



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

重离子碰撞中高阶累积矩接收度修正的应用

项目成员： 杨承熹 (PB18000318)

张原 (PB18050155)

导师： 张一飞 教授

目录

- 一.背景简介
- 二.实验观测量
- 三.接收度效应及其修正
- 四.UrQMD模型下的验证
- 五.总结与展望

背景简介

量子色动力学 (QCD) 是粒子物理标准模型中描述强相互作用的基本理论。

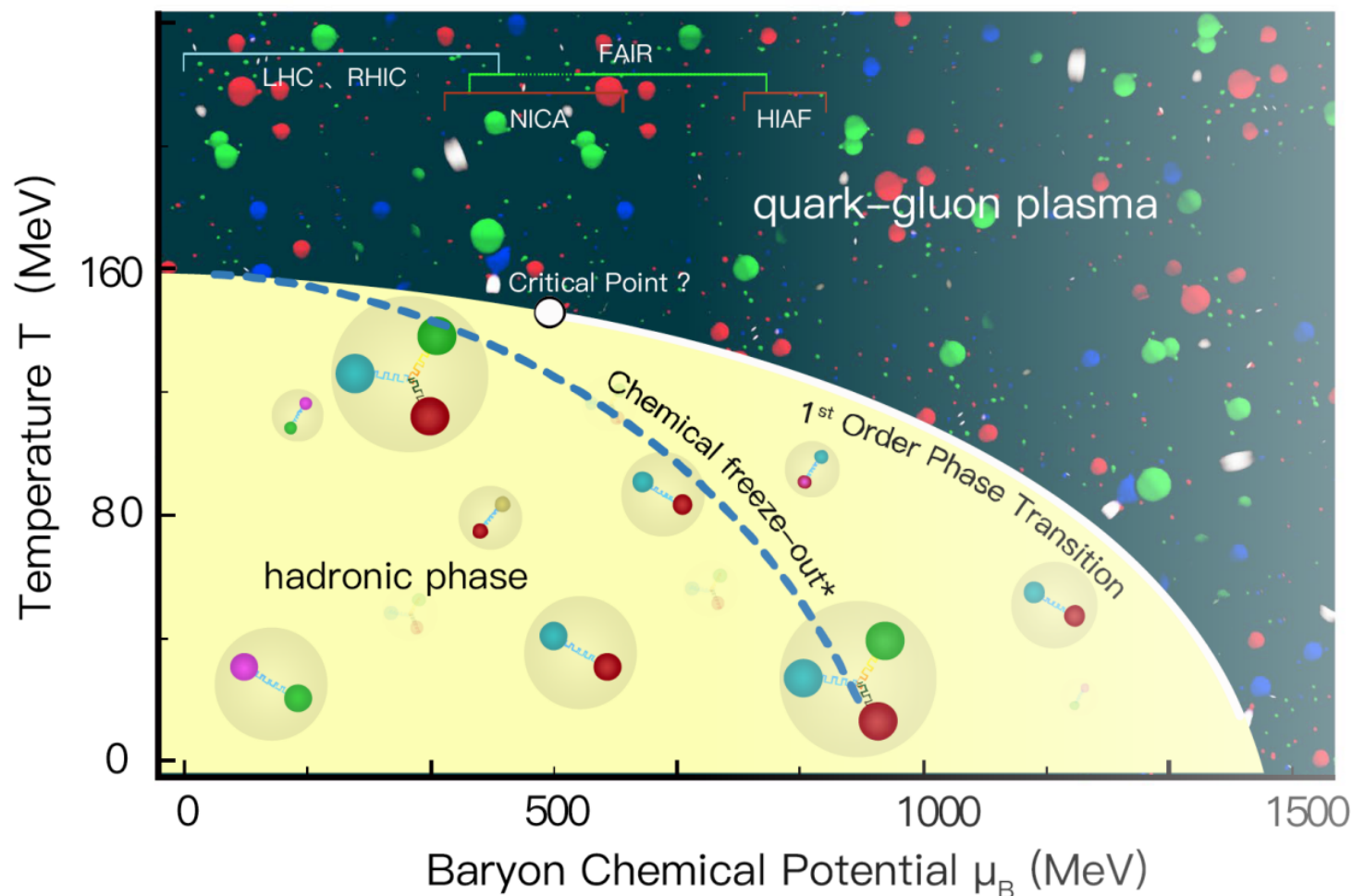
强相互作用具有渐进自由特性 (Asymptotic Freedom)

当能标减小并趋于禁闭能标

耦合常数 α_s 发散, 使得夸克和胶子束缚为强子——色禁闭

极端高温高密度条件下

耦合常数 $\alpha_s \rightarrow 0$, 使得夸克和胶子解除色禁闭, 成为夸克-胶子等离子体 (QGP)



