 2。左：0–0.5% 内按平均 $p_T$ 分组；右：相关系数随中心度的变化。

- 与 Au 相比，U 的形变更明显，取向效应更显著
- 左图中，U+U 的平均 $p_T$ 越高，$\langle v_2^2 \rangle$ 越低；Au+Au 呈相反趋势
- 右图越靠右，碰撞越中心；U+U 的相关性由正变负

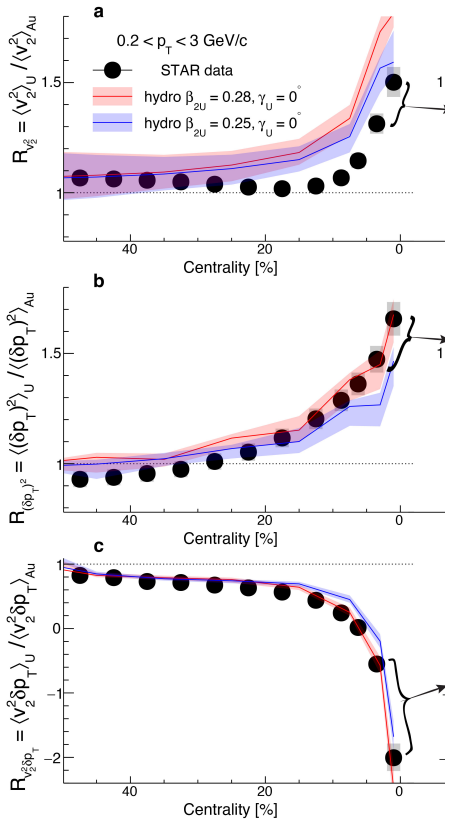
**这正是长椭球随机取向所预期的形状—尺寸反相关。**

统计相关反映大量事件的核结构信息，不能逐事件确定核形状。STAR 使用的归一化为：

$$\rho_2^{\mathrm{STAR}} = \frac{\langle v_2^2 \delta p_T \rangle}{\langle v_2^2 \rangle \sqrt{\langle (\delta p_T)^2 \rangle}}$$

$\delta p_T = [p_T] - \langle [p_T] \rangle$；实验用互异粒子关联去除自关联。此归一化与 Pearson 系数不同。

# RHIC/STAR UU/AuAu —— 三类观测量的体系比值




STAR Nature (2024), Fig. 3a–c。横轴向右进入更中心的碰撞；纵轴为同中心度 U+U / Au+Au 比值。

$$R_O = \frac{\langle O \rangle_{\mathrm{U}}}{\langle O \rangle_{\mathrm{Au}}}$$

$O = v_2^2, (\delta p_T)^2, v_2^2 \delta p_T$：流的均方、平均动量的动力学方差、流平方平均动量的协方差

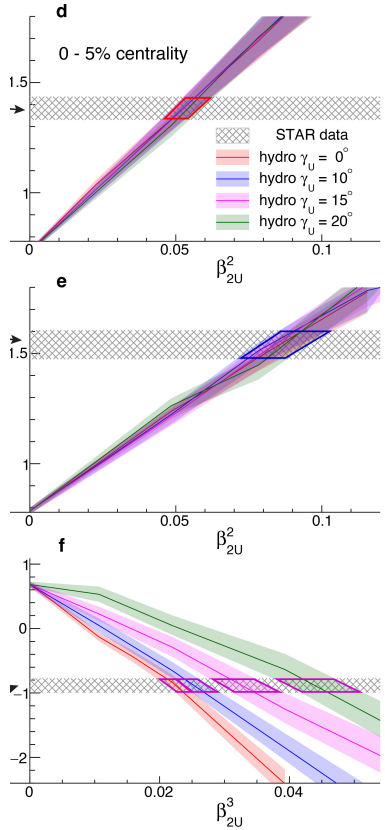
$$\langle v_2^2 \rangle \approx a_1 + b_1 \beta_2^2$$
$$\left\langle (\delta p_T)^2 \right\rangle \approx a_2 + b_2 \beta_2^2$$
$$\langle v_2^2 \delta p_T \rangle \approx a_3 - b_3 \beta_2^3 \cos(3\gamma)$$

- 前两项随 $\beta_2$ 增大而增强，反映**形变的大小**
- 第三项还含有 $\cos(3\gamma)$，能够进一步区分**形状的类型**

**流的矩、动量涨落与协方差，提供互补的形变约束。**

比值减小共同介质响应的影响；质量数与中心度涨落等差异仍由模型处理。上述关系为领先阶近似。

# RHIC/STAR UU/AuAu —— 形变参数约束




STAR Nature (2024), Fig. 3d–f。模型曲线与数据带的交点给出形变约束。

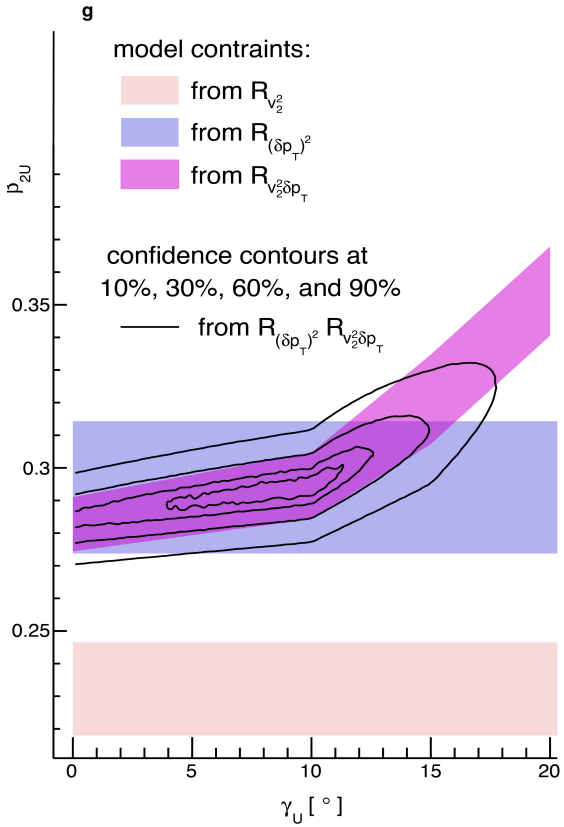



Fig. 3g。横轴 $\gamma$，纵轴 $\beta_2$；蓝色与紫色约束在小 $\gamma$ 区域相交。

**0–5% 中心碰撞：**

IP-Glasma + MUSIC；联合 $R_{(\delta p_T)^2}$ 与 $R_{v_2^2\delta p_T}$

$$\beta_{2\mathrm{U}} = 0.297 \pm 0.015$$

$$\gamma_{\mathrm{U}} = 8.5^\circ \pm 4.8^\circ$$

结合另一流体框架 Trajectum：

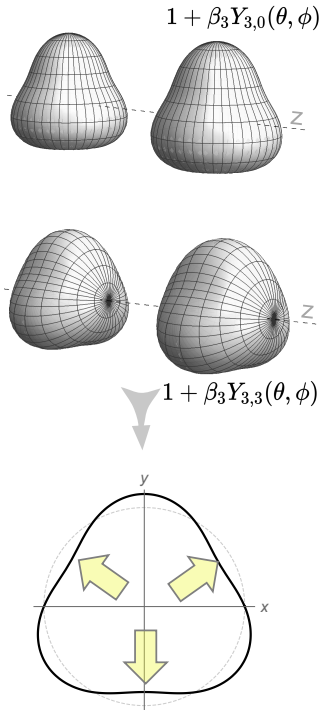
$$\beta_{2\mathrm{U}} = 0.286 \pm 0.025$$

