

中国科学技术大学博士学位论文开题报告

高重子密度重离子碰撞中守恒荷高阶累积矩的测量

姓名： 司凡

学号： BA20004013

院系： 近代物理系

专业： 粒子物理与原子核物理

方向： 相对论重离子碰撞实验

导师： 张一飞 教授

日期： 2022年3月31日

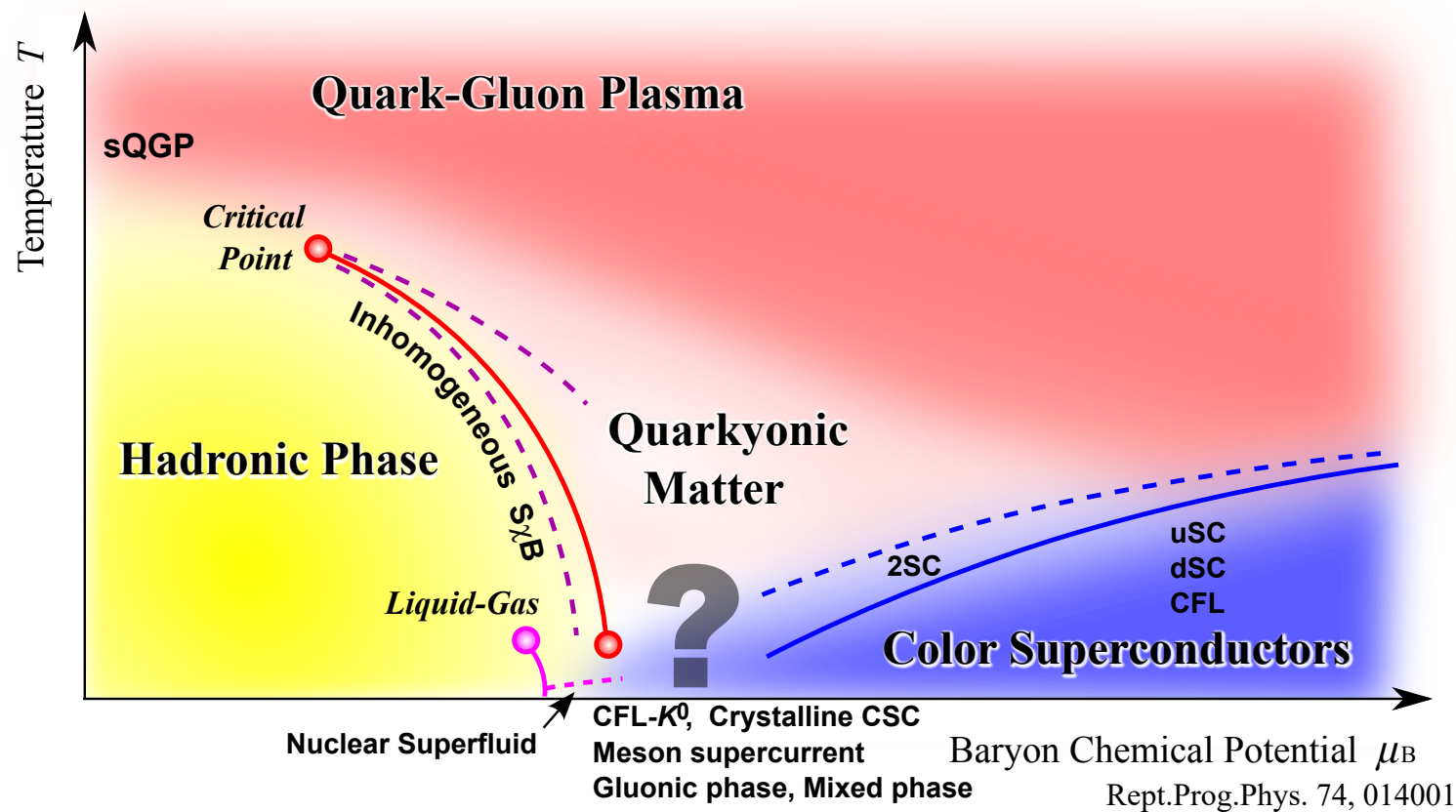


目录

- 研究背景与意义
- 研究现状与发展趋势
- 研究内容与预期成果
- 研究方法与创新点
- 研究进度安排
- 相关研究工作
- 总结

QCD相图

- 量子色动力学(QCD): 描述夸克和胶子之间的强相互作用
- 强子相
 - 低温低密度
 - 以强子为自由度
 - 色禁闭
- 夸克胶子等离子体(QGP)相
 - 高温高密度
 - 以夸克和胶子为自由度
 - 解禁闭, 渐进自由



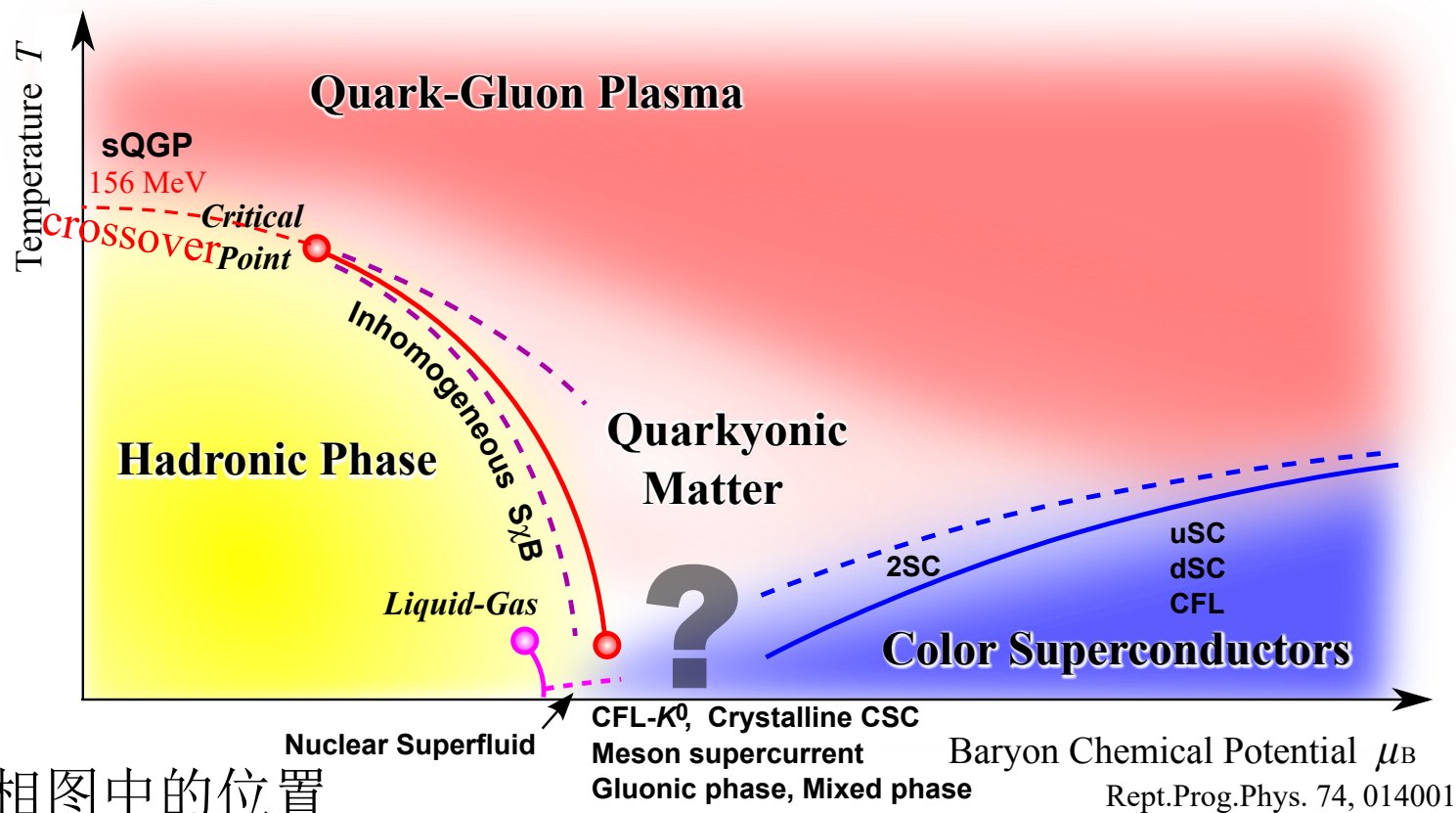
QCD相图

- 强相互作用相变：强子相 $\leftrightarrow$ QGP相

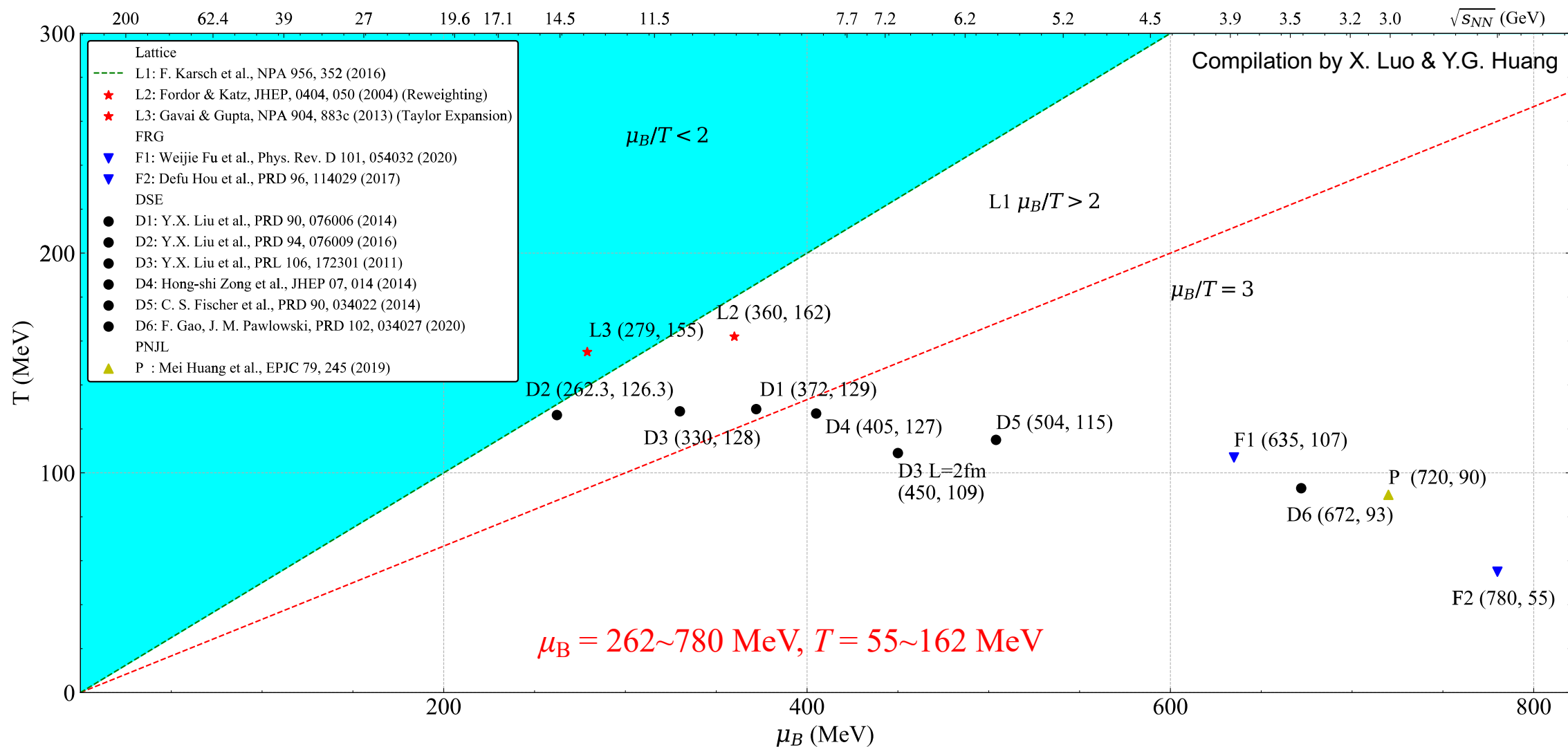
- 在 $\mu_B = 0$ ，平滑过渡
 - 格点QCD计算
 - $T \sim 156 \text{ MeV} \sim 10^{12} \text{ K}$