QCD相图

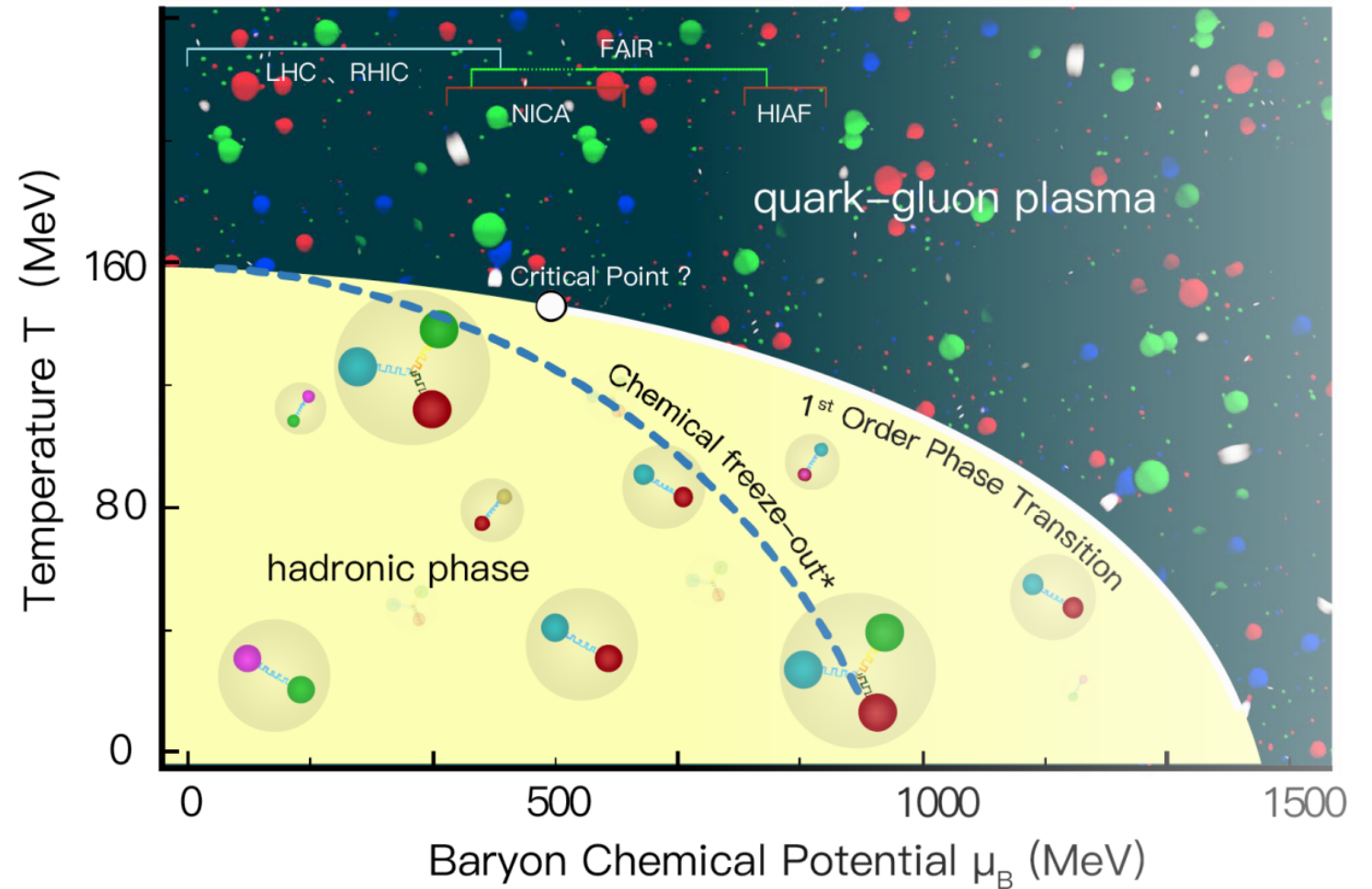
背景简介

强相互作用相变：强子相 $\leftrightarrow$ QGP相

- 在 $\mu_B = 0$ 处，平滑过渡
 - 格点QCD计算
 - $T \sim 156 \text{ MeV}$
- 在较大 μ_B 处，一级相变
 - 相关模型预言