$$\gamma_{\mathrm{U}} = 8.7^\circ \pm 4.5^\circ$$

**$\beta_2$ 明显非零，$\gamma$ 接近长椭球对应的 $0^\circ$。**

$0.2 < p_T < 3$ GeV/$c$；$R_{v_2^2}$ 仅作下限，未进入联合轮廓。

# RHIC/STAR UU/AuAu —— 进一步看三角流




Jia, PRC 105, 014905 (2022), Fig. 1 中列。八极形变及其横向投影示意。

- 四极形变主要影响椭圆流；八极形变 $\beta_3$ 还可为初态带来三角度
- 图中不同八极分量具有不同空间形状，都能在合适取向下产生三重方位结构

$$\langle v_3^2 \rangle \approx a + b\beta_3^2$$

$$\langle v_3^2 \delta p_T \rangle \approx c - d\beta_2\beta_3^2$$

**三角流的强度及其与平均 $p_T$ 的相关性，提供八极形变的互补信息。**

# RHIC/STAR UU/AuAu —— 三角流及其横动量关联

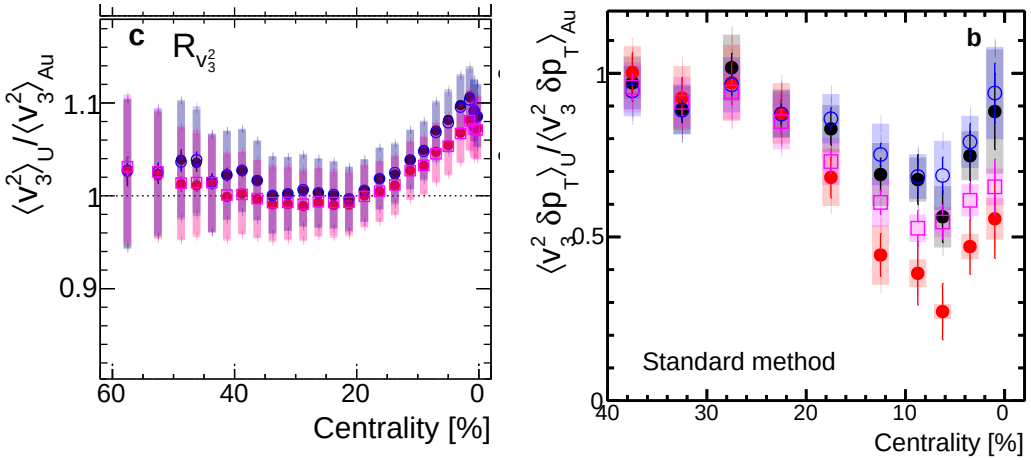


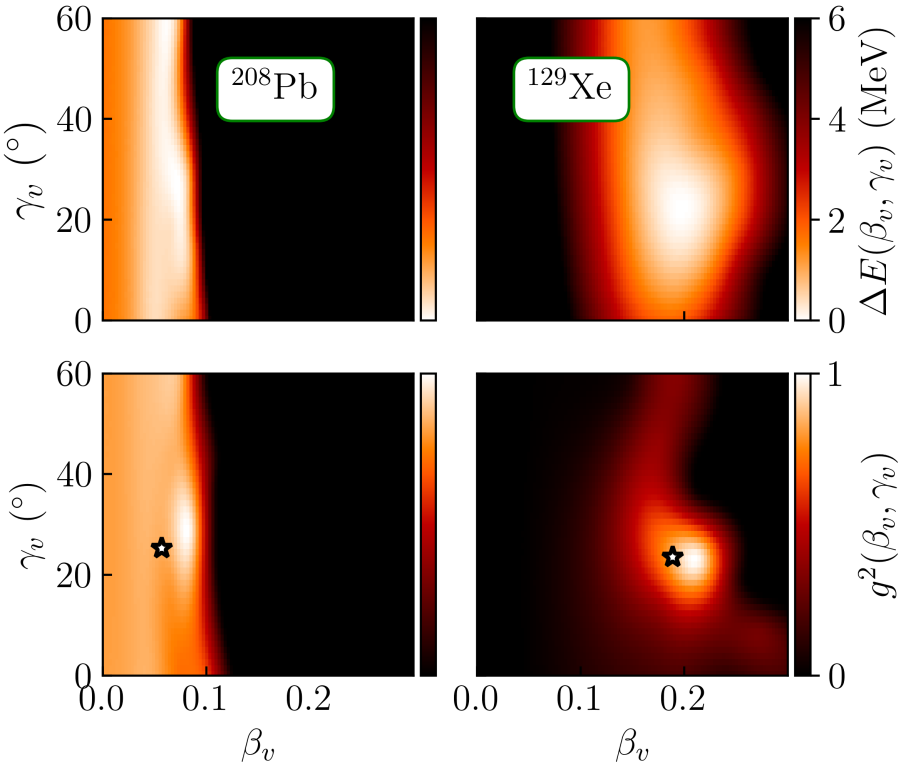

Fig. 13c：$\langle v_3^2\rangle$ 比值；同图共用横轴置于下方。　　Fig. 15b：$\langle v_3^2 \delta p_T\rangle$ 比值。
STAR, Rep. Prog. Phys. 88, 108601 (2025)。两图纵轴均为 U+U / Au+Au，横轴越向右越中心；不同颜色对应四个 $p_T$ 区间。

$$\langle v_3^2\rangle \approx a + b\beta_3^2, \quad \langle v_3^2 \delta p_T\rangle \approx c - d\beta_2\beta_3^2$$

- 中心碰撞中，三角流平方比值略高于 1，三角流—动量协方差比值则低于 1
- 论文援引的流体计算表明，约 7% 的三角流均方增强与 $\beta_{3\mathrm{U}} \sim 0.08$–$0.10$ 相容
- 不同 $p_T$ 区间得到相近比值，支持共同末态效应被部分抵消

**信号有超出四极形变的贡献，可能与八极形变相关。**

# 重核形变 —— $^{129}$Xe 是轴对称还是三轴形状？




Bally et al., PRL 128, 082301 (2022), Fig. 3。横轴形变大小 $\beta_v$，纵轴三轴角 $\gamma_v$。

**Xe/Pb 体系**

- PGCM 预期 Xe 有明显三轴形变(triaxial)，Pb 形变很弱
- 以 Pb 为参照检验 Xe 的额外形变；两者尺寸不同，流的差别仍需结合演化解释

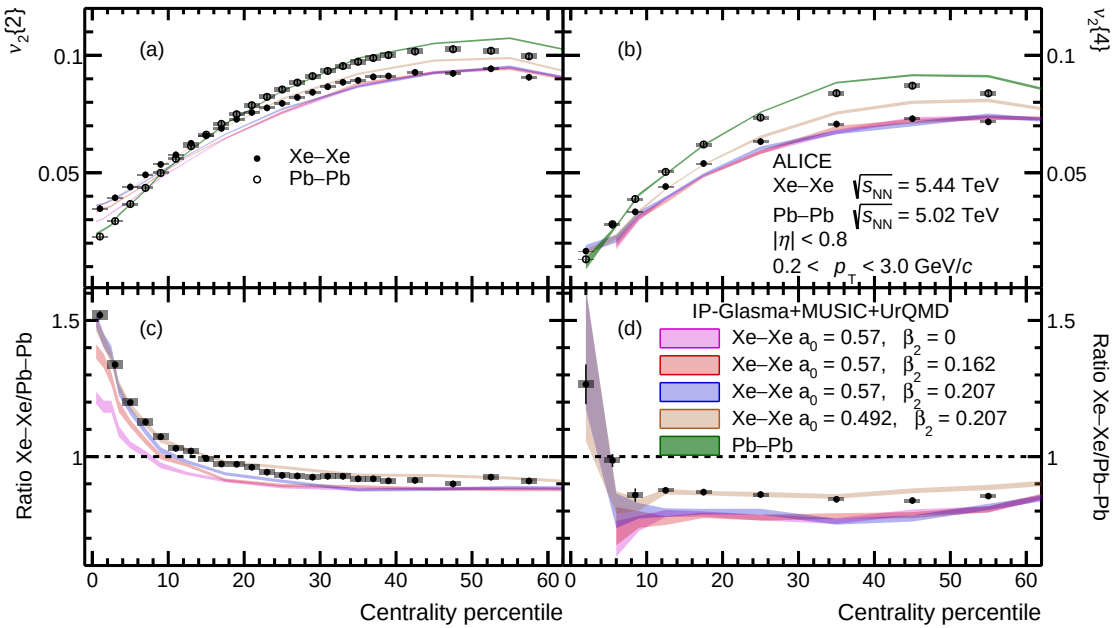
低能结构计算的预期：

- 上排是相对最低点的能量面 $\Delta E$，下排是 PGCM 的集体波函数权重 $g^2$；左 Pb，右 Xe
- Xe 的权重集中在非零 $\beta_v$ 和中间的 $\gamma_v$，预示**三轴形变**
- PGCM 的星号标出平均坐标：$\overline{\beta}_v \approx 0.19$、$\overline{\gamma}_v \approx 23.6°$

**低能计算给出形状预言；Xe–Xe 碰撞通过末态关联检验这一预言。**

$g^2$ 是形变坐标空间的权重，图中最大值缩放为 1；并非核子空间密度。WS 拟合得到 $\beta_2 = 0.207$、$\gamma = 26.93°$，与质量形变坐标定义不同。

# LHC/ALICE XeXe/PbPb —— 椭圆流与体系比值

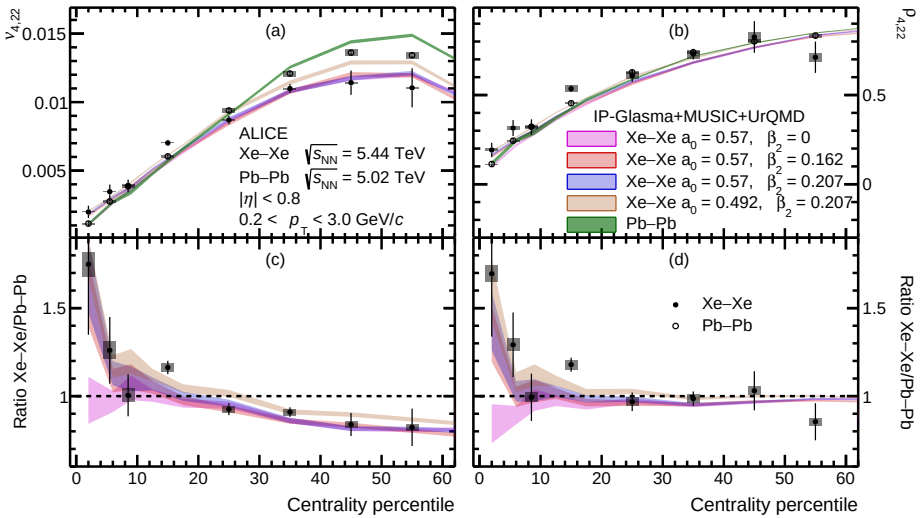



ALICE, PLB 869, 139855 (2025), Fig. 1。上排为 $v_2\{2\}$、$v_2\{4\}$，下排为 Xe/Pb 比值。

- Xe–Xe 5.44 TeV 与 Pb–Pb 5.02 TeV
- 左下角 Xe/Pb 比值明显增大，核形变为中心 Xe–Xe 提供额外的椭圆几何
- 所比较参数组中，$\beta_2 = 0.207$、表面弥散 $a_0 = 0.492$ fm 的整体描述较好

**椭圆流首先约束形变大小，也对核表面弥散敏感。**

# LHC/ALICE XeXe/PbPb —— 非线性四阶流

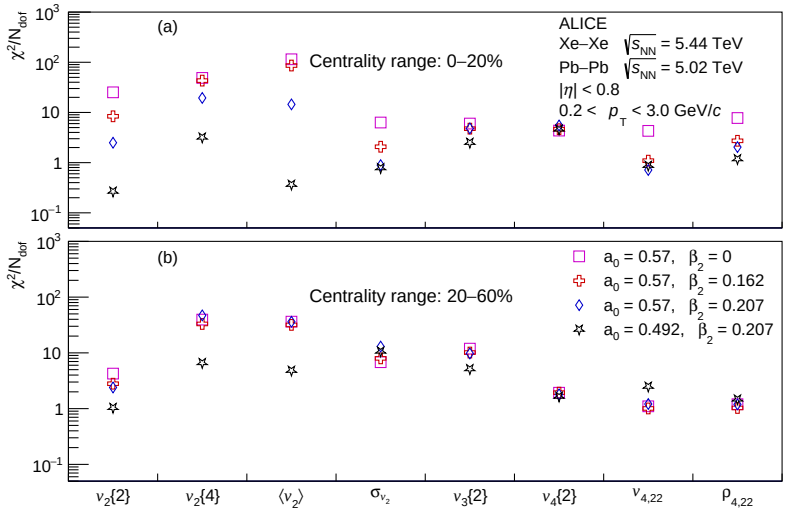



ALICE PLB 869 (2025), Fig. 4：非线性流 $v_{4,22}$ 与对称面相关 $\rho_{4,22}$；下排为 Xe/Pb 比值。

$$V_4 = V_4^{\mathrm{L}} + \chi_{4,22} V_2^2$$

**椭圆几何也会通过非线性响应贡献四阶流，因此形变信息不只出现在 $v_2$ 中。**

$V_n = v_n e^{in\Psi_n}$；$V_4^{\mathrm{L}}$ 为线性分量，$\chi_{4,22}$ 为耦合系数。$\rho_{4,22} = \frac{v_{4,22}}{v_4\{2\}}$ 衡量对称面相关。