- 在较大 μ_B ，一级相变
 - 相关模型预言

- QCD相变临界点
 - 一级相变的终点
 - 重大科学问题：存在性及在相图中的位置
 - 理解强作用、QCD相变与相结构



临界点的理论预言

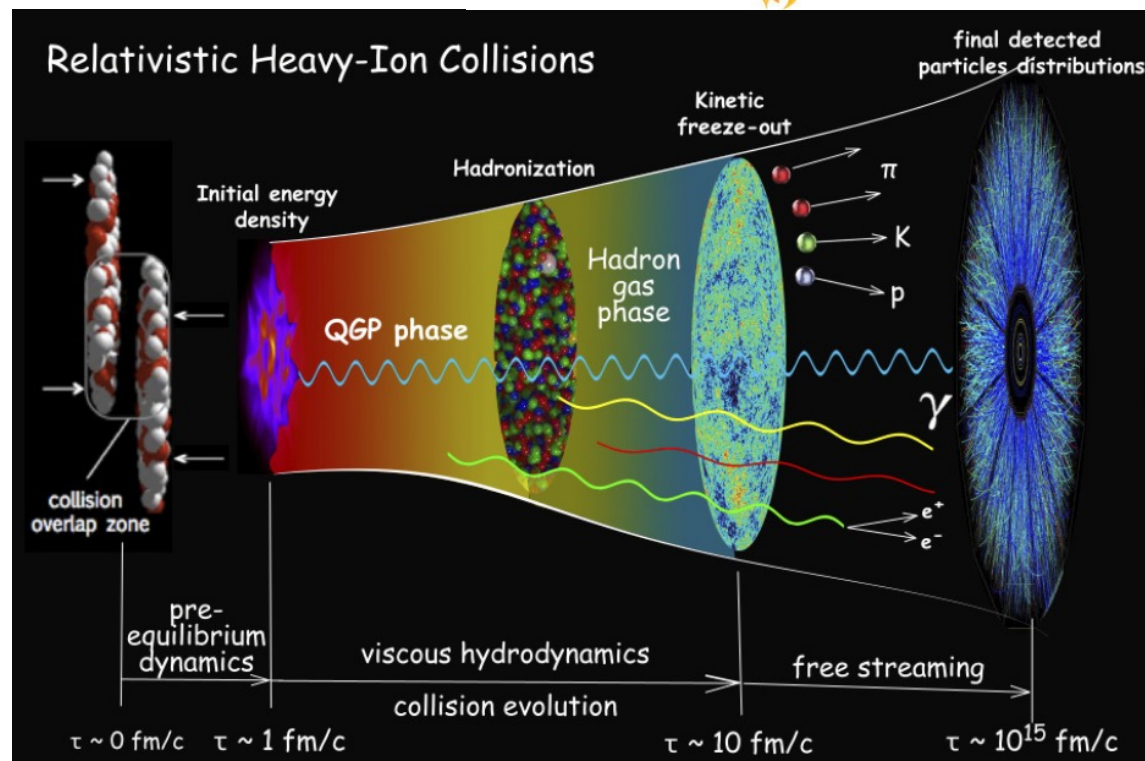
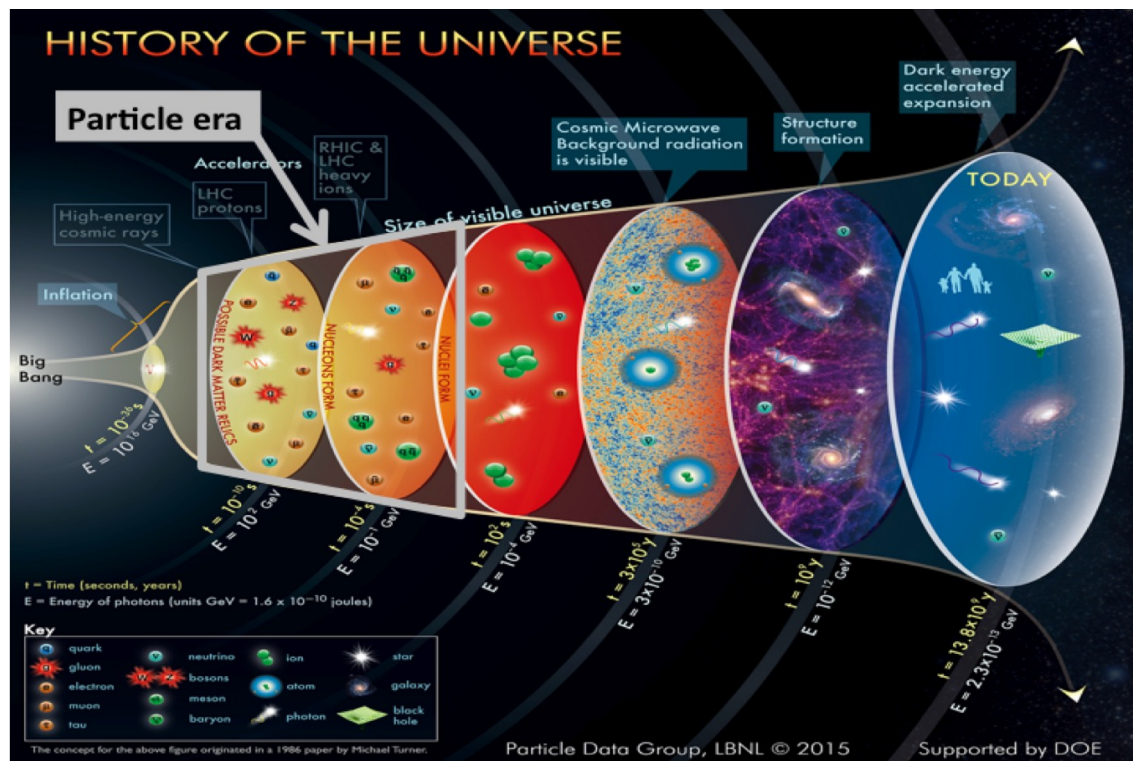
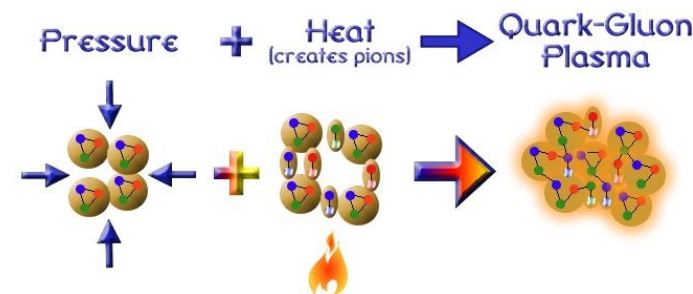


相对论重离子碰撞

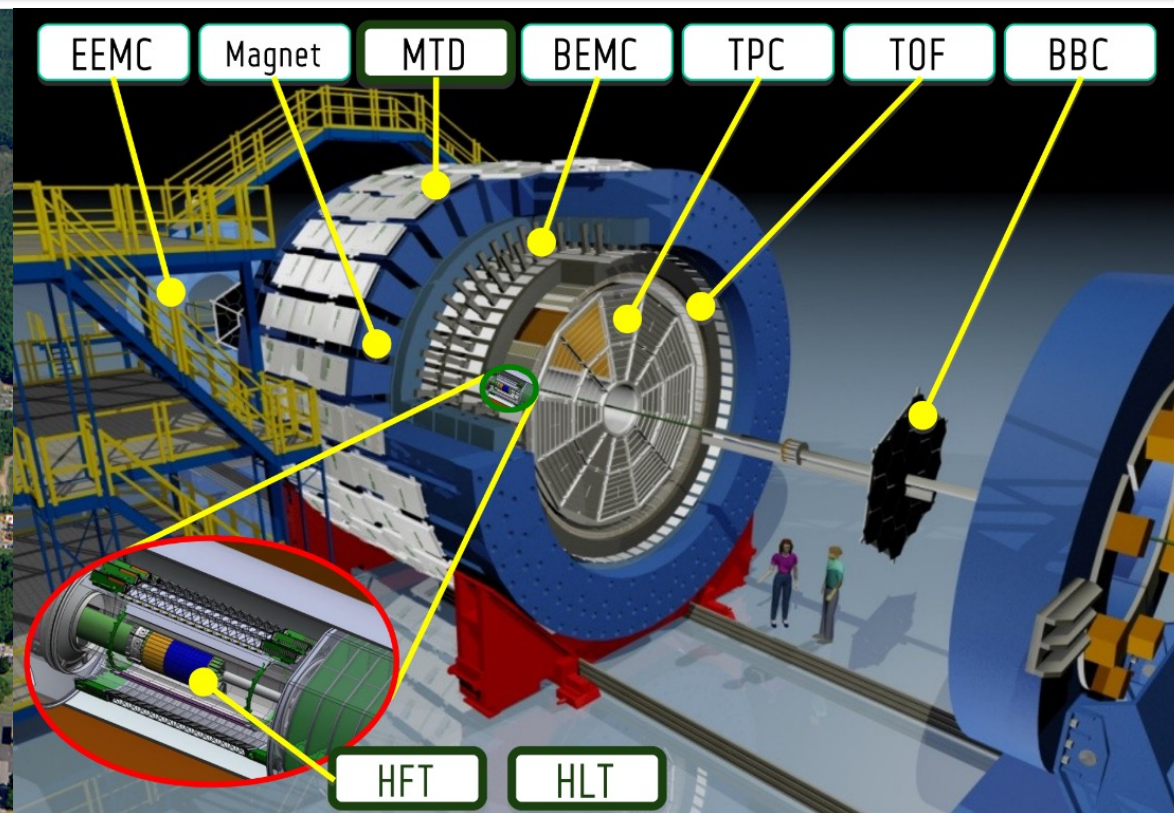
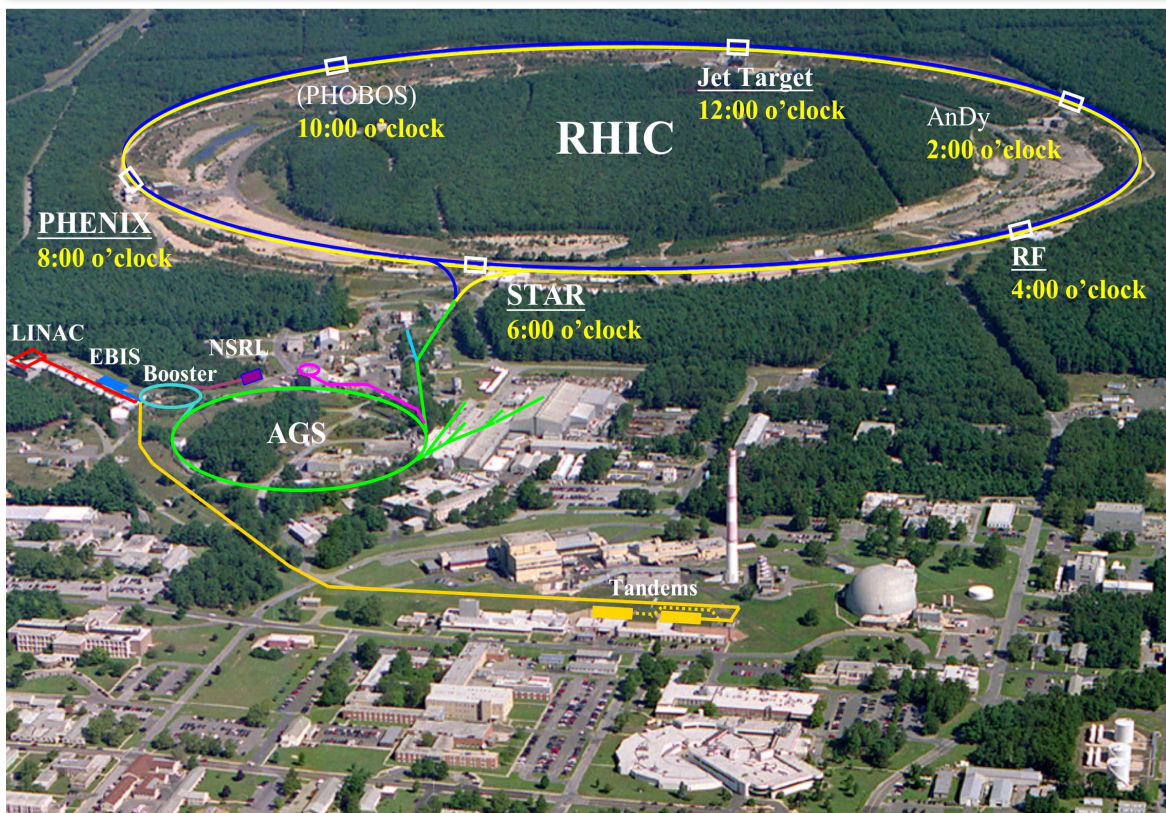
- 宇宙大爆炸
 - 约137亿年前
 - 约 10^{-6} 秒后产生QGP