一级相变的终点：QCD相变临界点
存在性与位置



背景简介

如何人工产生QGP——相对论重离子碰撞

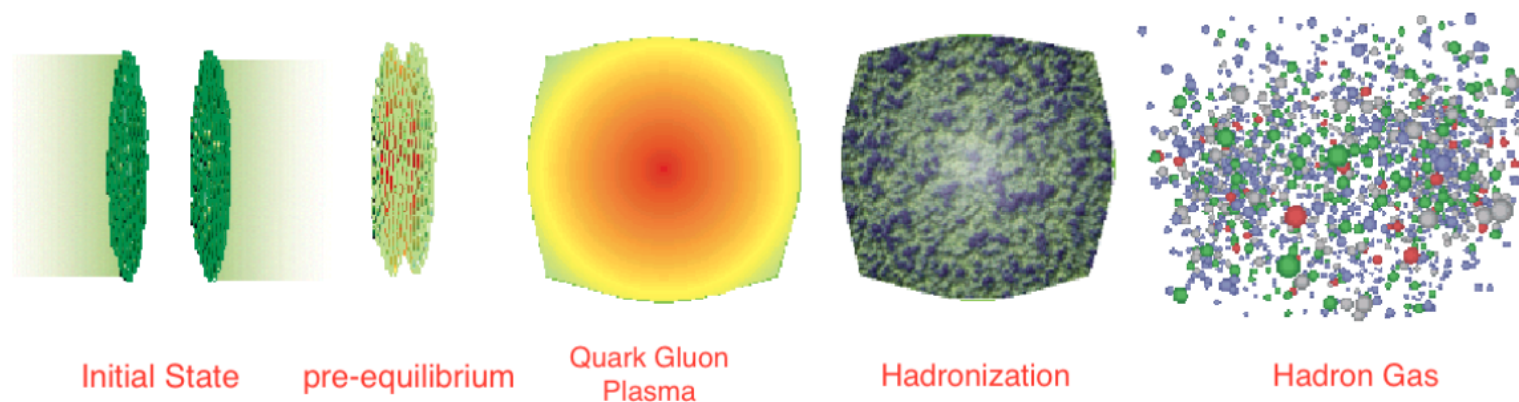


图1：相对论重离子碰撞过程示意图

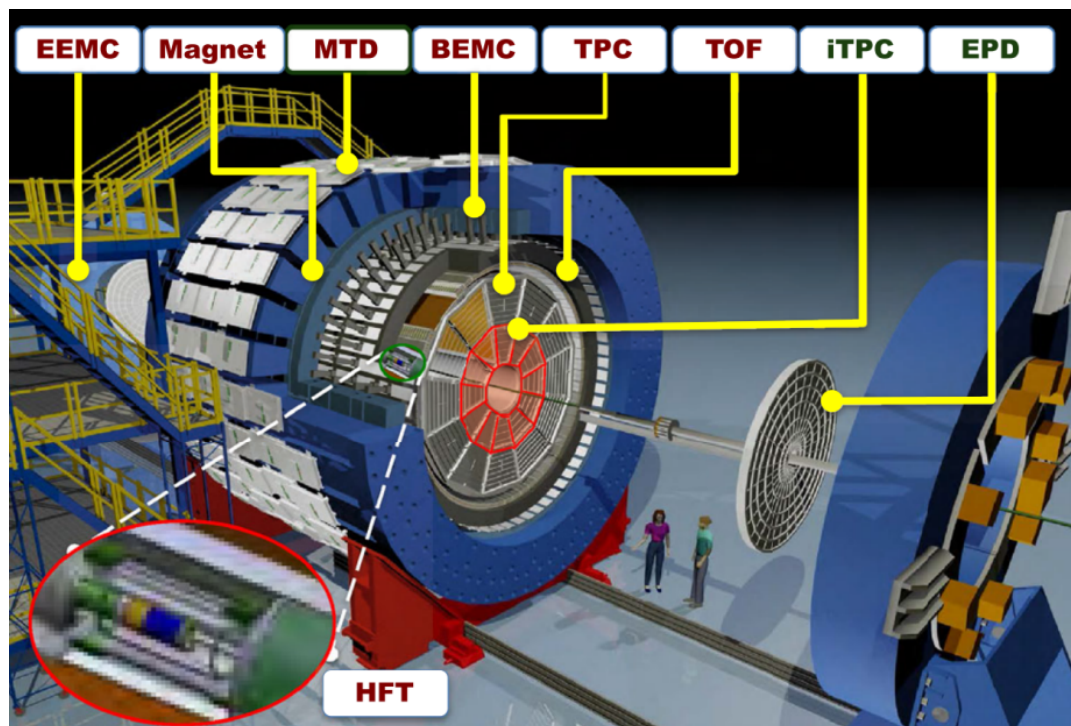


图2：RHIC-STAR实验升级项目

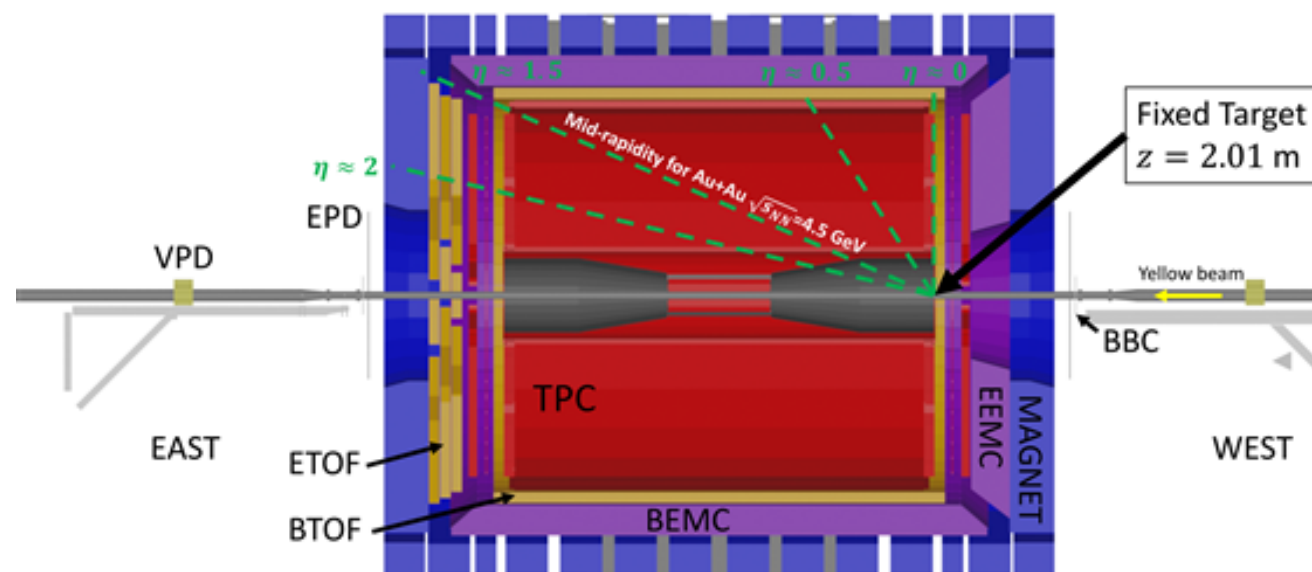


图3：STAR-FXT固定靶实验项目

实验观测量

对于守恒荷（例如重子数B、电荷数Q、奇异数S）
定义累积矩

$$C_1^q = M = \langle N_q \rangle = VT^3 \chi_1^q$$

$$C_2^q = \sigma^2 = \langle (\delta N_q)^2 \rangle = VT^3 \chi_2^q$$

$$C_3^q = S\sigma^3 = \langle (\delta N_q)^3 \rangle = VT^3 \chi_3^q \propto \xi^{4.5}$$