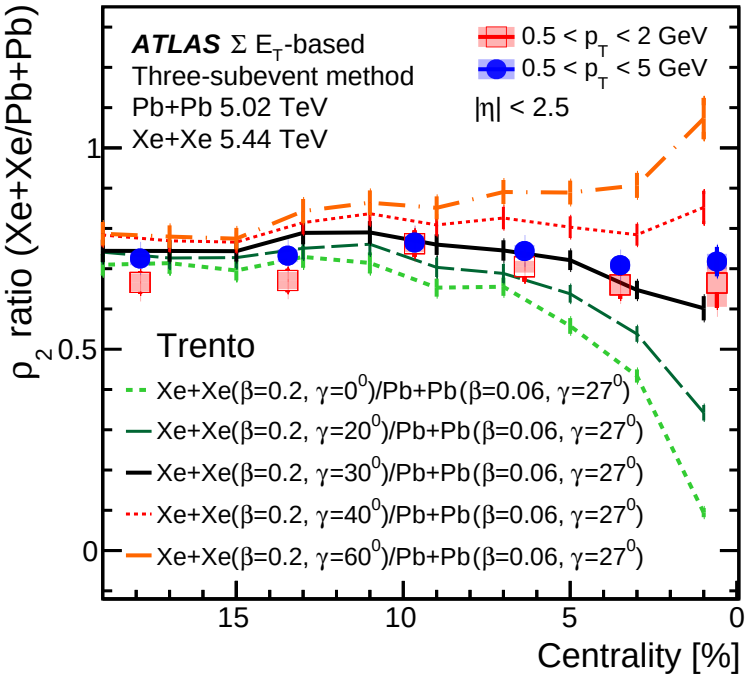



ALICE Fig. 5：Xe/Pb 比值的 $\frac{\chi^2}{N_{\mathrm{dof}}}$。上 0–20%，下 20–60%；纵轴对数刻度，越低偏离越小。

黑色星号对应 $\beta_2 = 0.207$、$a_0 = 0.492$ fm，整体描述较好；$v_{4,22}$ 并不偏好同一组参数。

**多个观测量共同检验同一幅核结构图景。**

# LHC/ATLAS XeXe/PbPb —— 流与横动量关联

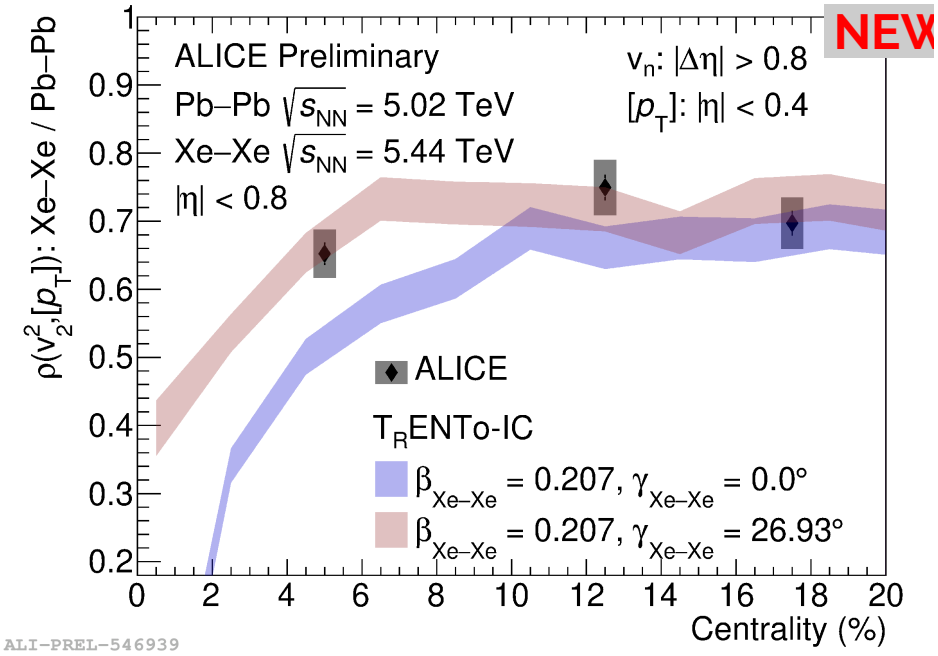



ATLAS, PRC 107, 054910 (2023), Fig. 9。纵轴为 Pearson 系数的 Xe/Pb 比值，最中心碰撞在右侧。

- 固定相近的 $\beta_2 \approx 0.2$，不同 $\gamma$ 给出不同的形状—尺寸相关
- 右侧 0–10% 区间中，初态模型 TRENTo 的不同 $\gamma$ 曲线明显分离
- 数据更接近 $\gamma \approx 30^\circ$ 的曲线，支持 Xe 的三轴形变

**$v_2$ 主要约束形变幅度；$v_2^2$–$p_T$ 相关补充三轴性信息。**

# LHC/ALICE XeXe/PbPb —— 流与横动量关联




ALICE Preliminary，E. G. Nielsen，Quark Matter 2023。纵轴为 $\rho(v_2^2, [p_T])$ 的 Xe/Pb 比值。

- 横轴左端为最中心碰撞；蓝、红色带分别对应 $\gamma = 0$ 和 $26.93°$
- 红色带在最中心的数据区间更接近数据，与 ATLAS 所见趋势一致
- 这是 Preliminary 的流—横动量关联结果，与前面的 ALICE 多粒子流测量提供互补信息

**从 U 到 Xe，流与横动量关联已能区分不同的整体核形状。**

ALICE QM2023 原始海报。模型比较使用 TRENTo 初态；初步结果尚非精确参数提取。

# 目录

1 核结构与末态观测量

2 重核形变：U 与 Xe

3 轻核结构：Ne

4 $\alpha$ 团簇的判别

5 附录与参考文献

# 轻核结构 —— $^{20}$Ne：比较 OO 与 NeNe

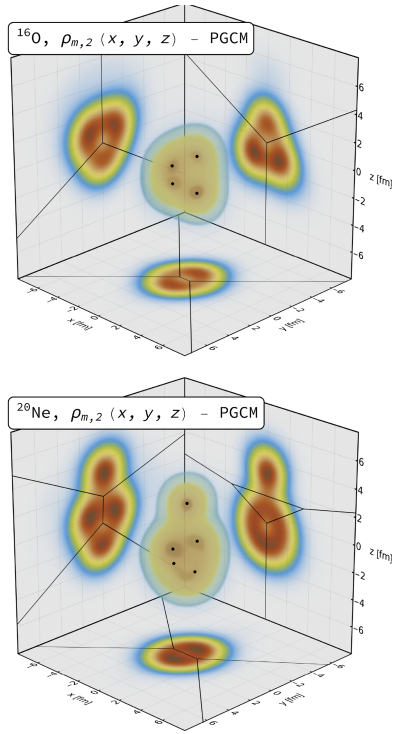
- $^{16}$O 与 $^{20}$Ne 质量数接近，但核内的空间分布不同
- 右图中 O 较紧凑；Ne 呈拉长的 $^{16}\mathrm{O}+\alpha$“保龄球”特征，预期产生更大的椭圆度

| 核结构输入 | 计算 |
| --- | --- |
| **NLEFT** | 给出许多组可能的核子位置，保留核子之间的空间关联。 |
| **PGCM** | 给出核的形状和密度分布，再据此生成碰撞时的核子位置。 |

$$\text{核结构} \rightarrow \text{碰撞演化} \rightarrow v_n, [p_T], \rho_2$$

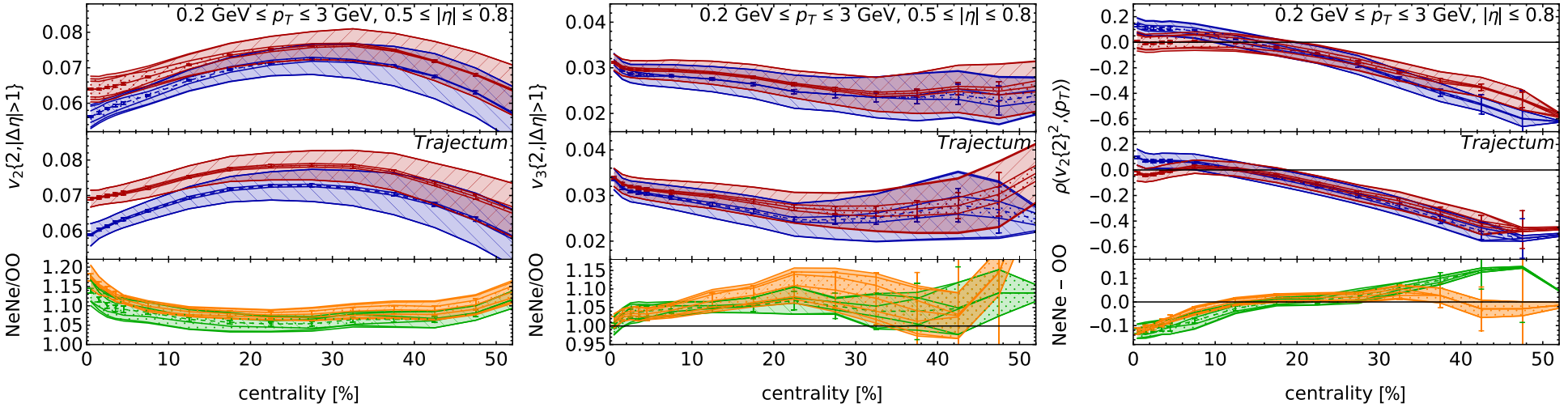
**比较 NeNe / OO 的末态信号，检验两种轻核的几何差异。**

模型曲线还包含碰撞演化；两体系的尺寸与响应也有差别。Giacalone et al. 使用 Trajectum + SMASH。NLEFT / PGCM 是结构输入标签，不是直接测得的流。




Giacalone et al., PRL 135, 012302 (2025), Fig. 1。PGCM 代表性内禀密度；两核在碰撞中随机取向。

# LHC OO/NeNe 理论预言 —— 拉长形变如何影响流？



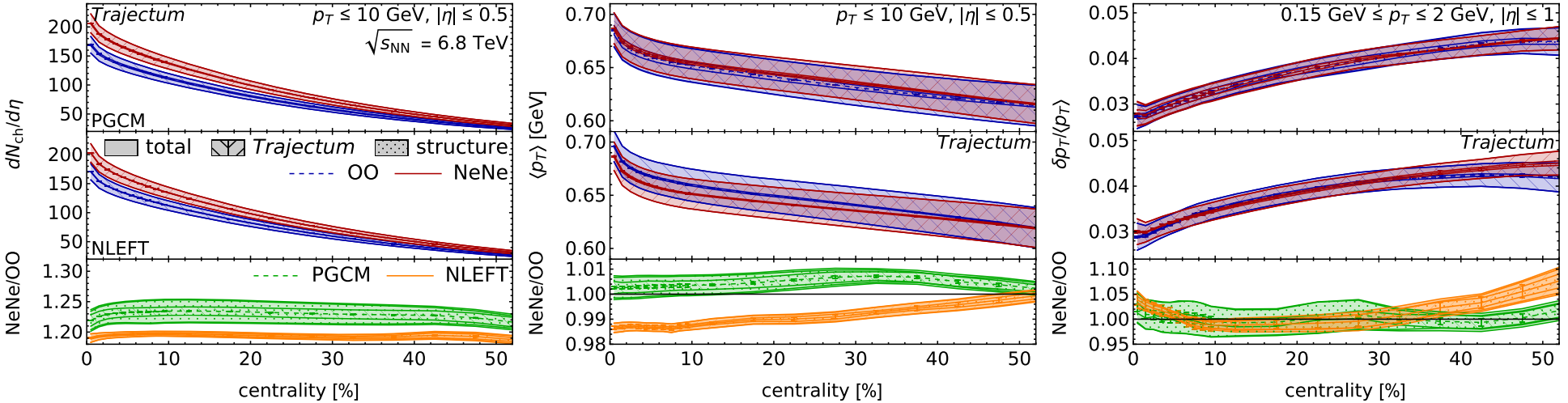

Giacalone et al., PRL 135, 012302 (2025), Fig. 2 下排。6.8 TeV 理论预测；横轴为中心度。

- **左列：**最中心 NeNe 的 $v_2\{2\}$ 高于 OO；0–1% 的增强约为 14%–17%，取决于核结构模型
- **中、右列：**$v_3\{2\}$ 的差别较小；最中心 NeNe 的 $\rho_2$ 更低，形状与尺寸的关联也随体系改变