- 相对论重离子碰撞（小爆炸）

- 达到高温高密
- 人工产生QGP



大型加速器和探测器系统

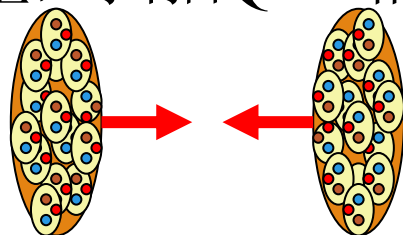


- 相对论重离子对撞机(RHIC) @ BNL
- $\text{Au}+\text{Au}$ @ $3.0 \text{ GeV} \leq \sqrt{s_{\text{NN}}} \leq 200 \text{ GeV}$

- STAR 探测器系统
- 主探测器：时间投影室(TPC)
 - $|\eta| < 1, 0 < \varphi < 2\pi$

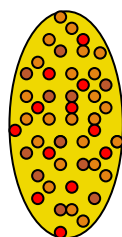
实验扫描QCD相图

- 通过改变碰撞能量，扫描QCD相图



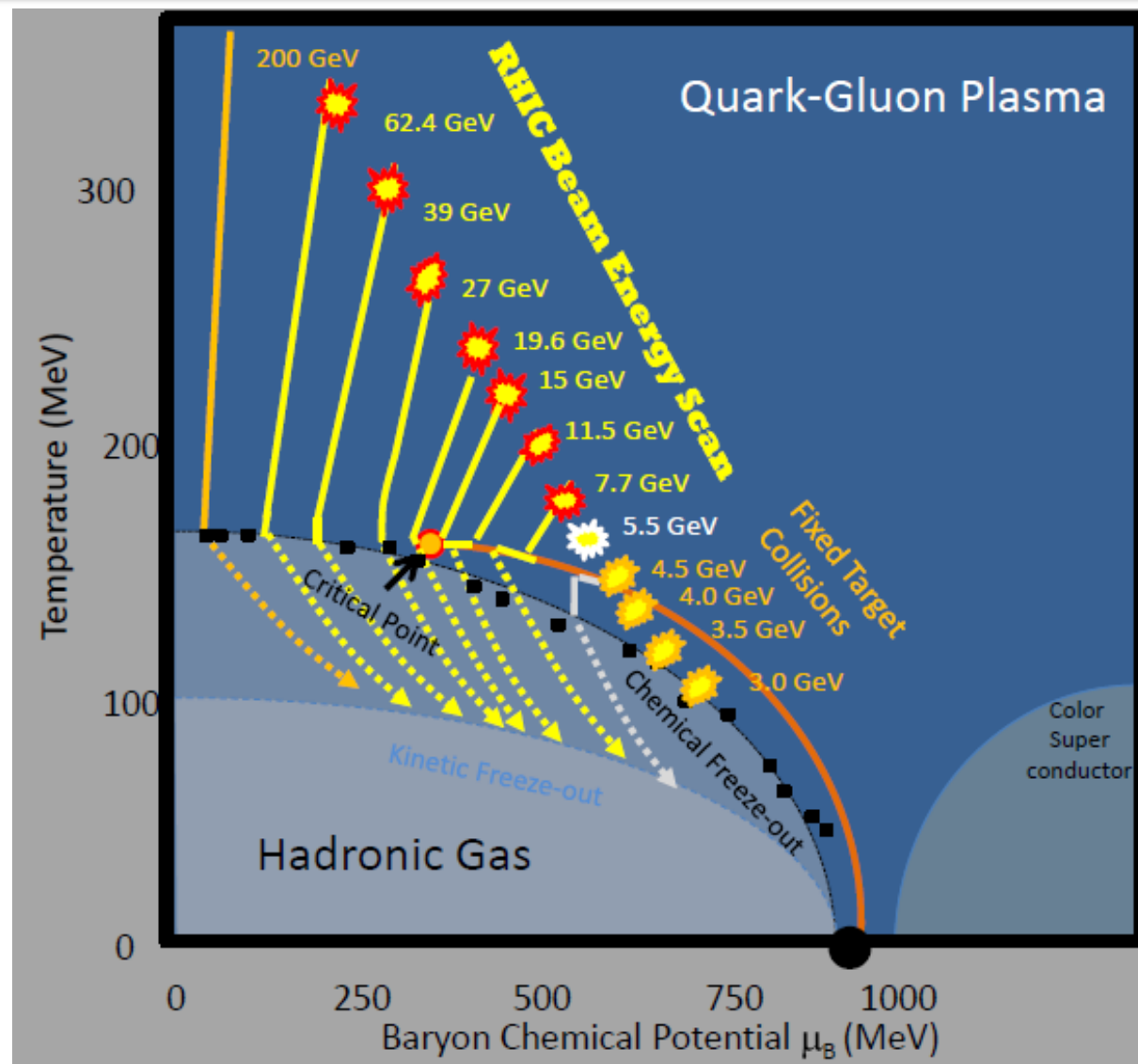
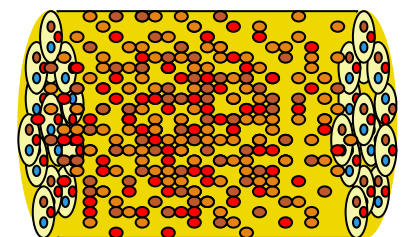
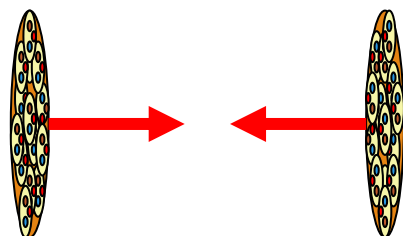
- 高能碰撞

- 真空加热
- 温度高



- 低能碰撞

- 物质压缩
- 密度高

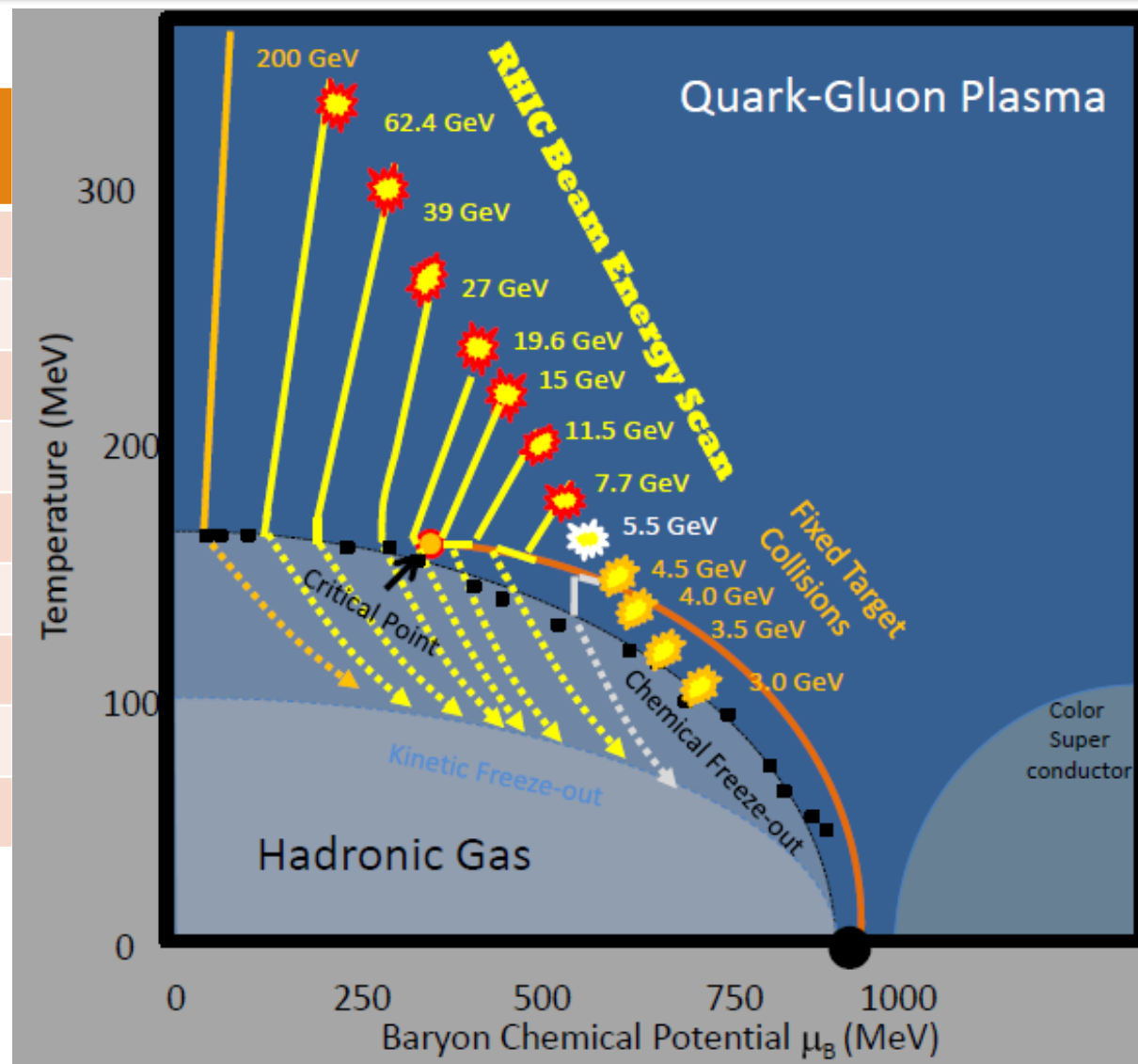


RHIC束流能量扫描一期(BES-I)项目

◦ 2010–2017, $\mu_B = 20\text{--}420\text{ MeV}$

$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)	事例数 (10^6)	年份	$\mu_{B,CH}$ (MeV)	T_{CH} (MeV)
200	238	2010	25	166
62.4	46	2010	73	165
54.4	1200	2017	83	165
39	86	2010	112	164
27	30	2011	156	162
19.6	15	2011	206	160
14.5	13	2014	264	156
11.5	7	2010	315	152
7.7	3	2010	420	140

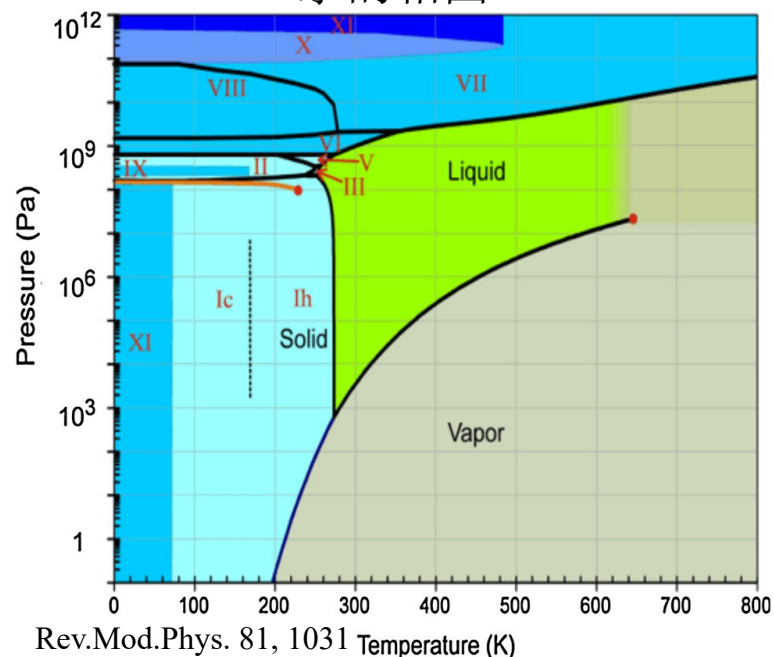
化学冻结处(μ_B, T)($\sqrt{s_{NN}}$)来自PRC 73, 034905



临界现象

- 密度涨落增大：临界乳光
- 关联长度(ξ)发散：比热容(c_v)，感应系数(susceptibility, χ)，压缩系数(κ)
- 重离子碰撞系统：有限空间和时间尺度、非热平衡态