$$C_4^q = \kappa\sigma^4 = \langle (\delta N_q)^4 \rangle - 3 \langle (\delta N_q)^2 \rangle^2 = VT^3 \chi_4^q \propto \xi^7$$

其中 $\delta N_q = N_q - \langle N_q \rangle$, $q = B, Q, S$

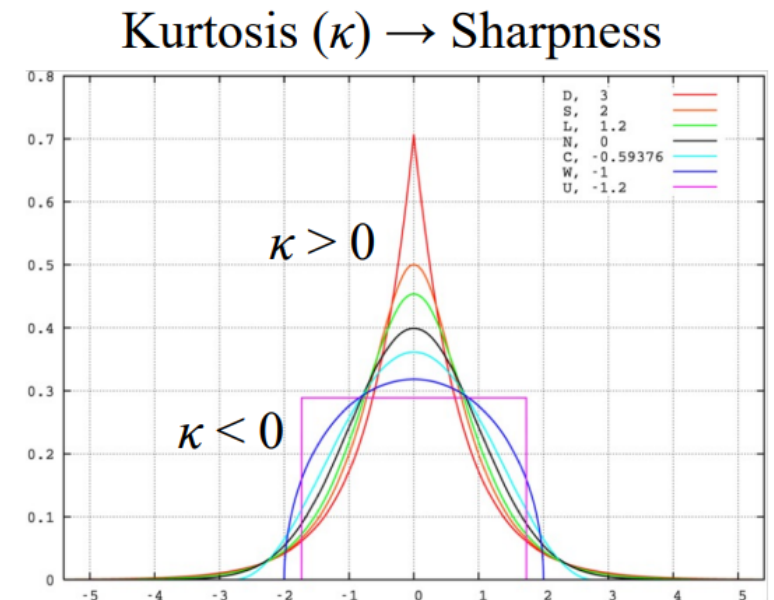
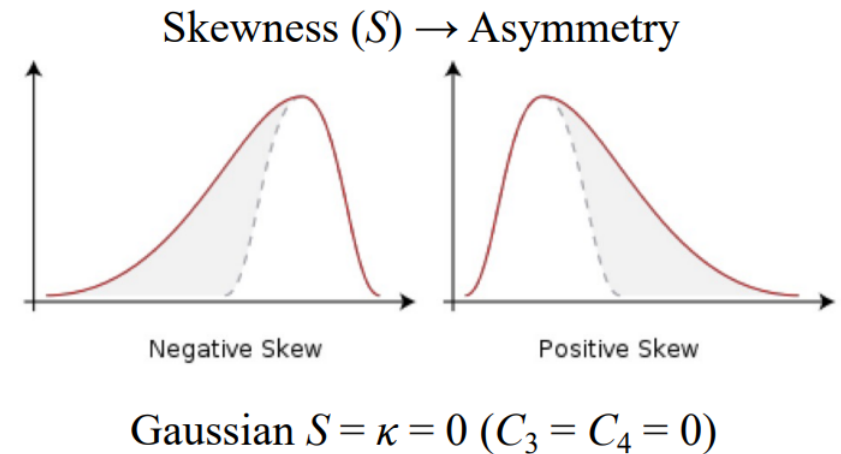
N_q 是守恒荷q的多重数

实验上以净质子数和净K介子数来代替B和

为了消除体积项的影响实验中常采用
累积矩的比值

$$\frac{C_3^q}{C_2^q} = S\sigma = \frac{\chi_3^q}{\chi_2^q}, \quad \frac{C_4^q}{C_2^q} = \kappa\sigma^2 = \frac{\chi_4^q}{\chi_2^q}$$