**Ne 的结构会同时改变流的大小和流与横动量的关联。**

下排左、中的量为 NeNe / OO 比值，右侧为 $\Delta\rho_2 = \rho_{2,\mathrm{NeNe}} - \rho_{2,\mathrm{OO}}$。与 5.36 TeV 数据比较需匹配能量、接受度和中心度。

# LHC OO/NeNe 理论预言 —— 形状之外，还可以比较核的尺寸

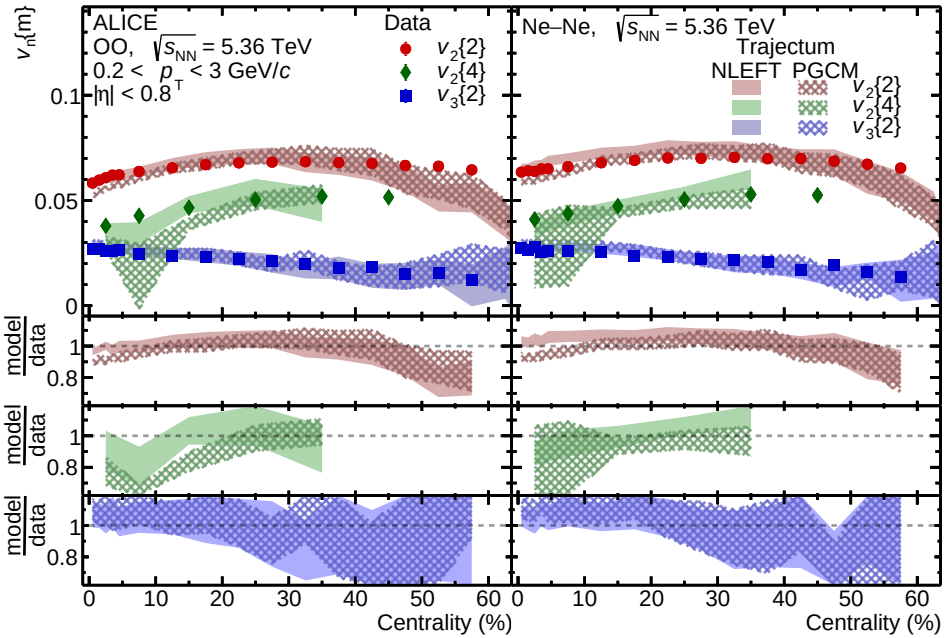



Giacalone et al., PRL 135, 012302 (2025), Fig. 2 上排，理论预测。横轴为中心度，小图为 NeNe / OO。

- **从左到右：**粒子产额、平均 $p_T$ 和相对 $p_T$ 涨落，分别补充熵产生、径向膨胀和尺寸涨落的信息。
- NLEFT 与 PGCM 的核半径比不同，因此对这些量的预测也不同；体系比值能减小部分共同误差。

**$v_n$ 给出各向异性，$\langle p_T \rangle$ 及其涨落补充尺寸信息；联合比较才能更完整地检验核结构。**

# LHC/ALICE NeNe/OO —— 多粒子流

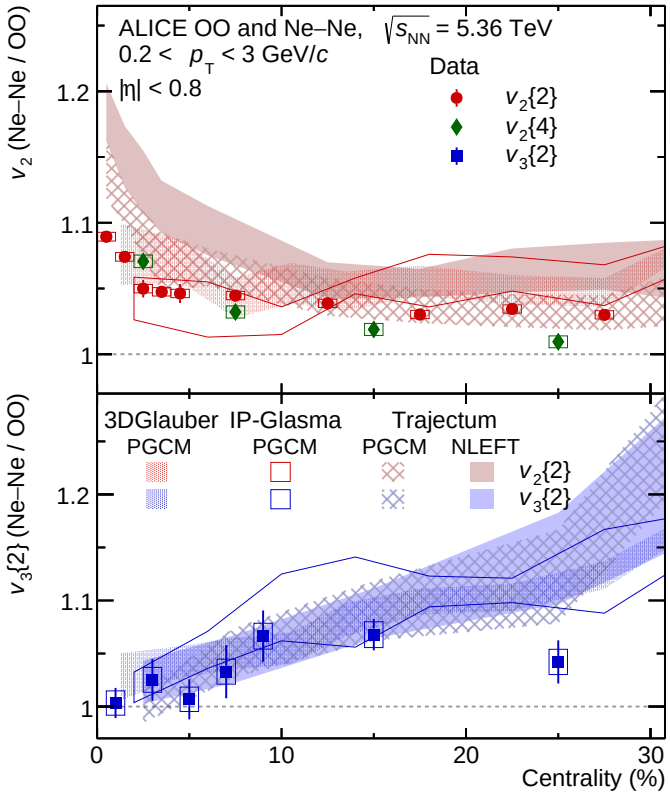



- LHC 2025 OO,NeNe $\sqrt{s_{\mathrm{NN}}} = 5.36$ TeV
  - 两种轻核提供了相同的能量条件
- 两个体系都测得 $v_2$、$v_3$，集体运动也存在于这些较小的碰撞体系中
- 将 NLEFT 核子构型输入 Trajectum，能够总体描述这几种流观测量

**下一步：比较两个体系的流，寻找 O 与 Ne 的结构差异。**

ALICE, PRL 137, 082301 (2026), Fig. 2。

# LHC/ALICE NeNe/OO —— 椭圆流与三角流比值



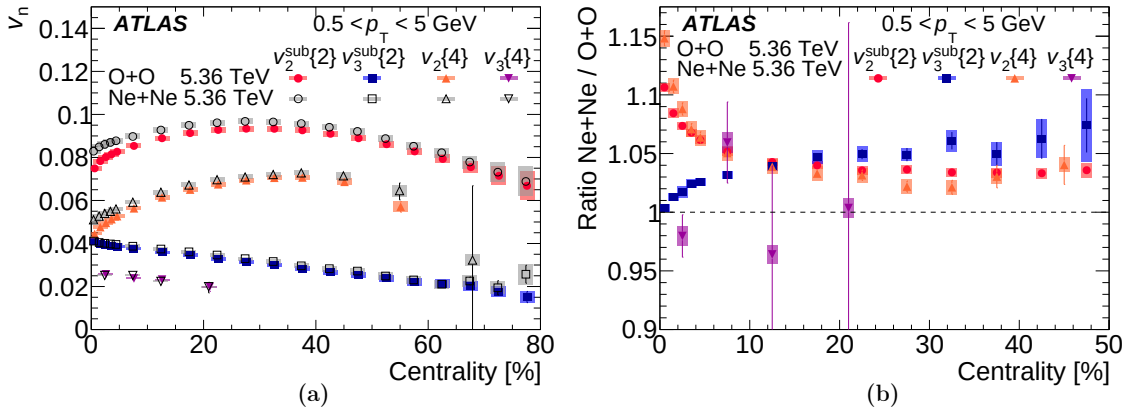

ALICE, PRL 137, 082301 (2026), Fig. 3。

$$R_n = \frac{v_n^{\mathrm{NeNe}}}{v_n^{\mathrm{OO}}}$$

- 最中心碰撞中，$R_2 \approx 1.08$；到约 10% 中心度降至约 1.05
- $R_3$ 从接近 1 开始上升，与 $R_2$ 的趋势不同：两种谐波探测不同的几何特征
- 椭圆流增强支持 Ne 比 O 更强的四极形变；不同模型对增强幅度的预言仍有差别

**轻核的结构差异，已经能从末态流的体系比值中读出。**

# LHC/ATLAS NeNe/OO —— 两粒子与四粒子流




- 中心 NeNe／OO 的增强同时出现在两粒子流和四粒子流中
- 四粒子观测量把整个事件中的多粒子关联纳入比较，进一步检验集体流的几何起源

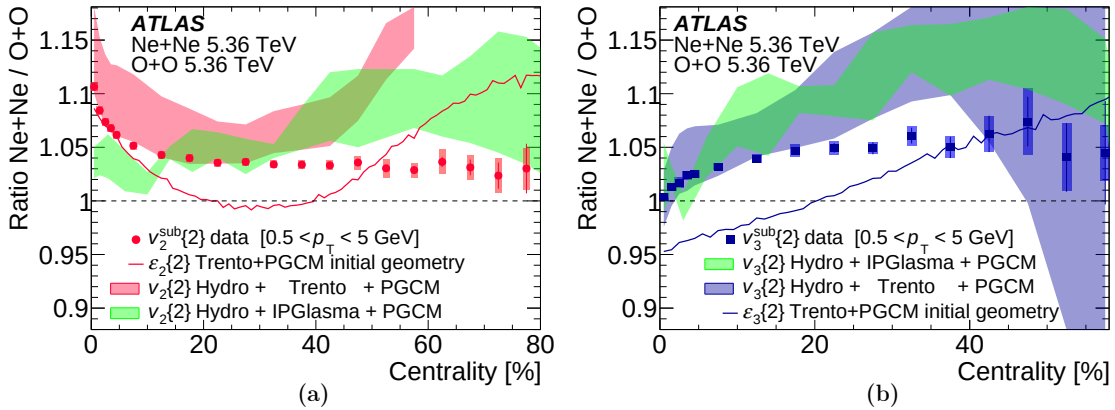
$$c_2\{4\} = \langle v_2^4 \rangle - 2\langle v_2^2 \rangle^2$$

$$v_2\{4\} = (-c_2\{4\})^{\frac{1}{4}}$$

**核形状既影响流的大小，也影响流的逐事件分布。**

ATLAS, PRC 113, 045205 (2026), Fig. 7。

# LHC/ATLAS NeNe/OO —— 流比值与初态几何

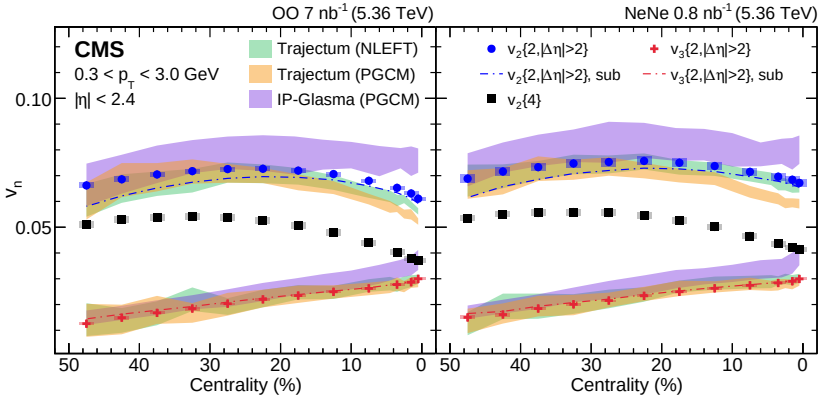



- 图中依次比较初始偏心率 $\varepsilon_n$、流体演化后的 $v_n$ 和实验数据
- 进入最中心区域时，$R_2$ 上升、$R_3$ 下降的组合特征，把 Ne 和 O 的几何差异呈现得更清楚
- 相同 PGCM 核结构输入配合不同初态模型，仍会给出不同的流比值