水的相图



首次发现临界点， CO_2 $T_c = 31^\circ\text{C}$

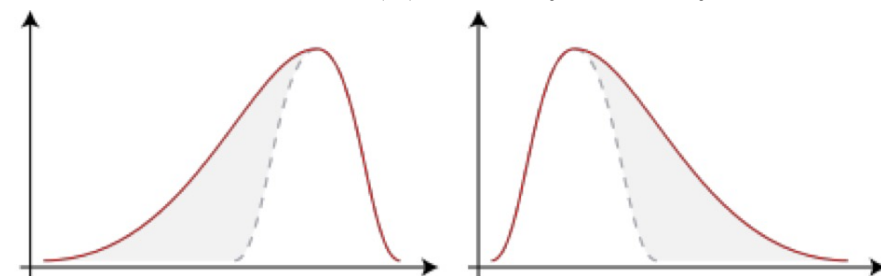


- 有守恒荷, 如净重子数(B)、净电荷数(Q)和净奇异数(S)
- 对巨正则系综, $\frac{P}{T^4} = \frac{1}{VT^3} \ln Z(V, T, \mu_B, \mu_Q, \mu_S)$
 - Z : QCD配分函数
 - μ_B, μ_Q, μ_S : 重子、电荷和奇异化学势
- 感应系数 $\chi_{ijk}^{BQS} = \frac{\partial^{i+j+k}}{\partial \hat{\mu}_B^i \partial \hat{\mu}_Q^j \partial \hat{\mu}_S^k} \frac{P}{T^4}$
 - $\hat{\mu}_q = \frac{\mu_q}{T}, q = B, Q, S$
- 累积矩 $C_{ijk}^{BQS} = \frac{\partial^{i+j+k} \ln Z(V, T, \mu_B, \mu_Q, \mu_S)}{\partial \hat{\mu}_B^i \partial \hat{\mu}_Q^j \partial \hat{\mu}_S^k} = VT^3 \chi_{ijk}^{BQS}$

实验观测量

- $\delta N_q = N_q - \langle N_q \rangle$, $q = B, Q, S$
 - 实验上分别以净质子数和净K介子数代替B和S
- $C_1^q = M = \langle N_q \rangle = VT^3 \chi_1^q$
- $C_2^q = \sigma^2 = \langle (\delta N_q)^2 \rangle = VT^3 \chi_2^q$
- $C_3^q = S\sigma^3 = \langle (\delta N_q)^3 \rangle = VT^3 \chi_3^q \propto \xi^{4.5}$
- $C_4^q = \kappa\sigma^4 = \langle (\delta N_q)^4 \rangle - 3 \langle (\delta N_q)^2 \rangle^2 = VT^3 \chi_4^q \propto \xi^7$
- 不依赖于系统的体积: $\frac{C_3^q}{C_2^q} = S\sigma = \frac{\chi_3^q}{\chi_2^q}$, $\frac{C_4^q}{C_2^q} = \kappa\sigma^2 = \frac{\chi_4^q}{\chi_2^q}$

Skewness (S) $\rightarrow$ Asymmetry

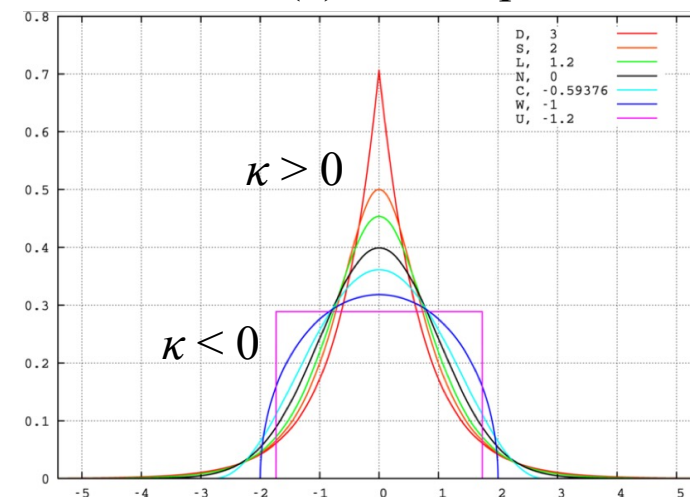


Negative Skew

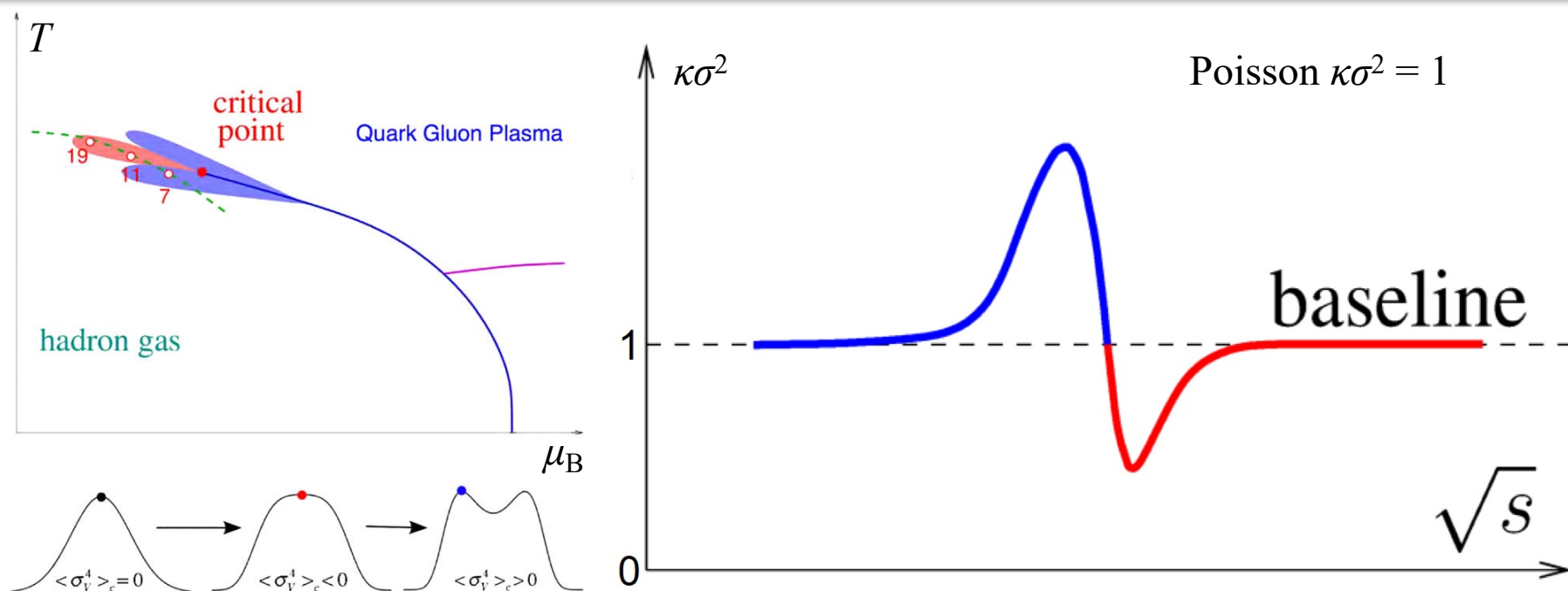
Positive Skew

Gaussian $S = \kappa = 0$ ($C_3 = C_4 = 0$)

Kurtosis (κ) $\rightarrow$ Sharpness



临界信号



PRL 107, 052301
JPG 38, 124147
PRD 85, 034027
PRD 93, 034037
PRD 94, 116020
PRD 95, 014038
IJMPA 32, 1750061
EPJC 78, 138
EPJC 79, 245
Phys. Rep. 853, 1
PRC 103, 034901

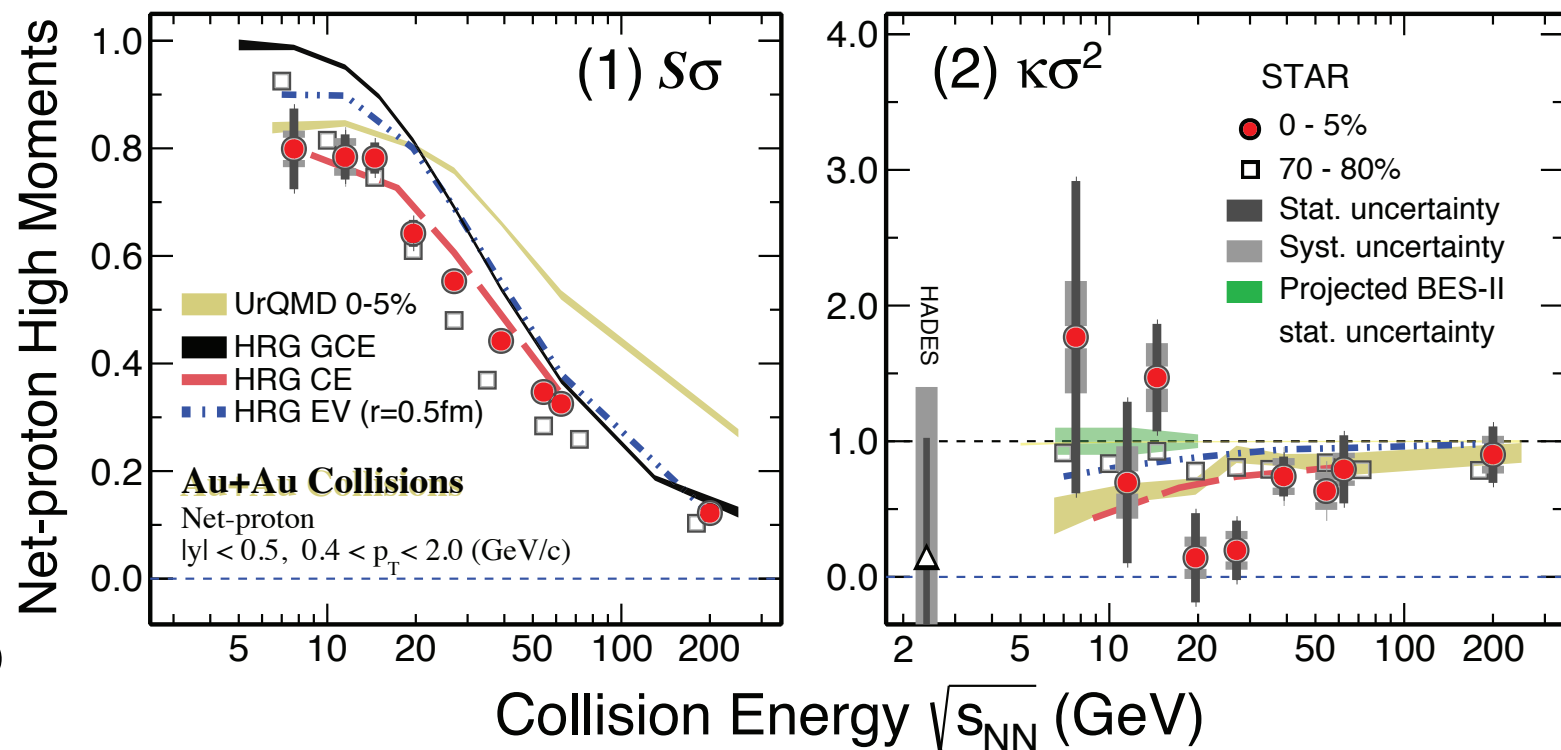
- 改变碰撞能量，系统穿过临界区，观测量将受到负（红）和正（蓝）的贡献
- 观测量对碰撞能量的依赖表现出非单调行为

现有测量结果

- 净质子数前四阶累积矩
- RHIC BES-I $\sqrt{s_{NN}} = 7.7\text{--}200$ GeV
- C_4/C_2 非单调的能量依赖（显著性3.1倍标准差），偏离无临界效应的模型
- 19.6 GeV以下统计误差大，缺少7.7 GeV以下的观测