临界点附近
能量依赖非单调



接收度效应及其修正

在实验测量中，粒子以一定概率被探测器接收，因此测得的多重数偏离真实值，守恒荷高阶累积矩也将偏离真实值。

假设各粒子被探测器接收的概率独立无关，则多个粒子被探测器接收的概率符合二项分布

$$\tilde{P}(n) = \sum_N P(N) \prod_{i=1}^M B_{p_i, N_i}(n_i).$$

$$\text{其中 } B_{p, N}(n) = \frac{N!}{n!(N-n)!} p^n (1-p)^{N-n}$$

效率修正的计算中， $P(N)$ 是粒子多重数的分布， M 是划分的 bin 的个数； N_i, n_i, p_i 分别为第 i 个 bin 中真实粒子的总数、被探测到粒子的个数、以及被探测到的效率。

接收度效应的计算，此处的 M 为不同相空间的个数， N_i, n_i, p_i 分别是相空间中粒子的总数、在接收度内的粒子个数、以及粒子处于接收度内的平均概率。即 $p_i = \langle n_i \rangle / \langle N_i \rangle$

接收度效应及其修正

已有研究严格证明，当相空间满足多项分布假设时，基于二项分布的平均效率修正是准确的

因此对于接收度变换，可从效率修正的解析表达式进行推广

对于效率修正，有

$$\begin{aligned}\langle Q \rangle_c &= \langle q_{(1,1)} \rangle_c, \\ \langle Q^2 \rangle_c &= \langle q_{(1,1)}^2 \rangle_c + \langle q_{(2,1)} \rangle_c - \langle q_{(2,2)} \rangle_c, \\ \langle Q^3 \rangle_c &= \langle q_{(1,1)}^3 \rangle_c + 3\langle q_{(1,1)}q_{(2,1)} \rangle_c - 3\langle q_{(1,1)}q_{(2,2)} \rangle_c + \langle q_{(3,1)} \rangle_c - 3\langle q_{(3,2)} \rangle_c + 2\langle q_{(3,3)} \rangle_c, \\ \langle Q^4 \rangle_c &= \langle q_{(1,1)}^4 \rangle_c + 6\langle q_{(1,1)}^2q_{(2,1)} \rangle_c - 6\langle q_{(1,1)}^2q_{(2,2)} \rangle_c + 4\langle q_{(1,1)}q_{(3,1)} \rangle_c + 3\langle q_{(2,1)}^2 \rangle_c \\ &\quad + 3\langle q_{(2,2)}^2 \rangle_c - 12\langle q_{(1,1)}q_{(3,2)} \rangle_c + 8\langle q_{(1,1)}q_{(3,3)} \rangle_c - 6\langle q_{(2,1)}q_{(2,2)} \rangle_c \\ &\quad + \langle q_{(4,1)} \rangle_c - 7\langle q_{(4,2)} \rangle_c + 12\langle q_{(4,3)} \rangle_c - 6\langle q_{(4,4)} \rangle_c,\end{aligned}$$

$$q_{(r,s)} = q_{(a^r/p^s)} = \sum_{i=1}^M (a_i^r/p_i^s) n_i.$$

$\langle q^n \rangle_c$ 是未进行效率修正的高阶累积矩

n_i, p_i, a_i 分别是第*i*个bin中的粒子数、粒子被探测到的概率、粒子带有的守恒荷

接收度效应及其修正

对于接收度的修正，可将粒子进入目标接收度和待修正接收度间的平均效率作为效率，使用效率修正的解析表达式即可完成修正

即做如下代换

$$\begin{aligned} Q &\rightarrow q \\ \frac{1}{p_i} &\rightarrow p_i \end{aligned}$$

可得接收度变换的解析表达式

$$\begin{aligned} \langle q \rangle_c &= \langle Q_{(1,1)} \rangle_c, \\ \langle q^2 \rangle_c &= \langle Q_{(1,1)}^2 \rangle_c + \langle Q_{(2,1)} \rangle_c - \langle Q_{(2,2)} \rangle_c, \\ \langle q^3 \rangle_c &= \langle Q_{(1,1)}^3 \rangle_c + 3\langle Q_{(1,1)}Q_{(2,1)} \rangle_c - 3\langle Q_{(1,1)}Q_{(2,2)} \rangle_c + \langle Q_{(3,1)} \rangle_c \\ &\quad - 3\langle Q_{(3,2)} \rangle_c + 2\langle Q_{(3,3)} \rangle_c, \\ \langle q^4 \rangle_c &= \langle Q_{(1,1)}^4 \rangle_c + 6\langle Q_{(1,1)}^2Q_{(2,1)} \rangle_c - 6\langle Q_{(1,1)}^2Q_{(2,2)} \rangle_c + 4\langle Q_{(1,1)}Q_{(3,1)} \rangle_c + 3\langle Q_{(2,1)}^2 \rangle_c \\ &\quad + 3\langle Q_{(2,2)}^2 \rangle_c - 12\langle Q_{(1,1)}Q_{(3,2)} \rangle_c + 8\langle Q_{(1,1)}Q_{(3,3)} \rangle_c - 6\langle Q_{(2,1)}Q_{(2,2)} \rangle_c \\ &\quad + \langle Q_{(4,1)} \rangle_c - 7\langle Q_{(4,2)} \rangle_c + 12\langle Q_{(4,3)} \rangle_c - 6\langle Q_{(4,4)} \rangle_c, \end{aligned}$$

