

## 摘要

强相互作用力(也被称为核力),是自然界四种基本相互作用力之一,它将核子(质子与中子)束缚形成原子核并支配着自然界中 90% 以上的可见物质。量子色动力学 (Quantum Chromodynamics, QCD)是描述强作用力的现代理论。组成物质的基本单元—夸克与胶子,被强作用力禁闭在核子中,因此在自然界没有发现自由的夸克与胶子。高温高密核物质相图是核物理研究领域的前沿和热点。格点 QCD 预言在高温低重子密度区域,强子物质和夸克胶子等离子体之间发生的相变是平滑穿越,而基于量子色动力学(QCD)有效模型计算表明在高重子密度区域,他们之间是一阶相变。因此,如果平滑穿越和一阶相变边界真的如理论所预言,那么在一阶相变边界延伸到平滑穿越区一定会存在一个终结点,被称为 QCD 相变临界点。QCD 临界点的实验确认将是探索强相互作用物质相结构的里程碑,具有重要科学意义。为了在这一具有潜在重大发现的研究方向上占据领先地位、取得突破,各个国家纷纷建造大型粒子探测器、开展重离子碰撞实验(包括:美国 RHIC-STAR 能量扫描实验,德国 CBM 实验、俄罗斯 NICA 实验、日本 J-PARC 实验以及中国兰州 CSR 外靶 CEE 实验),其主要物理目标就是研究高温高密核物质相图结构、寻找 QCD 相变临界点。

在束流能量扫描 (BES) 项目的第一阶段,位于美国布鲁克海文国家实验室的相对论重离子对撞机 (RHIC) 使用 STAR 探测器,通过加速重离子完成了金金每核子对的质心碰撞能量为 7.7, 11.5, 14.5, 19.6, 27, 39, 54.4, 62.4 和 200 GeV 的数据采集。这就使我们能够探索相图中比较宽广的区域,有利于临界点的寻找。

在这篇论文中,我们完成了在金金对撞中质心碰撞能量为  $\sqrt{s_{NN}} = 7.7 - 200$  GeV, 在中心快度区间 ( $|y| < 0.5$ ) 和横动量区间为  $0.4 < p_T < 2.0$  GeV/c 内, 质子,反质子和净质子数分布的直到四阶累积矩以及它们的比值和(反)质子的关联函数的测量;铜铜碰撞中,质心碰撞能量为  $\sqrt{s_{NN}} = 22.4, 62.4$  和 200 GeV 下,在中心快度区间 ( $|y| < 0.5$ ) 和横动量区间为  $0.4 < p_T < 0.8$  GeV/c 内,质子,反质子和净质子数分布的直到四阶累积矩以及它们的比值;金金碰撞固定靶实验中碰撞能量为  $\sqrt{s_{NN}} = 4.5$  GeV 下,在快度区间为  $-2 < y < 0$  和横动量区间为  $0.4 < p_T < 2.0$  GeV/c 内, (反) 质子数分布的直到四阶累积矩以及它们的比值。

各阶累积矩和它们的比值可以表示为碰撞中心度,快度和横动量和能量的函数。我们观察到在最中心 (0 – 5%) 金金碰撞中,  $C_4/C_2$  这一比值随着能量呈现出非单调变化的趋势,其偏离值为  $3.1\sigma$ 。为了理解横动量接受度,净重子与净质子和净重子数守恒的影响,在 STAR 接受度范围中进行了输运模型 UrQMD 和强子共振气体 (HRG) 模型计算。金金碰撞中  $C_3/C_2$  和  $C_4/C_2$  的 UrQMD 和 HRG 模型计算显示出随着能量的单调变化。我们也与具有 QCD 相变临界点的模型相比较,发现实验测量得到的  $C_4/C_2$ , 其碰撞能量的依赖性符合理论模型的预期结果。此外,从测得的累积量中,我们提取出质子和反质子的关联函数,发现质心能量在 7.7 GeV 时中心碰撞中质子分布的  $C_4/C_2$  值增大是由于四粒子关联。我们在 RHIC 第一阶段能量扫描的守恒荷涨落测量中,首次观测到净质子数四阶涨落对碰撞能量的非单调依赖 ( $3.1\sigma$  显著性),该实验测量为寻找 QCD 相变临界点提供了重要实验依据,也为 RHIC

第二阶段能量扫描以及 STAR 固定靶实验中守恒荷涨落的高精度测量奠定了基础。

这篇文章组织结构如下。第一章主要介绍了分析的目的和实验中所需要的观测量，以及这些量在统计与概率中的表示。在第二章中，我们简单介绍了 RHIC 上的 STAR 探测器及其子探测器的结构和功能。第三章中主要介绍了在实验分析中的细节，数据选择，事件选择，粒子鉴别，中心度的定义，以及净质子数的分布和模型简介。第四章主要研究了一些效应对于结果的影响，例如中心度宽度修正和有限探测器效率修正。最后一章中我们将会呈现实验的计算结果，包括在金金对撞中的质心系模式和固定靶模式以及铜铜对撞， 并进行讨论和实验的发展前景。

关键词：重离子碰撞；QCD 相变；QCD 临界点；高阶矩；关联函数