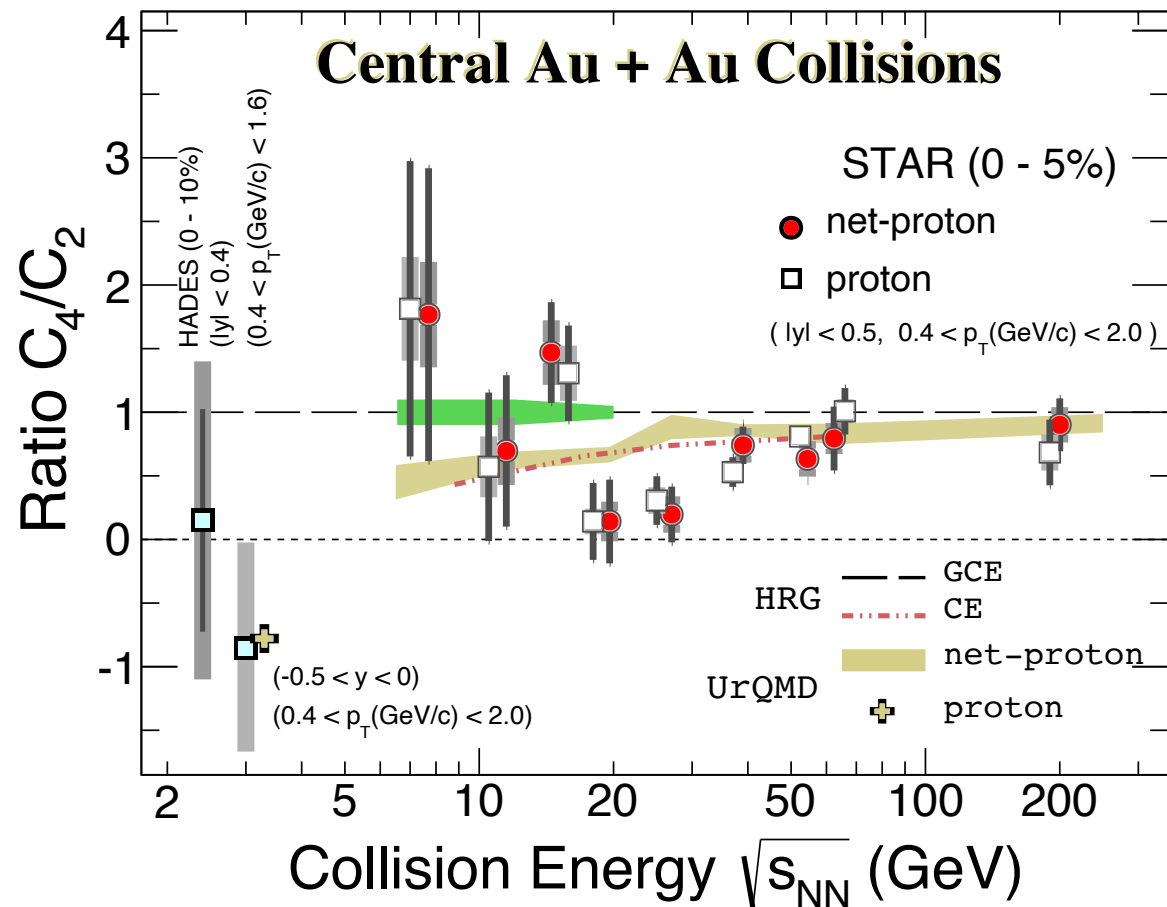
- STAR Collaboration,
PRL 126, 092301 (2021),
PRC 104, 024902 (2021)

- GCE巨正则系综
- CE正则系综
- UrQMD极端相对论量子
分子动力学（输运模型）



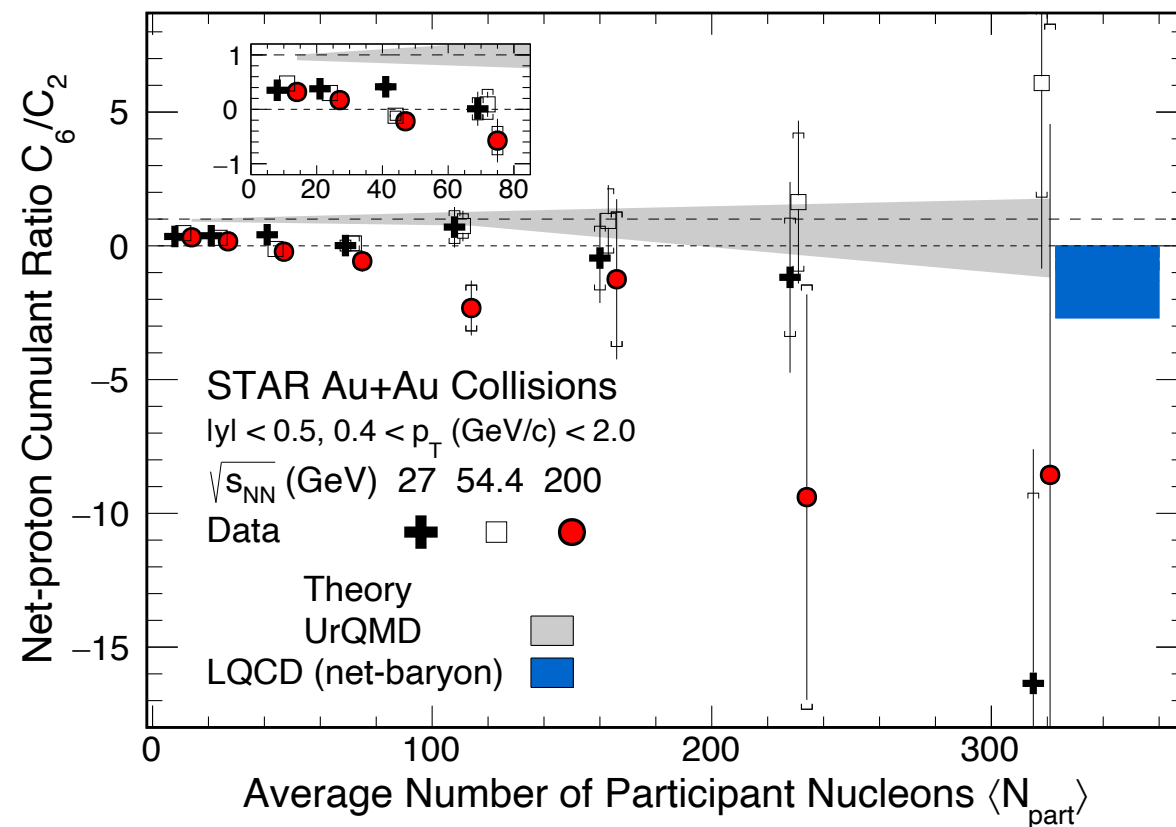
现有测量结果

- 净质子数前四阶累积矩
- RHIC FXT $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 3.0$ GeV
- 明显低于更高能量的结果
- 偏离Poisson/GCE基线2倍标准差
- 符合重子数守恒驱动(UrQMD/CE)
- 说明QCD临界若存在, 则高于3.0 GeV
- 缺少3.0–7.7 GeV之间的测量
- STAR Collaboration, arXiv:2112.00240



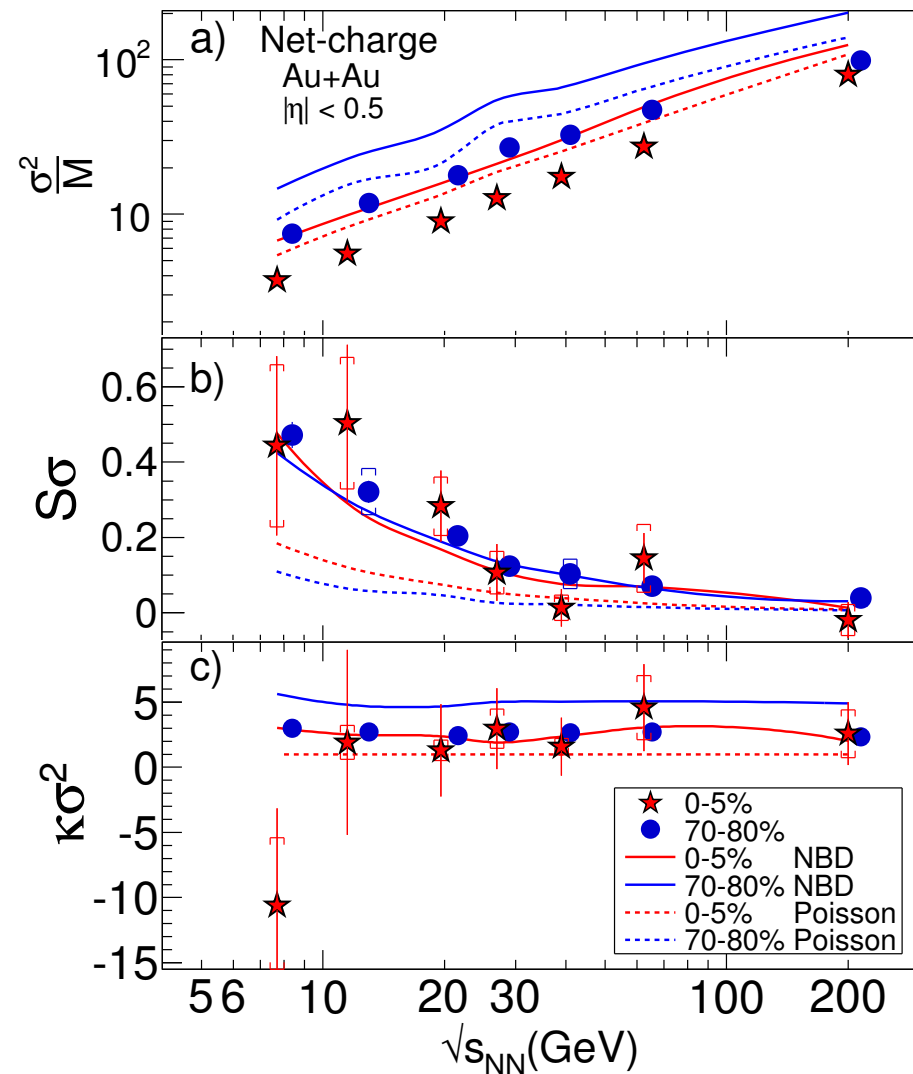
现有测量结果

- 净质子数六阶累积矩
- RHIC BES-I $\sqrt{s_{NN}} = 27, 54.4, 200$ GeV
- C_6/C_2 的符号与相图平滑过渡区相关
 - 27和54.4 GeV结果与0符合
 - 200 GeV结果 < 0 , 偏心 $\rightarrow$ 中心逐渐下降
- 强子共振气体(HRG)模型预言 > 0
- QCD相关模型和格点QCD计算 < 0
- STAR Collaboration, PRL 127, 262301 (2021)



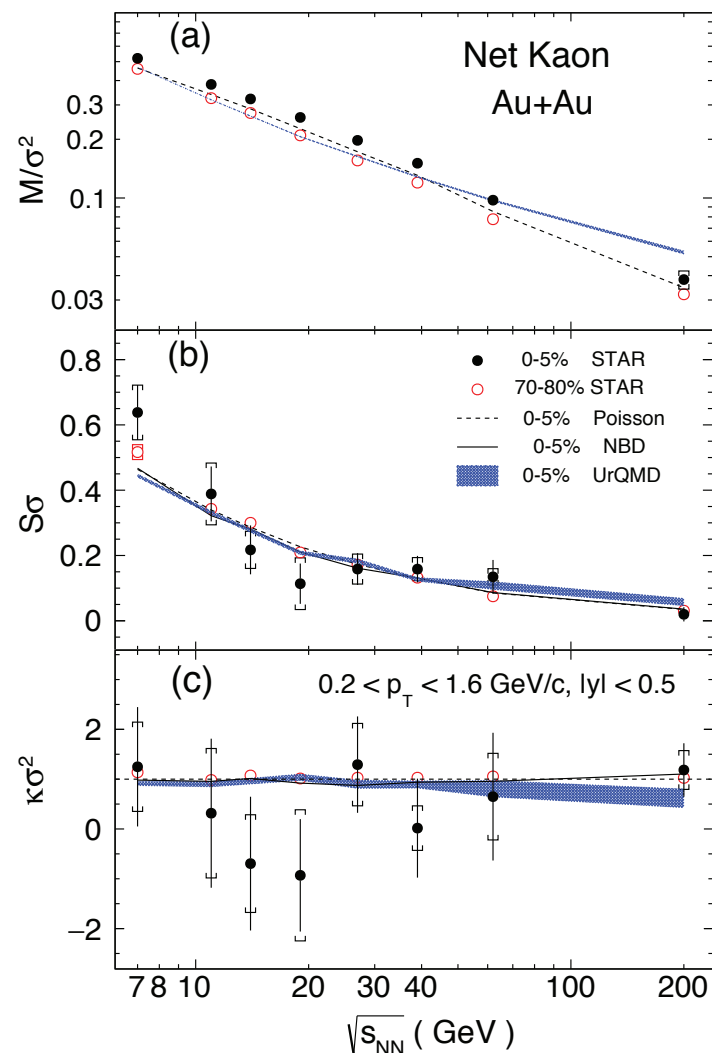
现有测量结果

- 净电荷数前四阶累积矩
- RHIC BES-I $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 7.7\text{--}200\text{ GeV}$
- STAR Collaboration, PRL 113, 092301 (2014)
- 没有观测到非单调的能量依赖