其中 $Q_{(r,s)} = Q_{(a^r p^s)} = \sum_{i=1}^M (a_i^r p_i^s) n_i.$

由此可以发现，当接收度趋于0时，有

$$\begin{aligned} \frac{C_{odd}^i}{C_{odd}^j} &= 1 \\ \frac{C_{odd}^i}{C_{even}^j} &= \frac{\langle n_{\text{net}} \rangle}{\langle n_{\text{tot}} \rangle} \end{aligned}$$

UrQMD模型下的验证

极端相对论量子分子动力学 (Ultra Relativistics Quantum Molecular Dynamics, UrQMD) 模型是在高能重离子碰撞唯象研究中被广泛使用的一个微观粒子输运模型, 已被成功地应用于计算高阶累积矩和研究实验测量中的多种效应

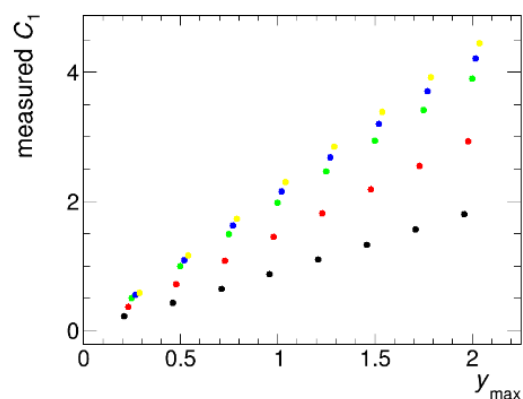
在本课题中, 我们利用UrQMD模型模拟了金荷-金荷碰撞, 在不同能量和中心度下产生了大量事例用于分析

$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)	centrality	b (fm)	number of events
62.4	0-5%	0-2.79	10^6
62.4	0-1%	0-1.25	10^6
62.4	-	1	10^6
3	0-80%	-	10^6

