基于HIAF集群的QCD相结构研究

马余刚^{1,2*}, 许怒^{3,4*}, 刘峰^{3*}

1. 复旦大学核科学与技术系, 现代物理研究所, 核物理与离子束应用教育部重点实验室, 上海 200433;

2. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;

3. 华中师范大学物理科学与技术学院, 武汉 430079;

4. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000

*联系人, 马余刚, E-mail: mayugang@fudan.edu.cn; 许怒, E-mail: nxu@impcas.ac.cn; 刘峰, E-mail: fliu@mail.ccnu.edu.cn

收稿日期: 2020-08-06; 接受日期: 2020-09-03; 网络出版日期: 2020-10-13

国家自然科学基金(编号: 11890710, 11421505)和中国科学院先导B研究项目(编号: 34030200)资助

摘要 相对论重离子碰撞(又称高能核-核碰撞)为研究极端条件下核物质内禀性质、致密星体内部结构和大爆炸之后宇宙的早期演化过程提供了途径. 强相互作用的量子色动力学(QCD)理论预言存在着解禁闭的新物质状态夸克-胶子等离子体(QGP). 经过近30年的努力, 在极端相对论能区的核-核碰撞实验中, 包括RHIC和LHC的实验, 科学家找到了QGP存在的证据. 目前, 高能核物理的一个重要的科学问题是高重子密度区的相结构, 包括寻找相边界和可能存在的QCD临界点. 量子热动力学基本原理告诉我们只有找到相边界或临界点才能最终确定新的物质相QGP的存在. 我们首先回顾了高能核物理实验的研究现状, 其中包括RHIC能量扫描实验中的强子集体运动、手征特性的研究和QCD临界点的寻找. 然后对利用我国重离子加速器群, 如Heavy Ion Research Facility in Lanzhou (HIRFL)和High Intensity heavy-ion Accelerator Facility (HIAF)以及CSR-External-target Experiment等开展高能核物理实验研究进行了展望.

关键词 量子色动力学, 相结构, 临界点, 手征性, 集体流, 核碰撞

PACS: 25.75.-q, 25.75.Ld, 12.38.Gc, 11.30.Rd

1 引言

高重子密度区开展的QCD相结构研究是重要的科学问题, 为此STAR国际合作组于2010年开始就在相对论重离子对撞机(RHIC)上进行了第一期能量扫描(BES-I). BES-I通过调节核-核碰撞的质心系能量来使碰撞产生的热密物质内部的温度和重子数密度发生变

化, 帮助我们研究所产生的核物质内部特性, 包括集体运动的性质、手征性和临界性, 同时寻找可能存在的QCD临界点. 到目前为止, BES-I数据已显示很多有趣的现象, 特别在低能量高重子密度区. 比如, 针对RHIC实验发表的实验数据的理论分析表明, QCD临界点不大可能存在于低重子密度区, 即在重子数密度数小于450 MeV ($\mu_B < 3$ T)的区域临界点不会存在^[1], 参见图1.

引用格式: 马余刚, 许怒, 刘峰. 基于HIAF集群的QCD相结构研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 112009

Ma Y G, Xu N, Liu F. Study of the QCD phase structure at HIAF (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 112009, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0302

图 1 QCD相结构框架图. 横纵坐标分别是重子数化学势 μ_B (单位 MeV) 和系统温度 T (单位 MeV). 黑色粗线和细虚线分别表示在夸克-胶子等离子体(QGP)与强子气体(HG)之间的一级相变线, 和QGP与HG之间的平滑过渡. 方形点表示QCD临界点在相图上可能出现的位置. 从实验数据提取的系统化学冻结状态由红色粗线表示. LHC(欧洲)、RHIC(美国)、NICA(俄罗斯)、FAIR(德国)和HIAF(中国)加速器群所覆盖的重子数化学势区域表明在图上方

Figure 1 Schematic diagram of the QCD phase diagram. Vertical- and horizontal-axis are the temperature T , in MeV and baryon chemical potential μ_B , in MeV. The solid and dashed black lines represent the phase boundary and smooth crossover from QGP to hadron gas, respectively. The square point is the possible critical point. The empirical results of chemical freeze-out are shown as the red-line. Heavy-ion collision facilities of LHC (Europe), RHIC (USA), NICA (Russia), FAIR (Germany) and HIAF (China) with corresponding covered regions of chemical potential are also shown at the top of the figure.