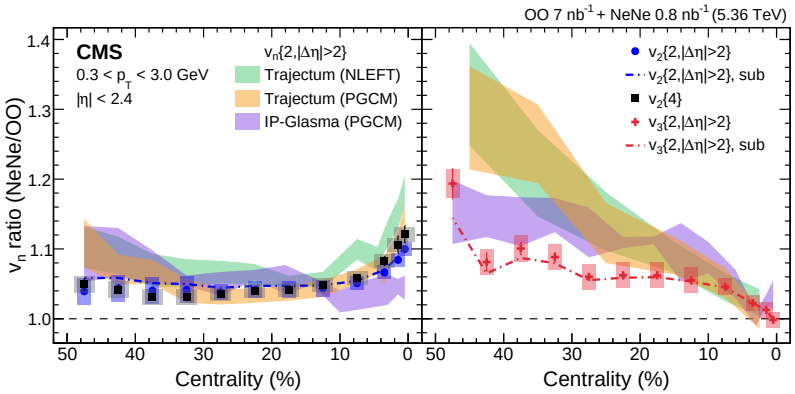
**从核子构型到可测的流，需要用碰撞演化连接起来。**

ATLAS, PRC 113, 045205 (2026), Fig. 9。

# LHC/CMS NeNe/OO —— 流信号与方法对照




CMS, PRL 137, 082302 (2026), Fig. 1。




CMS, PRL 137, 082302 (2026), Fig. 2。

- 越接近中心碰撞，NeNe 相对 OO 的椭圆流增强越明显。
- 改变短程关联的扣除方式，并与四粒子结果比较，可以检查这一趋势是否稳定

**ALICE、ATLAS 和 CMS 在不同接受度与分析方法下得到一致的总体趋势。**

**多个实验共同支持轻核几何对末态流的影响。**

# LHC/LHCb 固定靶 —— 用 Pb 探测轻核的整体形状

## 实现

- SMOG2 提供气体靶，使 Pb 束流与 Ne、Ar 等轻核发生固定靶碰撞；LHCb 在 $2 < \eta_{\mathrm{lab}} < 5$ 测量末态粒子

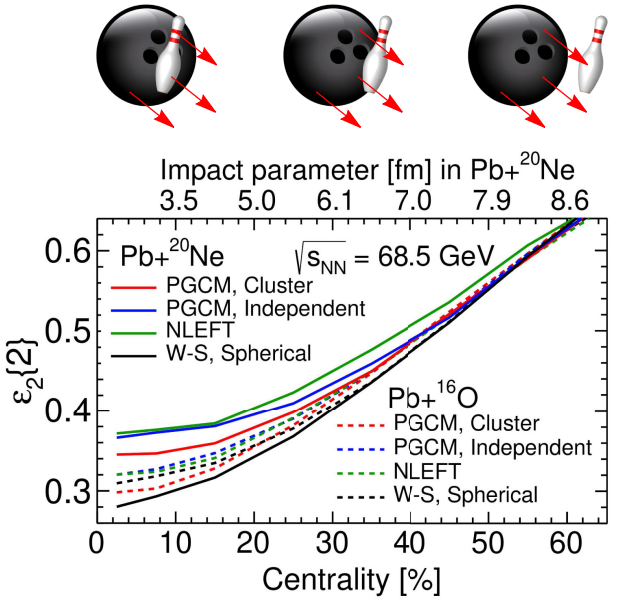
## Pb

- Pb 核较大，可在较宽中心度范围覆盖 Ne 的大部分横向区域，使 Ne 的整体形状更充分地进入初态几何
- 右图预言 PbNe 的 $\varepsilon_2$ 高于 PbO，几何差异不仅出现在最中心事件

## 比较

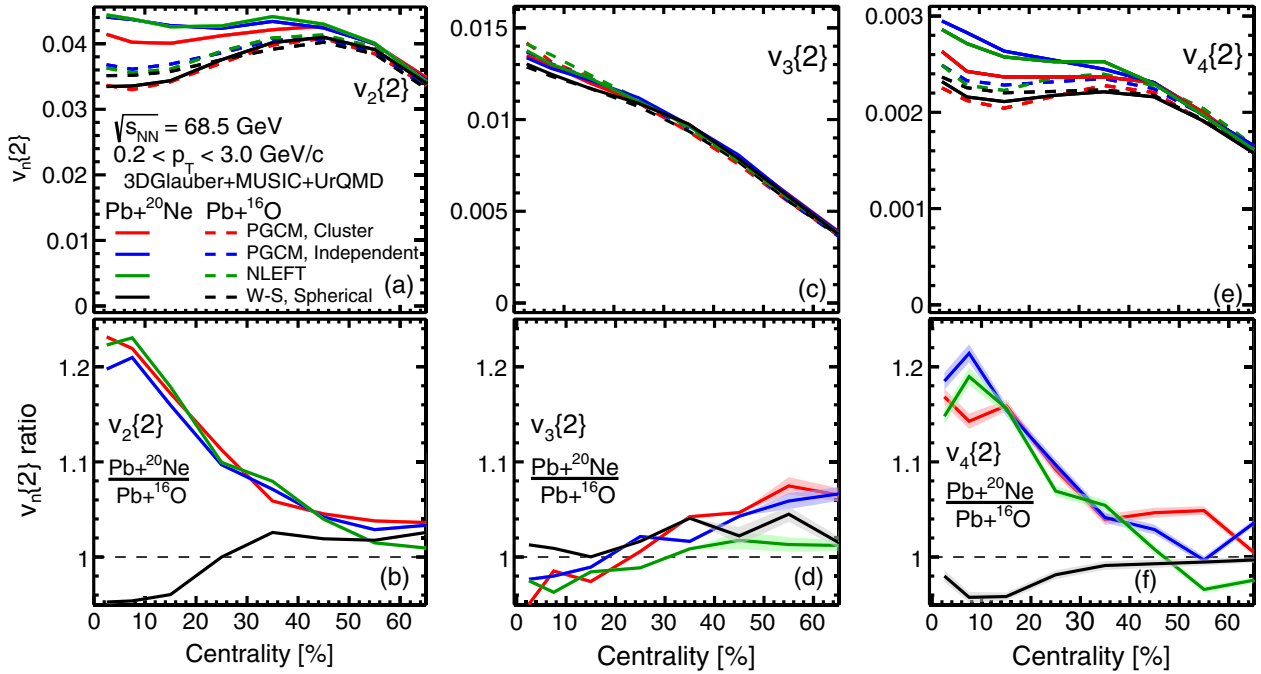
- 理论：PbNe／PbO，68.5 GeV
- 已公开测量：PbNe／PbAr，70.9 GeV

该测量的 2024 运行未能注入 O，故选 Ar 作参照。上述预测针对 LHCb/SMOG2；重核覆盖轻核的几何机制本身具有一般性。




面向 LHCb/SMOG2 的理论预测。Giacalone et al., PRL 134, 082301 (2025), Fig. 2；PbNe／PbO，68.5 GeV。
SMOG2：PRAB 27, 111001 (2024)；实验：LHCb-CONF-2025-001。图中的 PbO 不是本次实验的 PbAr 参照。

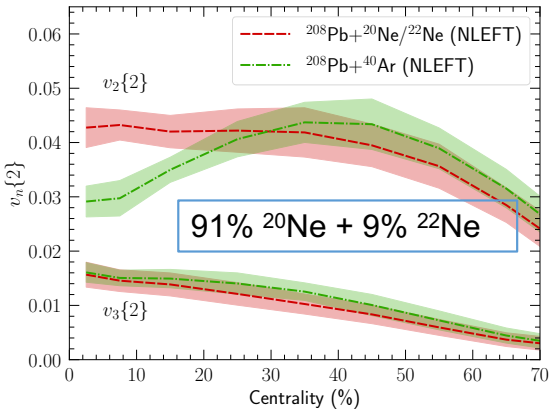
# LHC/LHCb PbNe/PbO 理论预言 —— 增强椭圆流，并影响四阶流

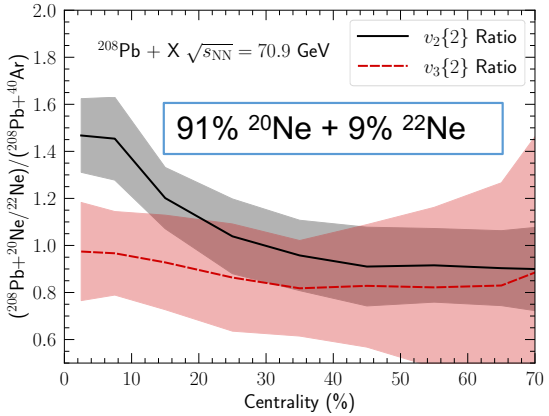



Giacalone et al., PRL 134, 082301 (2025), Fig. 3；PbNe / PbO，68.5 GeV，理论预测。

- 中心 PbNe 的 $v_2$ 相对 PbO 可增强超过 20%，$v_3$ 的体系差异则较小
- 椭圆流还能通过 $V_4 = V_{4,\mathrm{L}} + \chi_{422} V_2^2$ 带动 $v_4$ 增强，形成相互关联的几何信号