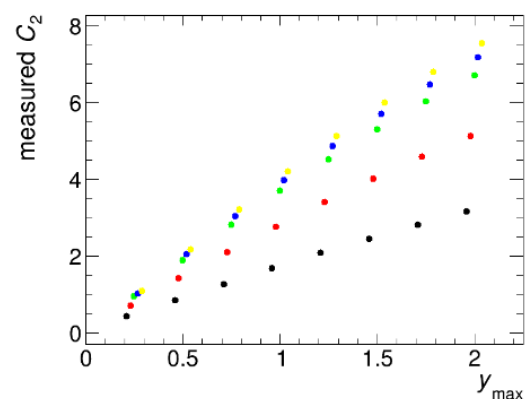
表1: UrQMD产生的数据集

UrQMD模型下的验证

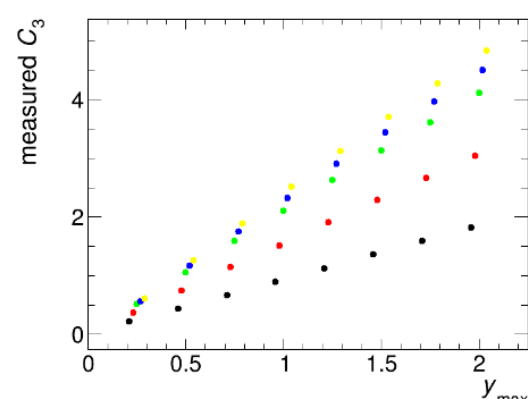
图 (a) 到 (g) 为横动量和快度的接收度效应



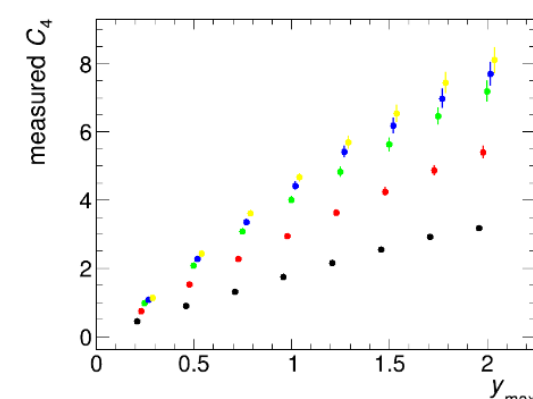
(a) C_1



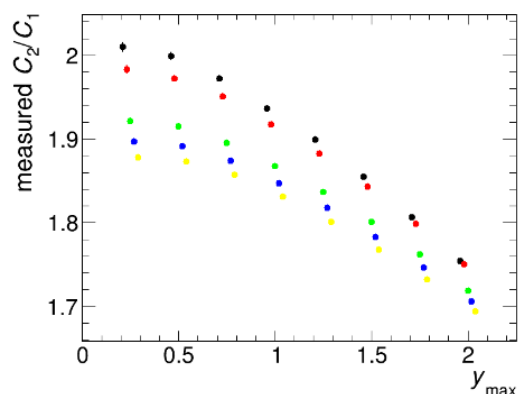
(b) C_2



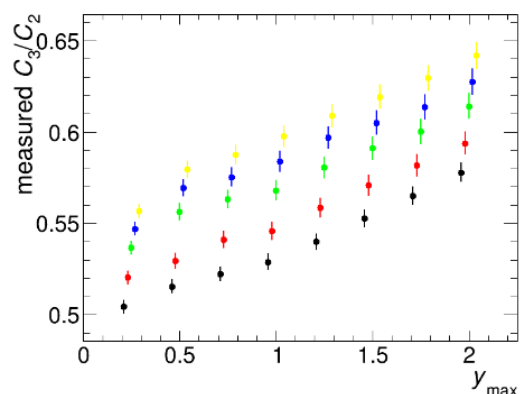
(c) C_3



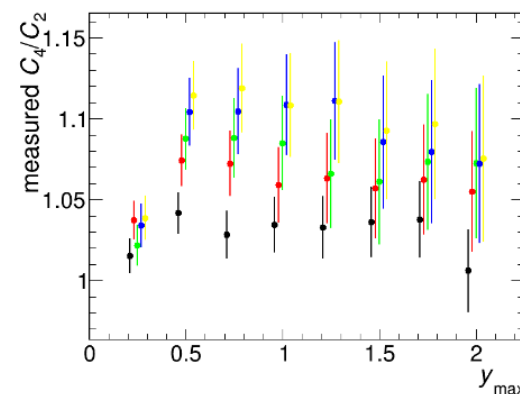
(d) C_4



(e) C_2/C_1



(f) C_3/C_2



(g) C_4/C_2

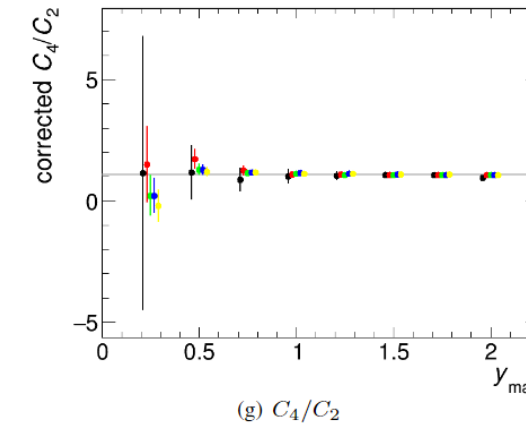
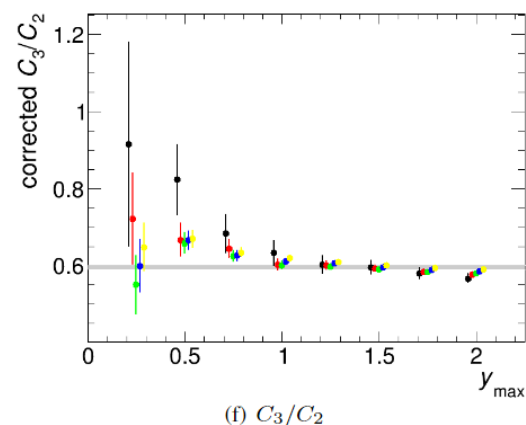
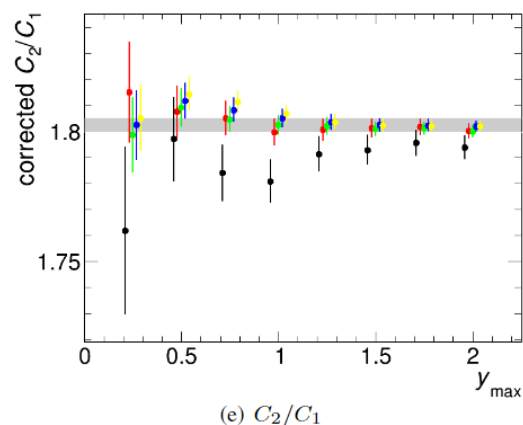
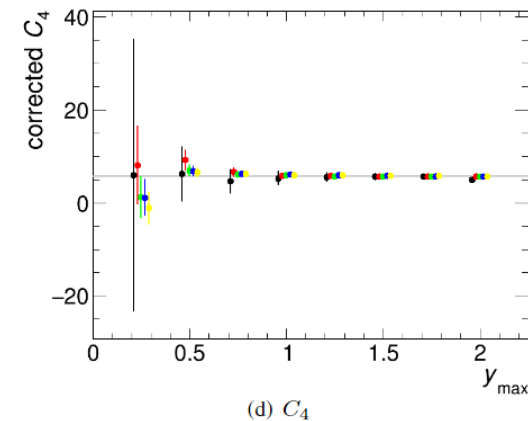
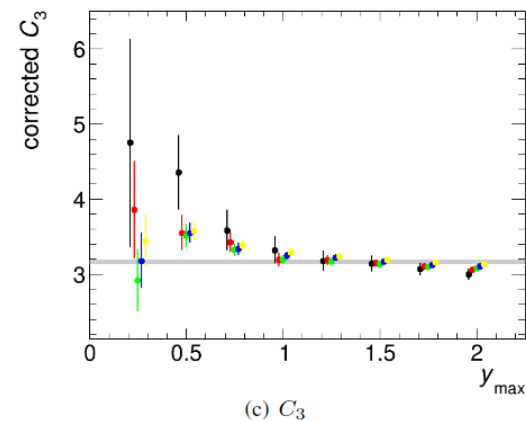
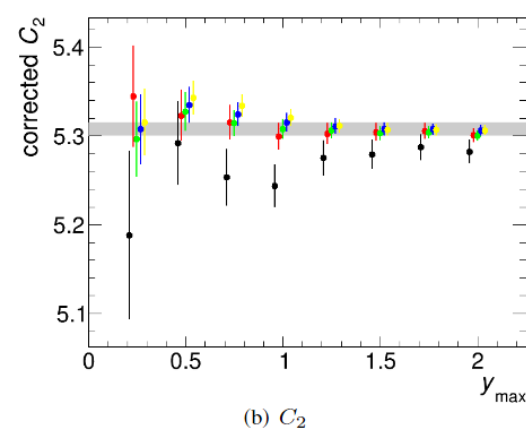
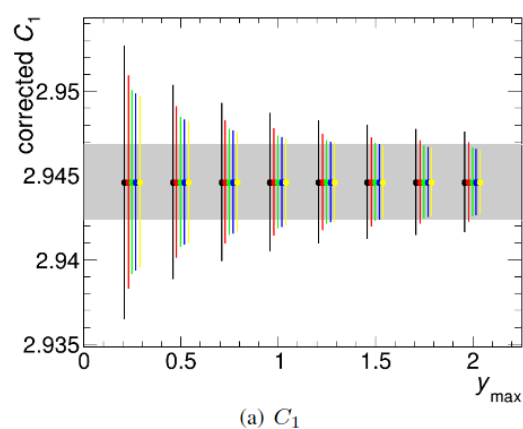
$y: 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2$