因此对QCD临界点寻找的竞争将在高重子密度区展开. 针对高重子密度区的研究, 不仅能提供极端条件下核物质的重要信息, 同时还帮助人们理解致密天体性质及其演化, 因此具有十分重要的意义. 为此, 美国、德国、俄罗斯和日本等科技强国都在投入巨资建设加速器集群和研制先进探测器系统, 我国建设中的强流重离子加速器装置(High Intensity heavy-ion Accelerator Facility, HIAF)和外靶实验装置(Cooling-storage-ring External Experiment, CEE)为我国研究高重子密度区的物理提供了有利条件. 下面我们首先介绍高能核物理实验研究的现状, 然后讨论利用我国重离子加速器集群和CEE外靶装置开展高能核物理实验的未来前景.

2 高能核物理发展趋势

我们将回顾近几年来高能核-核碰撞实验中的最

新结果. 根据基本热力学原理, 这些关键重要的数据可以归纳为以下三个重要方向. (1) 集体流运动性(Collectivity): 高能核-核碰撞中产生粒子的近乎等速同向集体运动; (2) 手征性(Chirality): 极端高速转动和手征性相关的核物质性质研究; (3) 临界性(Criticality): 粒子关联中表现的临界相变现象.

2.1 集体流运动性

相对论重离子碰撞的集体运动与碰撞产生物质的整体性质(Bulk Properties)密切相关. 重离子碰撞中的多重数、各种粒子的产额、动量分布、强子的关联(特别是横动量小于1.5 GeV/c的软强子)反映了碰撞中产生物质的整体性质. 通过研究软强子的性质, 可以推断出系统的初始条件、热化程度、自由度和状态方程. 测量强子谱可以反映物质在运动学冻结(Freeze-Out)时的整体性质. 在此阶段, 尽管系统已经相对的稀释和“冷”却, 但从运动学冻结时强子谱的性质我们可以得到更早的热密阶段的信息. 碰撞早期的直接信息可以通过不同强子的积分产额得到. 不同粒子的横动量分布反映了随机和集体分量. 随机分量可以通过运动学冻结时的温度确定, 集体分量由高能核-核碰撞产生的“火球”从中心到边缘的物质密度梯度转换到压强梯度产生. 组分之间的相互作用把物质从核心向外推, 频繁的部分子层次和强子层次的相互作用导致了共同的组分速度分布. 这种集体流与相互作用的强度密切相关. 集体流在核-核碰撞中有两方面的重要作用: 产生强子的集体运动性质和产生强子的局域热平衡.

组分粒子之间存在相互作用是产生系统集体运动的原因. 当相互作用过程足够激烈, 系统将趋于局域热平衡, 集体运动的性质依赖于系统热化程度.

空间各向异性流可以通过产生粒子相对于反应平面方位角分布的傅里叶展开得到

$$E \frac{d^3N}{d^3p} = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2N}{p_T dp_T dy} \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} 2v_n \cos[n(\varphi - \Psi_n)] \right),$$

其中, p_T 和 y 是粒子的横动量和快度, φ 为粒子的方位角, v_n 是 n 阶谐波系数, Ψ_n 是反应平面的方位角. 不同的谐波系数反映整体流行为的不同方面. 其中第一项系数 v_1 和第二项系数 v_2 分别称作定向流和椭圆流. 它们与系统的早期演化有着密切的联系, 能提供存在于早期演化过程中碰撞组分的信息.

定向流(v_1)是碰撞产生的粒子在动量空间相对于反应平面方位角分布的傅里叶展开式的第一项. 可鉴别粒子(包括质子、 Λ 、 π -介子、K-介子、 ϕ -介子等)定向流的大小以及相对于快度的斜率携带碰撞早期动力学信息, 敏感于系统的状态方程. 根据流体力学模型, 净重子的定向流在中心快度区的斜率(dv_1/dy)分布与物质的状态方程直接相关: 理论表明 dv_1/dy 随能量分布的极小值是从强子物质态到QGP发生一级相变的特征.

图2(a)给出了STAR实验RHIC束流BES-I中测得的净质子数、净 Λ 数和净K数的定向流斜率 dv_1/dy 随碰撞质心能量的变化. 从图中可见在碰撞质心能量大于20 GeV时, 净质子数(质子数-反质子数)、净 Λ 数(Λ 数-反 Λ 数)和K数(K^+ 数- K^- 数)的定向流斜率 dv_1/dy 在误差范围内相同, 随碰撞能量的降低净质子数和净 Λ 数的 dv_1/dy 在14–20 GeV附近有极小值, 而净K数的 dv_1/dy 单调地减小到7.7 GeV.