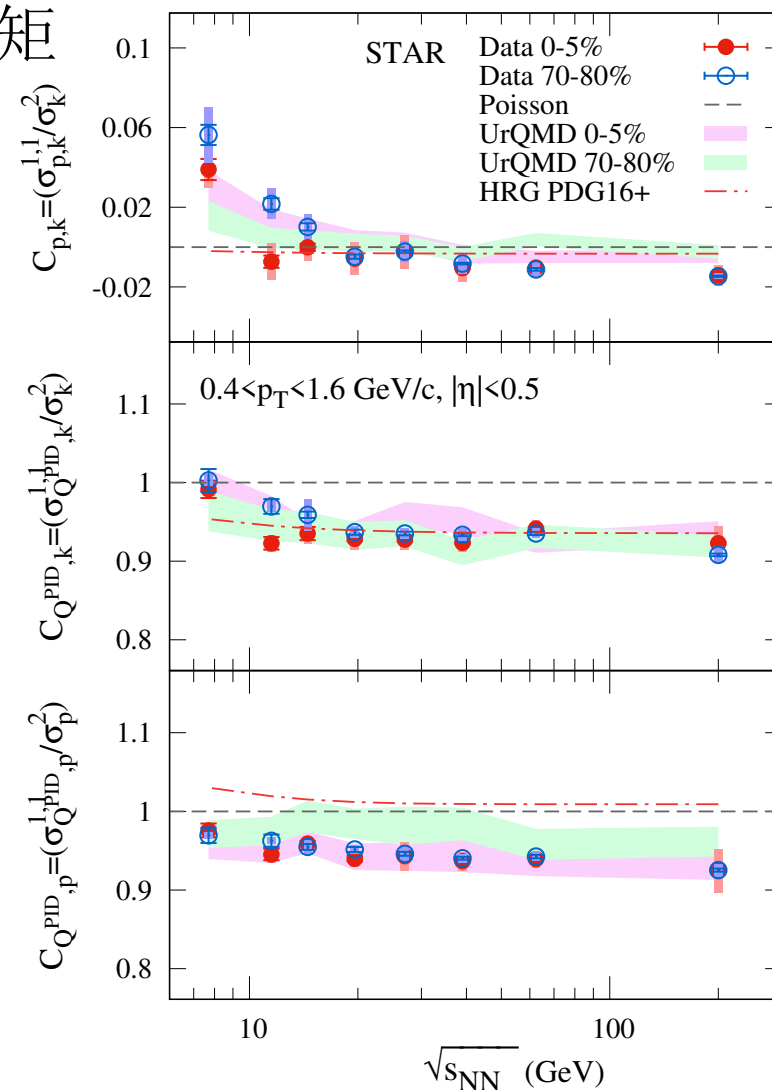
现有测量结果

- 净K介子数前四阶累积矩
- RHIC BES-I $\sqrt{s_{NN}} = 7.7-200$ GeV
- STAR Collaboration, PLB 785, 551 (2018)
- 误差范围内与Poisson/NBD/UrQMD符合
- 没有观测到非单调的能量依赖
- 净K介子数涨落敏感性 < 净质子数 ($m_s > m_{u,d}$)
- 需要更多统计，尤其是低能区



现有测量结果

- 净电荷数、净质子数和净K介子数的二阶非对角累积矩
- RHIC BES-I $\sqrt{s_{NN}} = 7.7\text{--}200\text{ GeV}$
- STAR Collaboration, PRC 100, 014902 (2019)
 - Erratum: PRC 105, 029901 (2022)
- 与模型计算相符合
- 没有明显的中心度和能量依赖



RHIC束流能量扫描二期(BES-II)和固定靶项目

◦ 对撞模式(BES-II 2018–2021)

$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)	事例数 (10 ⁶)	年份 (BES-I/II)	$\mu_{B,CH}$ (MeV)	T_{CH} (MeV)
200	238	2010	25	166
62.4	46	2010	73	165
54.4	1200	2017	83	165
39	86	2010	112	164
27	30/560	2011/2018	156	162
19.6	15/582	2011/2019	206	160
17.1	/250	/2021	230	158
14.5	13/324	2014/2019	264	156
11.5	7/235	2010/2020	315	152
9.2	/162	/2020	373	146
7.7	3/100	2010/2021	420	140

◦ 固定靶(FXT)模式

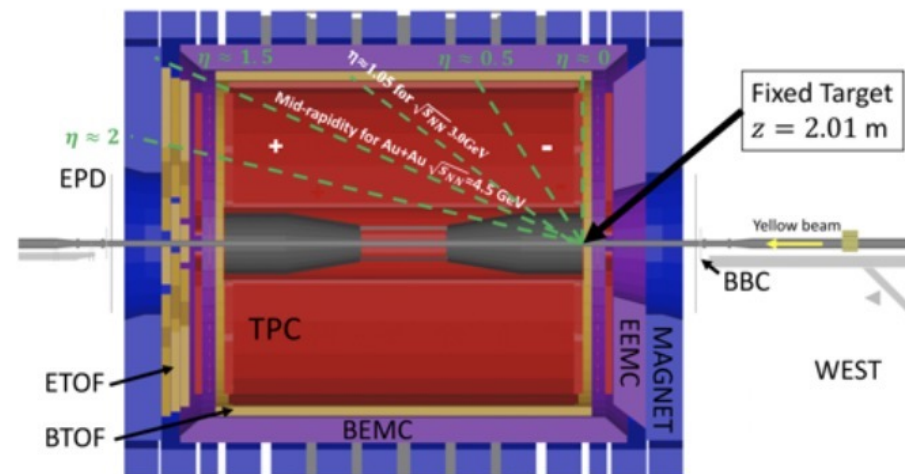
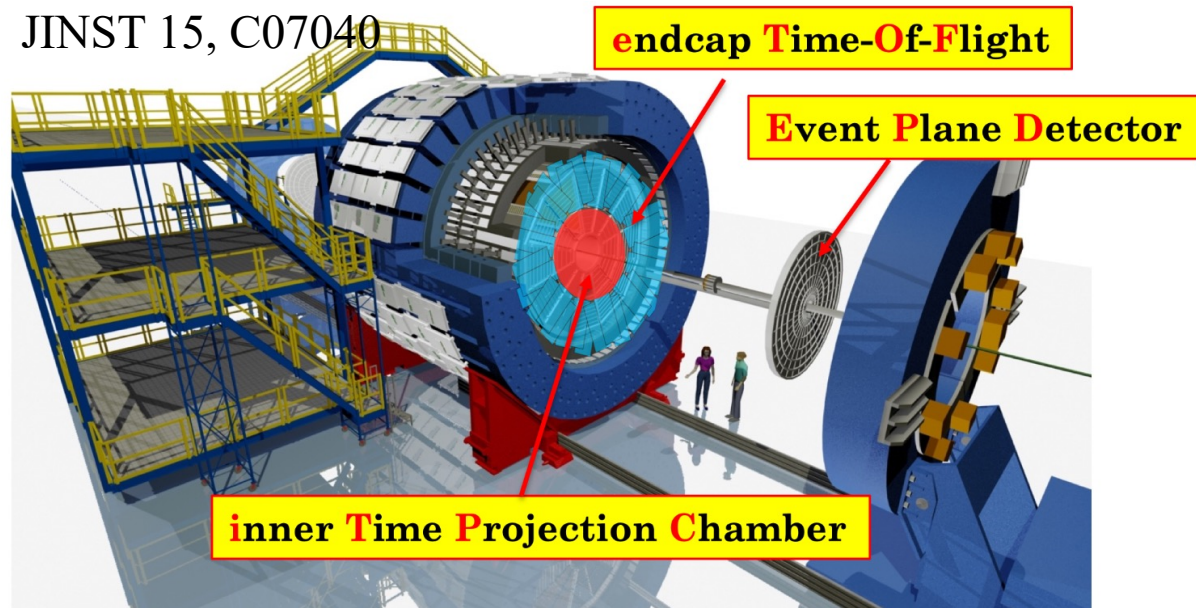
STAR beam use request

$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)	事例数 (10 ⁶)	年份 (FXT)	$\mu_{B,CH}$ (MeV)	T_{CH} (MeV)
13.7	50	2021	276	155
11.5	50	2021	315	152
9.2	50	2021	355	140
7.7	50+112	2019+2020	420	140
6.2	118	2020	487	130
5.2	103	2020	541	121
4.5	108	2020	589	112
3.9	117	2020	633	102
3.5	116	2020	666	93
3.2	200	2019	699	86
3.0	259+2300	2018+2021	720	80

更大能量范围($\sqrt{s_{NN}} = 3.0\text{--}200$ GeV), 更高重子密度($\mu_B = 20\text{--}720$ MeV), 更多事例统计(10倍以上于BES-I)

STAR探测器系统升级

- iTPC
 - 更大接收度 $|\eta| < 1.5$
 - 更高径迹重建效率
- eTOF
 - 大赓快速度 $2.5 < |\eta| < 4$ 粒子鉴别
- EPD
 - $2.1 < |\eta| < 5.1$
 - 事例平面重建
 - 探测旁观者粒子，排除堆叠事例
- 大赓快速度探测器对FXT实验非常重要



研究内容

- 实验数据： RHIC BES-II和FXT项目， STAR实验测量
- 碰撞系统： 高重子密度($\sqrt{s_{\text{NN}}} = 3.0\text{--}19.6 \text{ GeV}$)金核-金核碰撞
- 观测量： 净质子数、净K介子数或净电荷数的逐事例分布和高阶累积矩
- 预期成果
 - 在3.0–7.7 GeV之间填补测量空白
 - 在7.7–19.6 GeV之间增加新能量的测量
 - 在7.7–19.6 GeV之间的既有能量，减小测量结果的不确定度
 - 精确观测能量依赖，有望发现QCD相变临界信号及临界点在相图中的位置。

研究方法

- 探测器
 - TPC: 参考粒子多重数定义, 径迹筛选 (最短接近距离、动量等), 粒子鉴别 (能量损失)
 - TOF: 堆叠事例排除, 粒子鉴别 (飞行时间)
 - EPD: 堆叠事例排除
- 以研究净质子数为例:
 - 1. 筛选触发器, 排除不合格运行段
 - 2. 排除堆叠事例, 筛选高质量事例
 - 3. 对TPC和TOF鉴别质子和反质子的参量进行刻度修正

研究方法

- 4. 定义参考粒子多重数，确定碰撞中心度
 - 压低体积涨落效应
 - 避免自关联效应
- 5. 筛选高质量径迹，确定动量接收度，鉴别质子和反质子
- 6. 计算探测器对质子和反质子的探测效率
 - TPC寻迹效率、TPC粒子鉴别效率和TOF效率
- 7. 提取净质子数的逐事例分布，并计算高阶累积矩及其比值
 - 中心度区间宽度修正
 - 体积涨落修正
 - 堆叠修正
 - 逐径迹效率修正

研究方法

- 8. 估计误差
 - 统计误差：解析法或自举法
 - 系统误差：改变径迹筛选条件
- 9. 在不同接收度下重复以上步骤，得到接收度依赖的结果
- 10. 利用相关理论模型得到模拟结果，并将之与实验结果进行比较
- 11. 对不同碰撞能量的实验数据重复以上步骤，得到能量依赖的结果

研究创新点

- 新碰撞能量
 - 填补3.0–7.7 GeV之间的测量空白
 - 增加7.7–19.6 GeV之间的能量点
 - 减小既有能量的结果的统计误差
- 新探测器
 - iTPC：提高径迹重建效率
 - 减小测量的不确定度
 - 增大粒子多重数，使中心度定义更加准确，压低体积涨落效应
 - iTPC和eTOF：扩大接收度
 - 对撞实验：研究大快度的粒子
 - 固定靶实验：研究完整中心快度的粒子
 - eTOF和EPD：帮助排除堆叠事例，或估计其所占比例（用于堆叠修正）

研究创新点

- 堆叠效应处理
 - 先前通常方法：从TPC-TOF粒子数二维分布中排除不正常区域
 - 本课题方法
 - 从TPC粒子数-EPD最小电离粒子数二维分布中排除不正常区域
 - 估计堆叠事例比例，使用堆叠修正
- 体积涨落效应处理
 - 先前通常方法：参考粒子多重数定义，中心度区间宽度修正
 - 本课题方法：拟采用体积涨落修正，检验其可行性及效果
- 探测器效率修正和统计误差估计
 - 先前通常方法：区间平均效率修正+解析法，或逐径迹效率修正+自举法
 - 本课题方法：逐径迹效率修正+解析法