# LHC/LHCb PbNe/PbAr 理论预言 —— 椭圆流与三角流

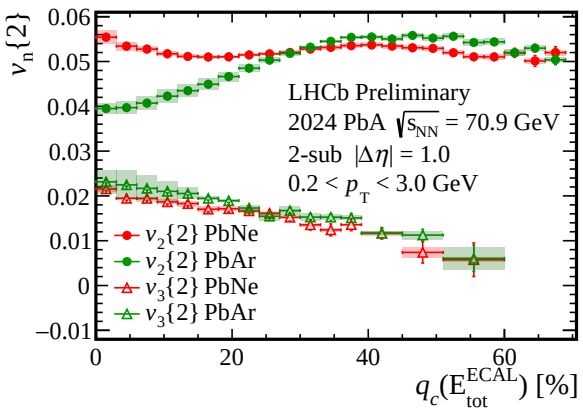


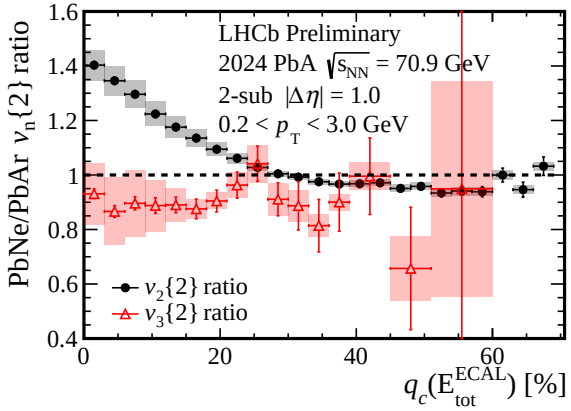




- SMOG2 PbNe/PbAr $\sqrt{s_{\mathrm{NN}}} = 70.9$ GeV
- 天然 Ne 含有约 9% 的 $^{22}\mathrm{Ne}$；纳入同位素组成后，模型仍预言中心 PbNe 的椭圆流增强

W. Zhao, Implications of LHCb measurements (2025), slide 25 上排；会议理论计算，非新增实验测量。

# LHC/LHCb PbNe/PbAr —— 椭圆流与三角流比值




LHCb, LHCb-CONF-2025-001, Fig. 7 上排；已公开实验结果，Preliminary。

**最中心 0–3%：** $R_2^{\mathrm{PbNe/PbAr}} = 1.40 \pm 0.06$。

- 中心碰撞中，PbNe 的 $v_2$ 明显更高；$v_3$ 则低于 PbAr
- 随中心度变化的这组特征，与形变 Ne 对初态几何的影响相符
- 理论与数据呈现相近的中心度趋势，支持固定靶碰撞对 Ne 形状的敏感性

横轴由 ECAL 能量定义中心度：数值越小，对应越中心的事件；数据使用天然 Ne 气体。

**对撞与固定靶结果从不同几何条件出发，共同检验轻核结构。**

# 目录

1 核结构与末态观测量

2 重核形变：U 与 Xe

3 轻核结构：Ne

4 $\alpha$ 团簇的判别

5 附录与参考文献

# $\alpha$ 团簇结构 —— $^{20}$Ne：能否区分不同的 $\alpha$ 排列？

**$\alpha$ 团簇：** $\alpha$ 是含 $2p+2n$ 的 $^4\mathrm{He}$ 核；团簇结构指核内出现 alpha-like 的空间关联。

**O/Ne 体系：** 两者 $N=Z$，可用 $4\alpha$、$5\alpha$ 构型研究；$^{20}\mathrm{Ne}$ 还能比较 $^{16}\mathrm{O}+\alpha$ 与其他排列，检验相似整体形变下的内部关联。

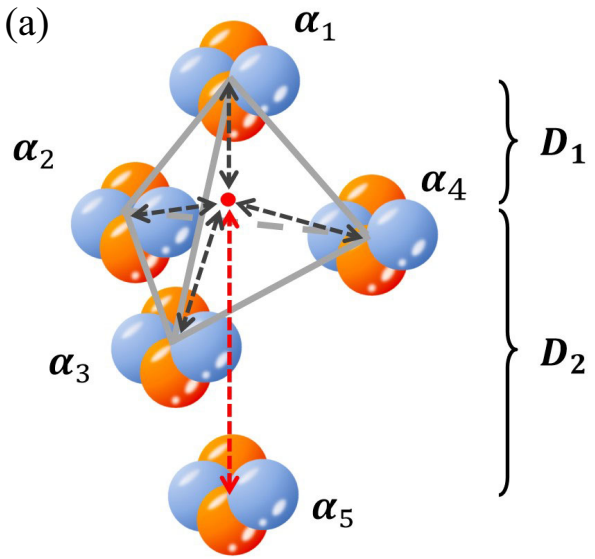
**两种候选构型**

- $\alpha+^{16}\mathrm{O}$：四个 $\alpha$ 聚成紧凑部分，第五个 $\alpha$ 位于外侧，形成不对称的拉长结构
- $5\alpha$：五个 $\alpha$ 更充分地分离，在对称极限组成双锥结构

右图用两个长度调节排列：$D_1$ 控制四个 $\alpha$ 的紧凑程度，$D_2$ 控制第五个 $\alpha$ 的距离。

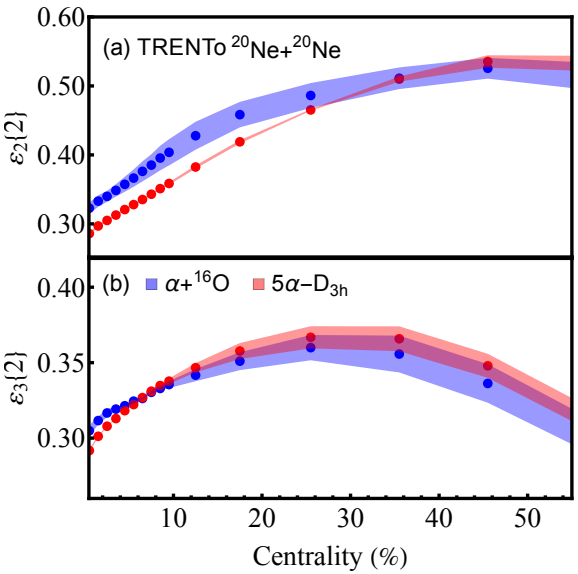
**两种构型都可以产生明显的形变；关键是找到对内部排列更敏感的观测量。**

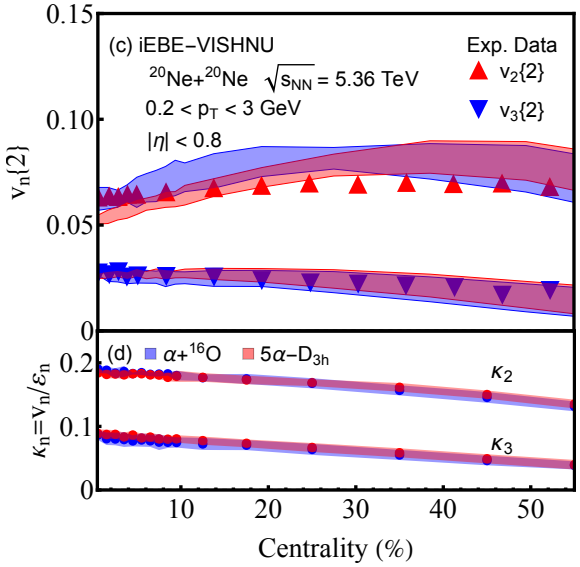
这里比较的是 Brink 模型中的候选构型；真实基态可包含构型混合与非局域团簇运动。




Li, Zhou & Ma, PRL 136, 082302 (2026), Fig. 1(a)。每组四个核子表示一个 alpha 团簇。

# LHC NeNe —— 仅看 $v_2$、$v_3$，还不能选出团簇构型




- **左侧初态：** 蓝色 $\alpha + {}^{16}\mathrm{O}$ 与红色 $5\alpha$ 的偏心率有差别，最中心的 $\varepsilon_2\{2\}$ 相差约 12%
- **右上末态：** 两种构型的 $v_2\{2\}$、$v_3\{2\}$ 误差带重叠，都与图中的数据相容
- **右下响应：** 两构型的 $\kappa_n = \frac{v_n}{\varepsilon_n}$ 接近

**“流有多大”之外，还可以问：不同的流和横动量是否一起变化？**

NeNe，5.36 TeV；$0.2 < p_T < 3$ GeV，$|\eta| < 0.8$。最中心的 $\varepsilon_3\{2\}$ 差别约为 4.4%。

Li, Zhou & Ma, PRL 136, 082302 (2026), Supplemental Material, Fig. 6。三角点为 ALICE 数据。

# LHC NeNe 理论预言 —— 用两种关联，观察团簇排列的影响

## 椭圆流较大的事件，三角流也更大吗？

归一化对称累积量（NSC）

$$\mathrm{NSC}(3,2)=\frac{\langle v_3^2 v_2^2\rangle-\langle v_3^2\rangle\langle v_2^2\rangle}{\langle v_3^2\rangle\langle v_2^2\rangle}$$

- 正值：两种流倾向于同时增大
- 负值：一种增大时，另一种倾向于减小
- 在线性响应近似下，归一化可抵消固定的 $\kappa_2$、$\kappa_3$

事件在同一窄中心度区间内比较。NSC 是归一化协方差，不是 Pearson 系数；其范围为 $\mathrm{NSC}\geq -1$，没有一般的 +1 上界。

## 椭圆流较大的事件，平均横动量更高吗？

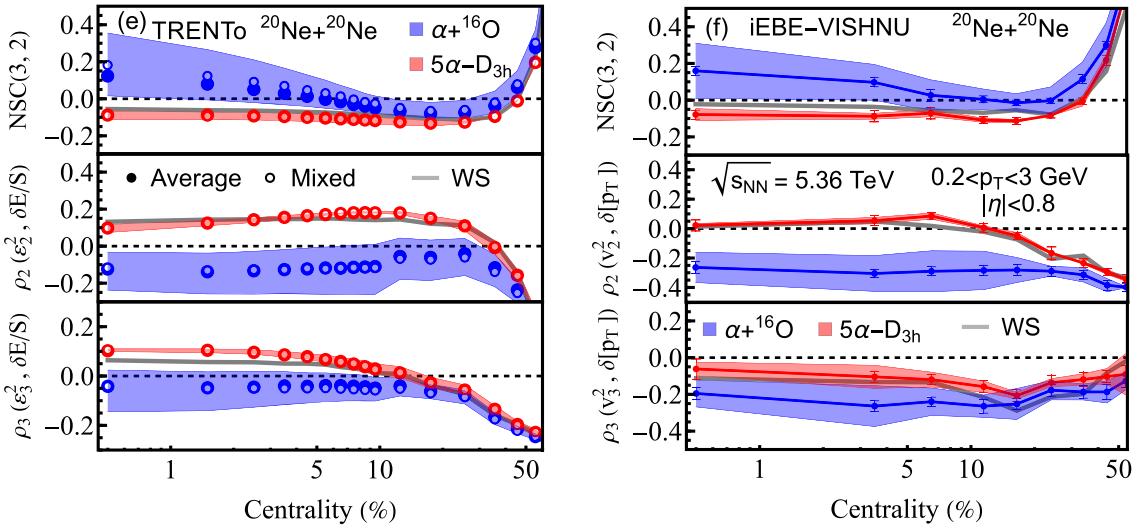
$$\rho_2=\frac{\mathrm{Cov}(v_2^2,[p_T])}{\sqrt{\mathrm{Var}(v_2^2)\ \mathrm{Var}([p_T])}}$$

$$[p_T]=\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}p_{T,i},\quad -1\leq\rho_2\leq 1$$