椭圆流(v_2)是末态粒子在动量空间相对于反应平面方位角分布的傅里叶展开式的第二项. 它起源于系统在非中心碰撞时的空间各向异性(由碰撞系统在初始几何空间呈椭圆状的各向异性而产生的压力梯度差), 以及在系统演化中的粒子再散射导致位置空间各向异性转化到动量空间各向异性. 这种位置空间各向异性随系统膨胀而减小, 因此这种几何空间上的自淬火效应使椭圆流敏感于系统演化的早期阶段. 椭圆流可以提供有关压力梯度、有效自由度、热化程度和碰撞早期产生的热物质的状态方程, 所以椭圆流和碰撞早期的动力学相联系. 椭圆流的大小依赖于碰撞过程中相互作用的强弱, 因此它可以提供早期重离子碰撞所形成的系统中有效自由度及热动力学参数的信息. 理论和实验证据表明, 在RHIC最高能量重离子碰撞中部分子层次的集体运动已经达到, 理论研究表明当降低碰撞能量到某一阈值我们应该能观察到部分子层次的集体运动消失. 因此不同碰撞能量下, 椭圆流对碰撞中心度和系统尺寸的依赖性可以用于研究重离子产生物质的性质. RHIC BES-I中对不同粒子的椭圆流随粒子横动量的分布表明当能量小于11 GeV时, 强子的相互作用开始占主导地位.

过去人们一直认为粒子和反粒子的椭圆流应当一样. 图2(b)给出了STAR实验的RHIC束流BES-I中粒子和反粒子的椭圆流之差随碰撞质心能量的变化^[2]. 从

图 2 RHIC能区强子集体流的最新结果^[2]. (a) 定向流(v_1): 净质子(黑色的点)、净 Λ -超子(蓝色空心三角)和净K-介子(红色空心方点). 数据来自碰撞中心度为10%–40%的Au+Au碰撞. (b) 粒子与反粒子椭圆流的差值(Δv_2): 质子(黑色实心点)、 Λ -超子(蓝色空心三角)、K-介子(红色空心方点)和 π -介子(绿色实心三角). 数据来自碰撞中心度为0%–80%的无偏Au+Au碰撞. 实横线和点虚线是模型的计算结果. 黄色区域代表高重子数密度区分别由STAR固定靶实验和未来的加速器装置FAIR和HIAF覆盖

Figure 2 Recent RHIC results of collective flow [2]. (a) Directed flow v_1 : net-proton, net- Λ and net-K are shown as black-circles, blue-triangles and red-squares, respectively. Data are from 10%–40% central Au+Au collisions at RHIC. (b) shows the difference of v_2 between particle and anti-particle. Black-circles, blue triangles, red-squares and green-triangles stand for protons, Λ , K-mesons and π -mesons. Data are taken from 0%–80% minimum biased Au+Au collisions. Solid and dot-dashed lines are model calculations. Yellow hatch regions indicate the high baryon density regions covered by STAR fixed-target program and future accelerator facilities of FAIR and HIAF.

图中可见, 当碰撞质心能量大于39 GeV时, 粒子和反粒子的椭圆流基本一致. 当碰撞质心能量小于39 GeV时随着碰撞能量的减少, 粒子和反粒子椭圆流之差增大. 重子的椭圆流之差大于介子的椭圆流之差. 质子的椭圆流大于反质子的椭圆流, K^+ 介子的椭圆流大于 K^- 介子的椭圆流, 而 π^+ 介子的椭圆流小于 π^- 介子的椭圆流. 有多种理论模型试图解释这一实验现象, 但目前为止尚无完整的模型能完全解释不同种类的粒子与反粒子的椭圆流之差.

2.2 手征性

强磁场下的QCD研究是目前高能核物理领域的热点研究方向, 尤其是近几年一系列重要实验测量显示该方向具有丰富的物理^[1]. 在相对论重离子对撞实验中, 非对心碰撞时高速运动的旁观者(Spectator)能产生超强磁场, 参见图3. 目前关于这类极端强磁场的强度和寿命等性质, 实验上还没有直接的证据和测量手段. 因此, 通过寻找合适的观测量对其进行探测是一项很有意义的研究. 此外, 研究QGP在磁场下如何响应也是一个重要的课题. 近十年来, 非微扰QCD理论研究提出了一种理论: 受强磁场影响, 手征拓扑解会使得QGP中存在手征非平衡的情况, 继而通过手征反常造成左手性和右手性夸克数量的差异. 这一理论已在凝聚态物理中得到了一定验证. 而基于这一物理背景, 理论物理学家提出了一系列可能存在于QGP中的手征非平衡效应, 包括手征反常而诱发的集体现象如手征磁波. 这些手征非平衡效应与强相互作用下的手征-宇称(CP)破缺紧密相关. 弱相互作用下的宇称P, CP破缺早在20世纪50–60年代就被预言和发现, 并被后续实验不断证实(相关研究两次获得诺贝尔奖). 但在强相互作用下, 目前还没有任何CP破缺被发现, 而在高能重离子碰撞从强子态到部分子态的转变过程中, 却有可能存在局域的C, P和(或)CP的自发对称性破缺, 即手征非平衡效应. 这些强磁场下的手征反常效应在过去十年被RHIC和LHC上的实验组在不同碰撞系统和能量下进行测量, 发现了许多疑似的信号, 但相应的, 也包含着相当程度的背景干扰.