研究进度安排

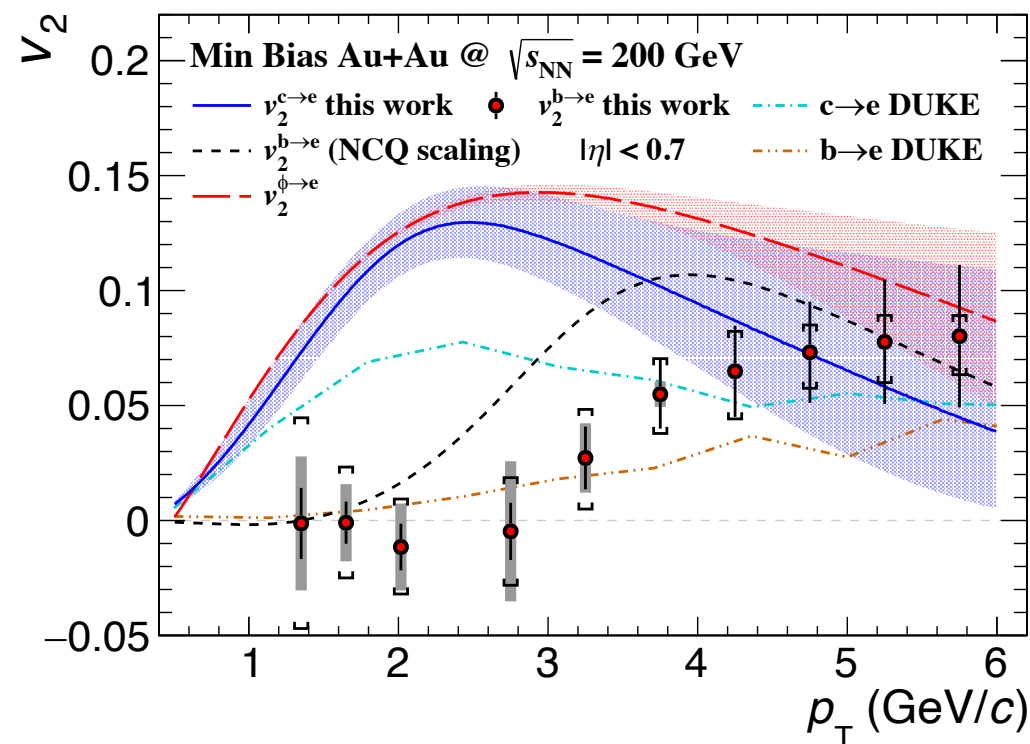
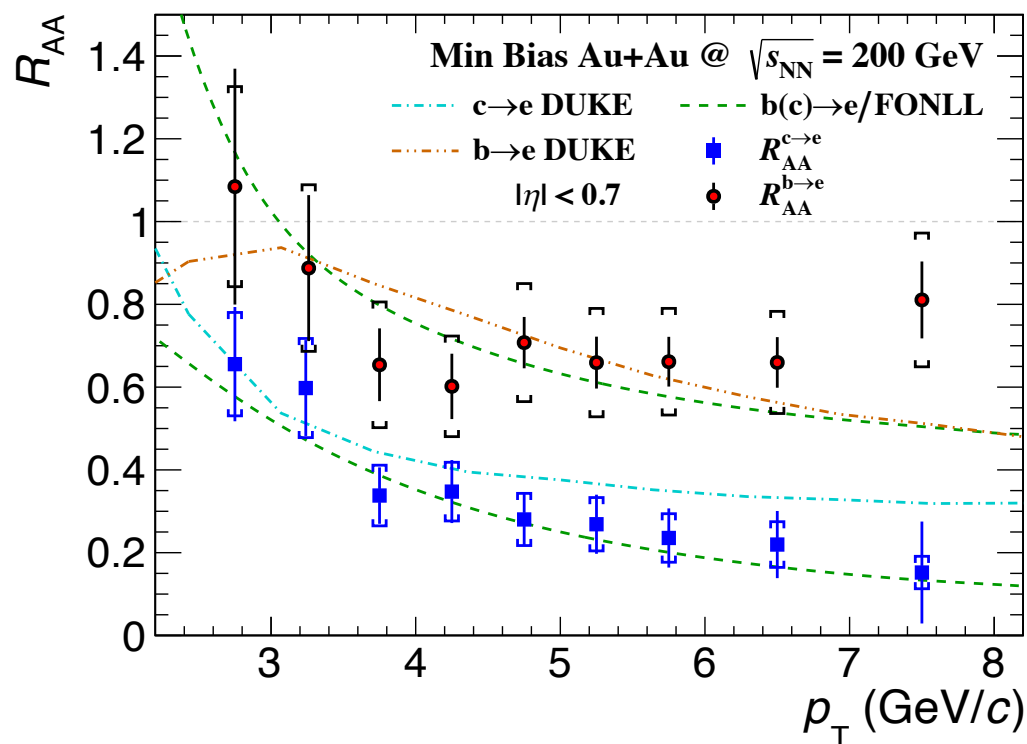
- 2022.4–2022.5: 从已产生的数据中选择合适的数据集，并对其作预分析，筛选触发器，排除不合格运行段，筛选高质量事例，确定如何排除堆叠事例
- 2022.6: 对TPC和TOF的粒子鉴别参量进行刻度修正
- 2022.7: 定义参考粒子多重数，使用Glauber模型模拟并拟合多重数分布，确定碰撞中心度
- 2022.8–2022.9: 筛选高质量径迹，确定动量接收度，鉴别质子和反质子，提取原始的净质子数的逐事例分布、高阶累积矩及比值
- 2022.10: 计算对质子和反质子的TPC寻迹效率、TPC粒子鉴别效率和TOF效率

研究进度安排

- 2022.11–2022.12: 提取经过中心度区间宽度修正、堆叠修正和逐径迹效率修正的净质子数高阶累积矩及其比值，同时使用解析法估计统计误差
- 2023.1: 应用体积涨落修正，检验其可行性及效果，并确定是否需要使用
- 2023.2–2023.4: 改变径迹筛选条件和动量接收度，计算系统误差，并得到测量结果的接收度依赖
- 2023.5: 使用相关理论模型，将模拟结果与实验结果进行比较
- 2023.6–2023.9: 使用相同方法分析新产生的数据，观测能量依赖
- 2023.10–2024.3: 撰写毕业论文

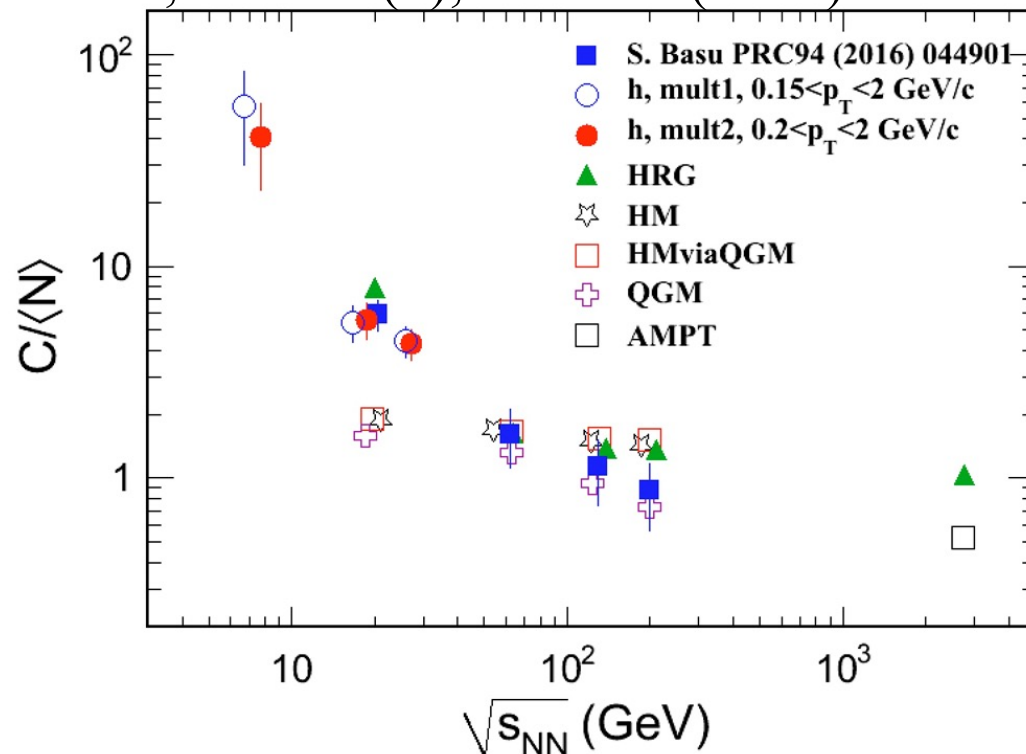
相关研究工作

- 底夸克在 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV热密核物质中性质的研究
 - 从RHIC能区混合重味衰变电子的横动量谱、核修正因子和椭圆流中数据驱动地分离来自粲和底的贡献
 - 底夸克在RHIC能区热密核物质中能量损失小于粲夸克，且很有可能未完全热化
 - 相关成果：F. Si *et al.*, PLB 805, 135465; F. Si *et al.*, NPR 37(3), 684-689



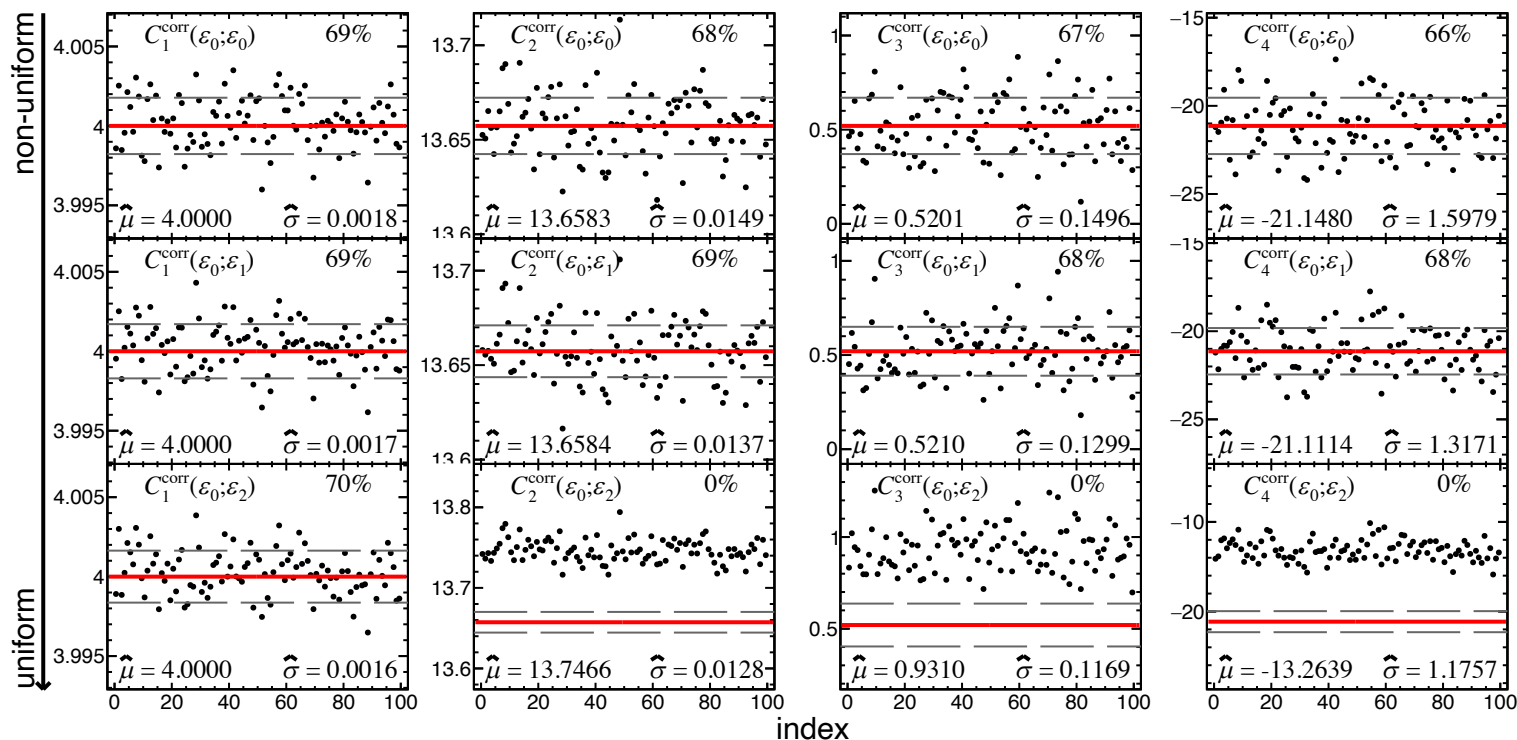
相关研究工作

- RHIC BES-I能区系统温度涨落和比热容的研究
 - 从STAR实验数据中提取逐事例的平均横动量和有效温度的涨落，从涨落的动力学部分中计算系统比热容
 - 符合已有测量的能量依赖趋势，没有发现临界信号
 - 相关成果：X. Li, F. Si *et al.*, NPR 36(4), 395-399 (2019)