- 正负号表示两者同向或反向变化
- $[p_T]$ 对径向膨胀敏感，补充横向尺寸信息
- 实验估计需去除自关联和有限粒子数的统计涨落
  ——动力学涨落

Li, Zhou & Ma, PRL 136, 082302 (2026), Supplemental Material, Eqs. (3–5)。这里的方差和协方差指动力学涨落。

# LHC NeNe 理论预言 —— NSC(3,2) 与 $\rho_2$ 给出不同符号




Li, Zhou & Ma, PRL 136, 082302 (2026), Fig. 2(e,f)。左：TRENTo 初态；右：iEBE-VISHNU 末态。NeNe，5.36 TeV；$0.2 < p_T < 3$ GeV，$|\eta| < 0.8$。带宽为系统不确定度，误差棒为统计不确定度。

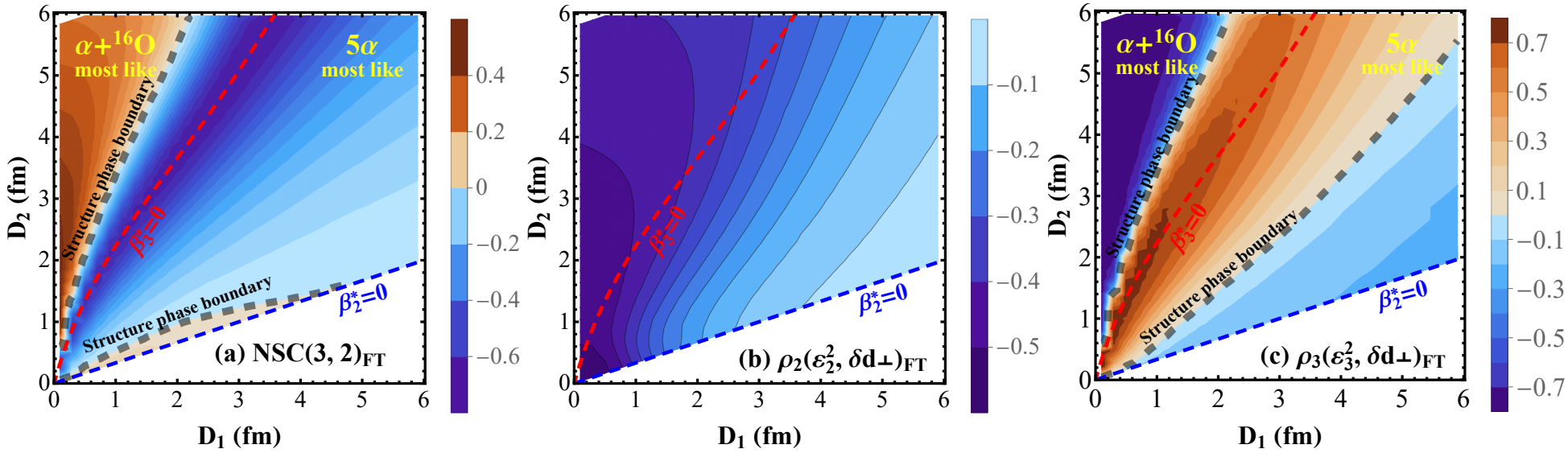
**最中心事件的正负号**

| 构型 | NSC(3,2) | $\rho_2$ |
|---|---|---|
| $\alpha + {}^{16}\mathrm{O}$ | 正 | 负 |
| $5\alpha$ | 负 | 正 |

- 上图：NSC(3,2) 在 0–5% 范围内保留符号差异
- 中图：$\rho_2$ 在 0–10% 范围内区分两种构型
- 下图：$\rho_3$ 在末态都为负，只凭符号已不能区分

**关联测量为区分团簇构型提供新的检验；这些符号差异仍是待验证的模型预测。**

# LHC/LHCb PbNe 理论预言 —— 用更大的 Pb 探测 Ne 的内部排列




Li, Zhou & Ma, PRL 136, 082302 (2026), Supplemental Material, Fig. 5。PbNe 固定靶的解析几何预测。

**PbNe：** 在超中心碰撞的几何近似下，较大的 Pb 覆盖整个 Ne，碰撞区能够保留单个 Ne 的横向结构

- NSC(3,2) 对两类构型的符号与 NeNe 相同，几何层面的关联更强，提示了固定靶关联测量的潜力

这是初态几何预测，尚不是 LHCb 接受度内的末态结果；用于 70.9 GeV PbNe 的比较仍需纵向演化和探测器接受度。后续动力学方案为 3D Glauber + MUSIC + UrQMD。

# 小结——从核形变到团簇结构：实验已经告诉了我们什么？

- **重核形变**：U／Au、Xe／Pb 的流与横动量关联，将整体形状、三轴性与实验观测联系起来。
- **轻核几何**：OO／NeNe 的流比值，以及 PbNe／PbAr 的固定靶结果，显示 O、Ne、Ar 的核结构差异会影响末态集体运动。
- **$\alpha$ 团簇**：整体形变为理解流差异提供了起点；不同团簇构型的区分，还可以借助多粒子关联和流—动量关联。

**高能核碰撞让核结构信息跨越碰撞演化，成为末态粒子中可以测量的信号。**

# 目录

1 核结构与末态观测量

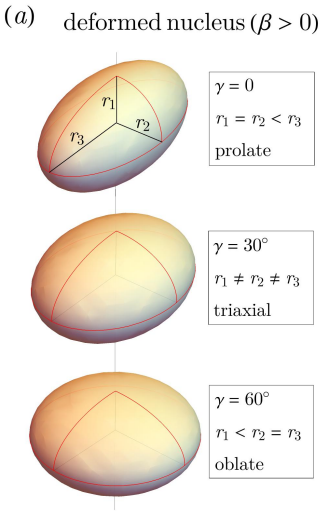
2 重核形变：U 与 Xe

3 轻核结构：Ne

4 $\alpha$ 团簇的判别

5 附录与参考文献

# 附录：三轴形变参数与主轴长度




Bally et al., PRL 128, 082301 (2022), Fig. 2(a)。原图用表面参数 $\gamma$ 示意；$\gamma_v$ 由质量四极矩定义。

**$\beta_v$：偏离球形的程度；$\gamma_v$：三个主轴的相对长短。**

| $\gamma_v$ | 形状 | 半轴长度 $a \geq b \geq c$ |
|---|---|---|
| $0°$ | prolate | $a > b = c$：一个长轴 |
| $0° < \gamma_v < 60°$ | triaxial | $a > b > c$：三个轴长不同 |
| $60°$ | oblate | $a = b > c$：一个短轴 |

$$\beta_v \propto \sqrt{q_{20}^2 + 2q_{22}^2}, \quad \tan\gamma_v = \frac{\sqrt{2}q_{22}}{q_{20}}$$

$q_{20}, q_{22}$ 为内禀质量四极矩分量；$\gamma_v$ 是形变空间中的角，三个主轴仍相互垂直。

- $30°$ 通常称为最大三轴性；并非最大形变。
- Xe：$\left(\overline{\beta}_v, \overline{\gamma}_v\right) = (0.19, 23.6°)$；Pb：$(0.06, 25.3°)$。

**判断形状要同时看 $\beta_v$ 和 $\gamma_v$；球形极限 $\beta_v = 0$ 时，$\gamma_v$ 没有确定意义。**

平均坐标：Bally et al., Fig. 3；定义：Supplemental Eqs. (7–10)。$\gamma_v$ 不是核相对于束流的取向角，也不与 WS 表面参数 $\gamma$ 严格相等。

# 附录：内禀形变与初态偏心率

- 偶偶核的 $0^+$ 基态在实验室系中具有旋转对称性；形状图描述内禀密度或具有空间关联的核子构型。
- 对核的取向取平均，可以得到球对称的单体密度；逐事件构型仍保留非平凡的多体关联。

$$\mathcal{E}_n \equiv \varepsilon_n e^{in\Phi_n} = -\frac{\int d^2\boldsymbol{x} r^n e^{in\varphi} s(\boldsymbol{x})}{\int d^2\boldsymbol{x} r^n s(\boldsymbol{x})}, \quad n \geq 2$$

- 横向坐标以单事件熵密度中心为原点；这一定义描述碰撞区的二维几何。

$$V_n \equiv v_n e^{in\Psi_n} \approx \kappa_n \mathcal{E}_n, \quad n = 2, 3$$

$$V_4 = V_{4,\mathrm{L}} + \chi_{422} V_2^2$$

- 高阶流还包含非线性响应，不能对所有谐波直接使用同一线性关系。

Jia, PRC 105, 014905 (2022)；Giacalone et al., PRL 135, 012302 (2025)。

# 附录：统计抽样与两种相关系数

$$\mathrm{Var}([p_T]) = \mathrm{Var}(\mu_e) + \left\langle \frac{\sigma_e^2}{M_e} \right\rangle$$

- 条件独立抽样下，事件均值的方差包含真实状态涨落和有限粒子数的抽样涨落。
- $\mu_e, \sigma_e^2, M_e$ 分别是固定事件状态的单粒子均值、方差和粒子数。实验用不同粒子的关联估计动力学涨落。

$$\rho_n^{\mathrm{PCC}} = \frac{\langle v_n^2 \delta[p_T] \rangle}{\sqrt{\mathrm{Var}(v_n^2)} \sqrt{\left\langle (\delta[p_T])^2 \right\rangle}}$$

$$\rho_n^{\mathrm{STAR}} = \frac{\langle v_n^2 \delta[p_T] \rangle}{\langle v_n^2 \rangle \sqrt{\left\langle (\delta[p_T])^2 \right\rangle}}$$

- 两种归一化保留相同分子，数值与一般取值范围不同；只有总体 Pearson 系数满足 $|\rho| \le 1$。

全方差公式假设条件独立，相关发射时还含条件协方差。Schenke et al., PRC 102, 034905 (2020)；STAR, RPP 88, 108601 (2025), Eqs. (5–6)。

# 附录：由粒子关联定义流累积量

$$c_n\{2\} = \left\langle\left\langle e^{in(\varphi_1-\varphi_2)}\right\rangle\right\rangle$$

$$c_n\{4\} = \left\langle\left\langle e^{in(\varphi_1+\varphi_2-\varphi_3-\varphi_4)}\right\rangle\right\rangle - 2c_n\{2\}^2$$

$$v_n\{2\} = \sqrt{c_n\{2\}}, \quad v_n\{4\} = (-c_n\{4\})^{\frac{1}{4}}$$

- 内层平均遍历不同粒子组合，外层平均遍历事件；多粒子／subevent 方法可抑制部分非流。
- 忽略非流且权重定义一致时，$c_n\{4\} = \langle v_n^4\rangle - 2\langle v_n^2\rangle^2$。
- $v_n\{4\}$ 为非零实数时，必须有 $c_n\{4\} < 0$；未得到实数值，并不能排除集体行为。