$pT \in : (1,2), (0.75,2.5), (0.5,3), (0.4,4), (0.3,5) \text{ (GeV)}.$

UrQMD模型下的验证

图 (a) 到 (g) 为接收度修正后, 高阶累积矩及其比值

图为不同接收度修正至 $p_T \in (0.5, 3), |y| < y_{max} = 1.5$

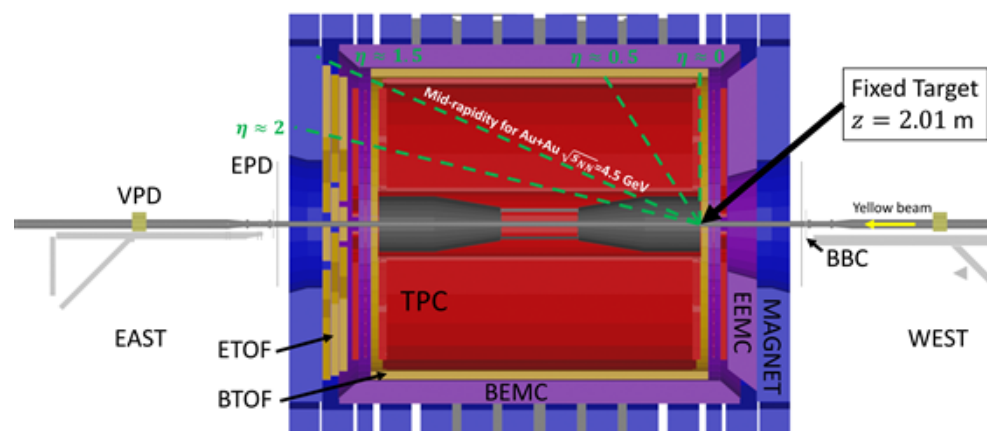


$y: 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2$

$p_T \in : (1,2), (0.75,2.5), (0.5,3), (0.4,4), (0.3, 5) \text{ (GeV)}.$

总结与展望

- 学习了测量守恒荷分布的高阶累积矩及其比值的物理背景和计算方法，并编写程序进行了计算
- 深入了解了基于二项分布模型对高阶累积矩进行效率修正多种方法。利用二项分布模型，我们计算了接收度对守恒荷高阶矩测量的影响，观测到了在接收度趋于 0 时，守恒荷高阶累积矩趋于基线的现象
- 利用基于平均效率的效率修正方法，我们实现了守恒荷高阶累积矩在不同接收度间的变换，为在相同接收度下测量守恒荷高阶累积矩的能量依赖提供了有力工具
- 对于STAR-FXT固定靶实验，探测器只能覆盖一半的快度，缺少 $y > 0$ 的部分，可以利用本项研究对快度区间进行修正。



图：STAR-FXT固定靶实验中探测器只能覆盖一半快度

参考文献