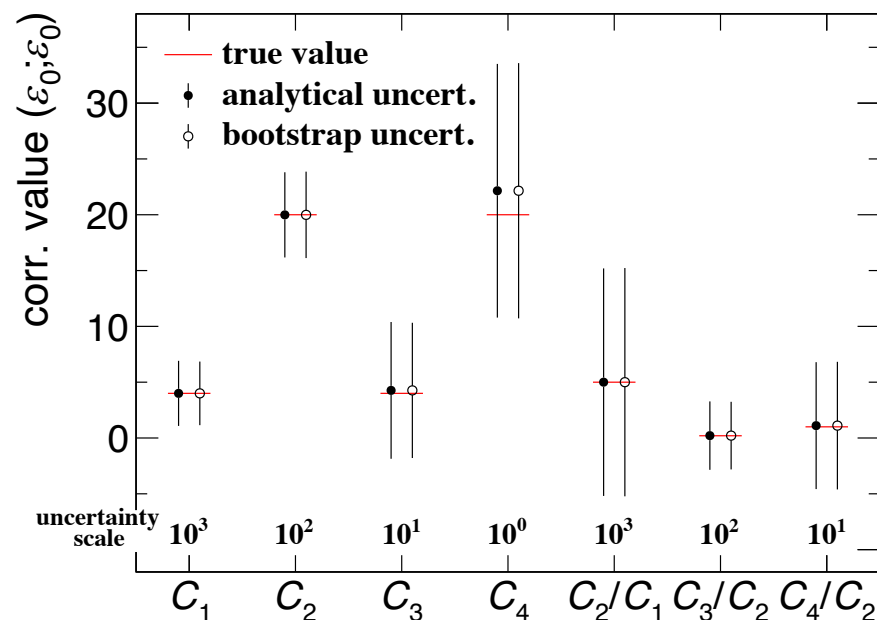
相关研究工作

- 相对论重离子碰撞中不均匀测量效率对守恒荷高阶累积矩的影响的研究
 - 解析地证明使用具有不同均匀性的效率修正高阶累积矩的可行性，并使用蒙特卡洛模拟验证结论
 - 可行的修正效率：对各个相空间内带有相同守恒荷的粒子分别平均的效率
 - 相关成果：F. Si *et al.*, CPC 45, 124001



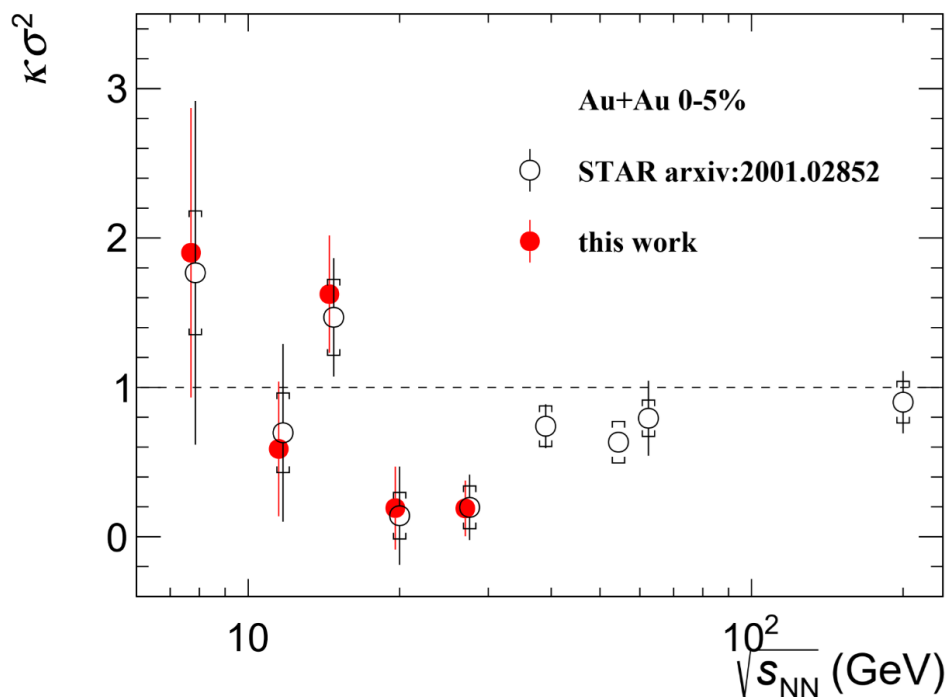
相关研究工作

- 相对论重离子碰撞中在有限效率下守恒荷高阶累积矩的统计误差的研究
 - 对逐径迹效率修正导出相配套的解析法估计统计误差，解析地分解误差的成分并研究其依赖，结论通过蒙特卡洛模拟验证
 - 相比自举法提升计算效率 10^6 倍以上，统计误差依赖于初始涨落、测量效率的均值和修正效率的不均匀性
 - 相关成果：F. Si *et al.*, PRC 105, 024907

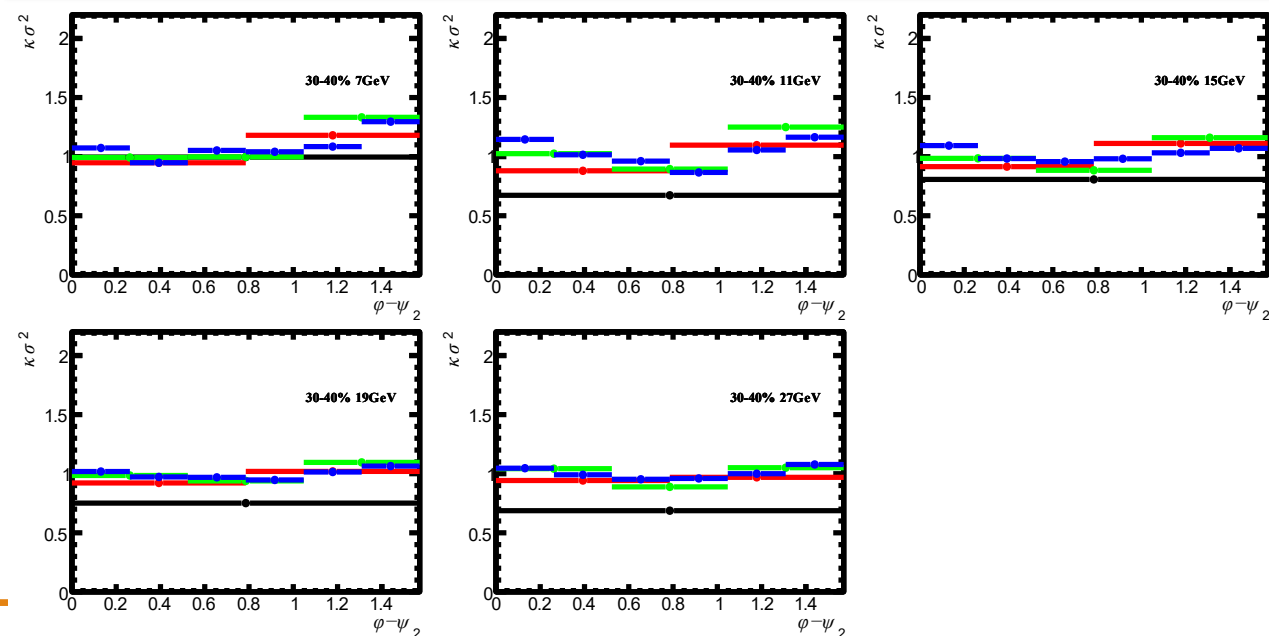


相关研究工作

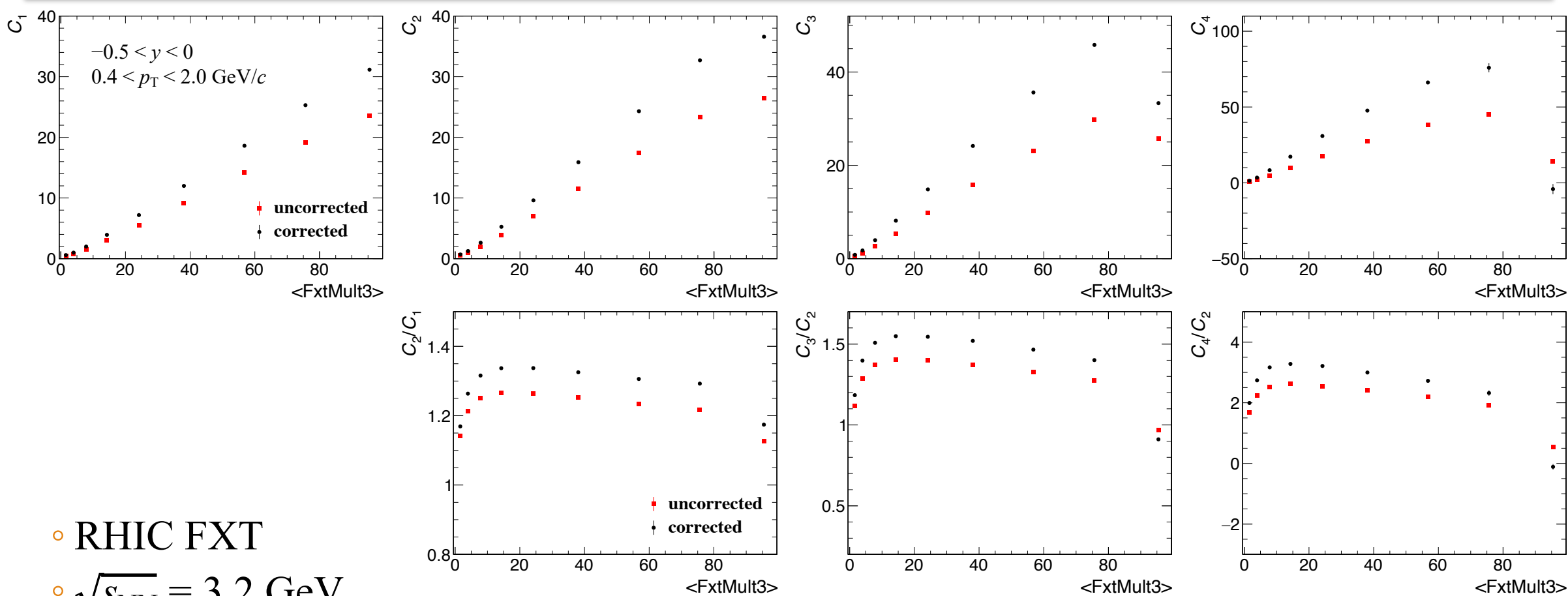
- RHIC BES-I能区净质子数的逐事例涨落的研究
 - 从STAR实验数据中提取净质子数的逐事例涨落的高阶累积矩，重复STAR已发表结果的分析，并研究测量结果的方位角依赖
 - 分别采用区间平均效率修正（已发表结果使用）和逐径迹效率修正（新）均可复现测量结果，观测到方位角依赖趋于泊松基线



$\kappa\sigma^2 @ 7.7 \sim 27$ GeV (30-40%)



当前工作进度



- RHIC FXT
- $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 3.2 \text{ GeV}$
- 已从STAR测量数据中得到净质子数高阶累积矩的初步结果
- 将做进一步修正和检验，并逐步分析其它碰撞能量的数据

总结

- 实验寻找QCD相变临界点是相对论重离子碰撞领域的重要课题和热门方向
- RHIC BES-II和FXT等高重子密度重离子碰撞实验提供了前所未有的机遇
- 碰撞系统守恒荷的逐事例涨落及其高阶累积矩被认为是临界信号的理想探针
- 本课题
 - 基于STAR实验测量自RHIC BES-II和FXT项目高重子密度区的金核-金核碰撞的数据
 - 提取守恒荷观测量（净质子数、净K介子数或净电荷数）的逐事例分布，并计算其高阶累积矩
 - 得益于新碰撞能量和更大统计的数据、升级的探测器系统以及全面的数据分析和修正方法
 - 有望发现QCD相变临界信号及临界点在相图中的位置