Bilandžić, Snellings & Voloshin, PRC 83, 044913 (2011)；ATLAS／CMS 的具体 subevent 和非流扣除见各自论文。

# 附录：NSC 与 Pearson 的实验估计量

$$\mathrm{SC}(m,n) = \langle v_m^2 v_n^2 \rangle - \langle v_m^2 \rangle \langle v_n^2 \rangle, \quad \mathrm{NSC}(m,n) = \frac{\mathrm{SC}(m,n)}{\langle v_m^2 \rangle \langle v_n^2 \rangle}$$

$$C_{p_T} = \left\langle \frac{\sum_{i \neq j} (p_{T,i} - \mu)(p_{T,j} - \mu)}{M(M-1)} \right\rangle, \quad \mu = \langle [p_T] \rangle$$

$$\mathrm{Var}_{\mathrm{dyn}(v_n^2)} = v_n\{2\}^4 - v_n\{4\}^4$$

$$\rho_n = \frac{\mathrm{Cov}_{\mathrm{dyn}(v_n^2,[p_T])}}{\sqrt{\mathrm{Var}_{\mathrm{dyn}(v_n^2)} C_{p_T}}}$$

- 混合协方差由三个不同粒子的关联构造；各项的中心度和事件权重需保持兼容。
- 以上写法忽略了非流，并依赖具体定义；使用权重、subevent，或 $v_n\{4\}$ 不是实数时，应直接用累积量计算。

Bożek, PRC 93, 044908 (2016)；STAR, arXiv:2506.17785；Li et al., arXiv:2504.04688v3。$C_{p_T}$ 是不同粒子间的协方差，不等于直接计算的样本均值方差。

# 补充：三个 LHC 实验如何测量 OO / NeNe 的流？

| 实验 | 带电粒子接受度 | 两粒子 / 多粒子方法 | 中心度及相关检查 |
|---|---|---|---|
| ALICE | $\lvert\eta\rvert < 0.8$<br>$0.2 < p_T < 3$ GeV/$c$ | $\lvert\Delta\eta\rvert > 1.4$;<br>标准四粒子及 subevent 检查 | FT0C 中心度；改用中快度定义可使 $v_2\{4\}$ 变化约 10% |
| ATLAS | $\lvert\eta\rvert < 2.5$<br>$0.5 < p_T < 5$ GeV | $\lvert\Delta\eta\rvert > 2$ + template subtraction；四粒子两个 subevents | FCal 中心度；另比较相同 $N_{\mathrm{ch}}$ 下的流 |
| CMS | $\lvert\eta\rvert < 2.4$<br>$0.3 < p_T < 3$ GeV | $\lvert\Delta\eta\rvert > 2$ + 外围扣除；四粒子 Q-cumulant | HF 中心度；70–80% 作为 dijet 扣除参考 |

**总体趋势可以相互印证；数值的精确比较需要对应各实验的接受度和事件选择。**

来源：ALICE 2509.06428v2；ATLAS 2509.05171v2；CMS 2510.02580v2。

# 补充：相同的核结构输入为何给出不同的流比值？

$$\{\boldsymbol{r}_i\} \to s(\boldsymbol{x}_\perp) \to \varepsilon_n \to v_n$$

- 从核子坐标到能量沉积，需要指定核子及亚核子尺度上的空间分布。
- 随后的早期演化和流体响应，将初始几何转化成动量空间的不对称性。
- ALICE 对比中，Trajectum 对 $R_2$ 的预言偏高；IP-Glasma + JIMWLK 更接近测量。二者可以使用相同的 PGCM 核结构输入。
- ATLAS 的数据、$\varepsilon_n$ 比值与演化后的 $v_n$ 比值也提示：不能直接令 $v_n = \varepsilon_n$。

**流比值减少了共同的动力学影响，但没有完全消除这些影响。**

ALICE, PRL 137, 082301 (2026), Fig. 3 与讨论；ATLAS, PRC 113, 045205 (2026), Fig. 9。

# 补充：PbNe 理论与实验采用了哪些不同条件？

| 比较项目 | 早期 PRL 计算 | LHCb preliminary 数据 | W. Zhao 会议计算 |
| --- | --- | --- | --- |
| 体系与能量 | PbNe / PbO<br>68.5 GeV | PbNe / PbAr<br>70.9 GeV | PbNe / PbAr<br>70.9 GeV |
| Ne 靶组成 | 纯 $^{20}\mathrm{Ne}$ | 90.48% $^{20}\mathrm{Ne}$<br>9.25% $^{22}\mathrm{Ne}$<br>0.27% $^{21}\mathrm{Ne}$ | 约 91% $^{20}\mathrm{Ne}$<br>9% $^{22}\mathrm{Ne}$ |
| 比较用途 | 展示靶核几何的影响 | 给出实测 $v_2$、$v_3$ 及比值 | 检验参考核种与同位素组成的影响 |

- LHCb 数据：$0.2 < p_T < 3$ GeV；两个 subevents 为 $2.4 < \eta < 3.5$ 与 $4.5 < \eta < 5.0$。
- LHCb note Fig. 7 下排的早期计算采用纯 $^{20}\mathrm{Ne}$、约 68 GeV、$2 < \eta < 5$ 且无 gap，与数据并非完全相同的条件。
- 精确数值比较还需要统一中心度定义、接受度及 nonflow 处理。

Giacalone et al., PRL 134, 082301 (2025)；LHCb-CONF-2025-001, Sec. 5 与 Fig. 7；W. Zhao, Implications of LHCb measurements (2025), slide 25。

# 参考文献 1 / 5

**1. Jiangyong Jia (2022)**
Shape of atomic nuclei in heavy ion collisions
Phys. Rev. C 105, 014905　原文链接　DOI: 10.1103/PhysRevC.105.014905
**2. Björn Schenke; Chun Shen; Derek Teaney (2020)**
Transverse momentum fluctuations and their correlation with elliptic flow in nuclear collisions
Phys. Rev. C 102, 034905　原文链接　DOI: 10.1103/PhysRevC.102.034905
**3. STAR Collaboration (2024)**
Imaging shapes of atomic nuclei in high-energy nuclear collisions
Nature 635, 67–72　原文链接　DOI: 10.1038/s41586-024-08097-2
**4. STAR Collaboration (2025)**
Imaging nuclear shape through anisotropic and radial flow in high-energy heavy-ion collisions
Rep. Prog. Phys. 88, 108601　原文链接　DOI: 10.1088/1361-6633/ae0fc3

# 参考文献 2 / 5

**5. Benjamin Bally; Michael Bender; Giuliano Giacalone; Vittorio Somà (2022)**
Evidence of the triaxial structure of 129Xe at the Large Hadron Collider
Phys. Rev. Lett. 128, 082301　原文链接　DOI: 10.1103/PhysRevLett.128.082301
**6. ALICE Collaboration (2025)**
Exploring nuclear structure with multiparticle azimuthal correlations at the LHC
Phys. Lett. B 869, 139855　原文链接　DOI: 10.1016/j.physletb.2025.139855
**7. ATLAS Collaboration (2023)**
Correlations between flow and transverse momentum in Xe+Xe and Pb+Pb collisions at the LHC with the ATLAS detector: a probe of the heavy-ion initial state and nuclear deformation
Phys. Rev. C 107, 054910　原文链接　DOI: 10.1103/PhysRevC.107.054910
**8. Emil Gorm Nielsen for the ALICE Collaboration (2023)**
Characterising the initial conditions and probing the nuclear structure with multi-particle correlations techniques at the LHC
Quark Matter 2023 poster; preliminary　原文链接

# 参考文献 3 / 5

**9. G. Giacalone et al. (2025)**
Exploiting 20Ne Isotopes for Precision Characterizations of Collectivity in Small Systems
Phys. Rev. Lett. 135, 012302　原文链接　DOI: 10.1103/k8rb-jgvq
**10. ALICE Collaboration (2026)**
Evidence of nuclear geometry-driven anisotropic flow in OO and Ne–Ne collisions at sqrt(sNN) = 5.36 TeV
Physical Review Letters 137, 082301　原文链接　DOI: 10.1103/gymp-vp87
**11. ATLAS Collaboration (2026)**
Measurement of the azimuthal anisotropy of charged particles in 5.36 TeV O+O and Ne+Ne collisions with the ATLAS detector
Physical Review C 113, 045205　原文链接　DOI: 10.1103/xqxz-8bhf
**12. CMS Collaboration (2026)**
Observation of long-range collective flow in OO and NeNe collisions and implications for nuclear structure studies
Physical Review Letters 137, 082302　原文链接　DOI: 10.1103/26wx-tg6f

# 参考文献 4 / 5

**13. Pei Li; Bo Zhou; Guo-Liang Ma (2026)**
Identifying α-Cluster Configurations in 20Ne via Ultracentral Ne+Ne Collisions
Phys. Rev. Lett. 136, 082302　原文链接　DOI: 10.1103/tffz-8q1m
**14. G. Giacalone et al. (2025)**
Anisotropic Flow in Fixed-Target 208Pb + 20Ne Collisions as a Probe of Quark-Gluon Plasma
Phys. Rev. Lett. 134, 082301　原文链接　DOI: 10.1103/PhysRevLett.134.082301
**15. LHCb Collaboration (2025)**
Unveiling the shape of the 20Ne nucleus by measuring the flow coefficients with cumulants in PbNe and PbAr collisions at 70.9 GeV
LHCb-CONF-2025-001　原文链接　DOI: 10.48550/arXiv.2509.12399
**16. Wenbin Zhao (2025)**
Overview of hydrodynamic modeling of collective flow in collision systems and energies available at LHCb
Implications 2025　原文链接

# 参考文献 5 / 5

**17. Chun Shen (2025)**
Imaging Event-by-Event Nuclear Shapes in Relativistic Heavy-Ion Collisions
Quark Matter 2025; slide 16, in-preparation figure　原文链接
**18. A. Bilandžić; R. Snellings; S. Voloshin (2011)**
Flow analysis with cumulants: Direct calculations
Phys. Rev. C 83, 044913　原文链接　DOI: 10.1103/PhysRevC.83.044913
**19. Piotr Bożek (2016)**
Transverse-momentum–flow correlations in relativistic heavy-ion collisions
Phys. Rev. C 93, 044908　原文链接　DOI: 10.1103/PhysRevC.93.044908
**20. LHCb Collaboration (2024)**
The LHCb Upgrade I
JINST 19, P05065　原文链接　DOI: 10.1088/1748-0221/19/05/P05065