在RHIC能量扫描的Au+Au碰撞实验中, STAR国际合作组首次观测到 Λ 和反- Λ 超子的整体极化效应, 如图4所示^[3]. 根据实验数据, 理论推算的高温高密核物质的局域旋转角速度高达每秒 10^{21} 转, 这是迄今观

察到的旋转最快的物质形态. STAR合作组通过分析RHIC第一期能量扫描实验数据的 Λ 超子的极化分析, 发现RHIC低能段时非对心碰撞产生的 Λ 超子相对于反应平面存在明显的自旋极化, 即观测到了“整体极化”, 该研究成果于2017年8月3日作为封面文章发表在*Nature*杂志上^[3]. QGP整体极化的理论提出和STAR实验结果是近几年本领域的重要进展, 对相对论量子尺度下流体涡旋度的研究有深远的物理意义. 该实验结果是迄今唯一实验证明QGP流体具有超高的涡旋度, 开启了夸克-胶子等离子体中自旋自由度相关物理的研究. STAR组有关整体极化的实验测量推动了高能核物理领域高温高密核物质涡度研究的开展, 吸引了众多同行在此方向开展研究工作.

尽管我们已经探测到了核物质的整体极化, 但许多重要的问题还不清楚. 比如, 为何整体极化未出现在RHIC的200 GeV的Au+Au和LHC-ALICE的Pb+Pb等高能数据里, 反而出现在RHIC低能高重子密度区? 为何正反- Λ 超子的极化信号大小存在差异, 这与重离子碰撞的手征夸克效应有关? 整体极化能在大快度区域探测到吗? 而对这些问题的研究, 必须借助于STAR现有的重要的探测器升级项目和第二期的RHIC能量扫描数据. HIAF高重子密度区域虽然不能产生QGP, 但对超子极化的测量将有助于弄清其产生机制, 特别是QCD相图在低能段高重子密度区间的性质.

国际高能核物理学界对夸克手征性的研究高度重视, RHIC于2018年专门开展同质异位核的对撞实验, 旨在区分测量结果究竟来自信号还是背景. LHC计划在2021年开始新的实验运行, 这也为研究手征性的实验数据的背景测量提供了更好的平台. 总的来说, 研究强磁场的性质, 继而探索究竟是否存在强相互作用下的局域CP破缺, 是目前十分重要、紧迫的课题. 在HIAF能区, 预计的磁场场强没有RHIC/LHC能区高, 但

图 3 (a) 手征磁效应的产生机制; (b) 手征磁效应产生电荷分离; (c) 手征磁波的产生机制

Figure 3 (a) Mechanism of chiral magnetic effect; (b) charge separation due to chiral magnetic effect; (c) mechanism of chiral magnetic wave.

图 4 Λ 和反- Λ 超子的极化度在 Au+Au 碰撞中与碰撞能量依赖性

Figure 4 Collision energy dependence of the polarizations of Λ and anti- Λ in Au+Au collisions.

相对有较长的磁场作用时间, 为磁场的效应的研究提供了条件.

同时, 为了多方面刻度 QGP 的涡旋度, 除了 Λ 超子的极化测量外, 还要进行矢量介子的自旋排列的测量. 奇异介子, 如纯粹由奇异夸克组成的 ϕ -介子, 是一个很好的候选粒子. 在 HIAF 能区 ϕ -介子自旋排列结果的分析有助于进一步研究超子极化的机制与起源.

2.3 临界性

前面讨论的集体性和手征性是核物理强相互作用的重要特征, 研究它在高能重离子碰撞中的变化对我们理解核物质的基本性质十分重要. 另外一个同等重要的科学问题是研究在高温高密环境下 QCD 物质性质, 即临界性.

在 RHIC 最高碰撞能量 (200 GeV) 和 LHC 核-核碰撞中产生的系统的温度可达到 400 MeV, 而且其重子化学势几乎可以忽略不计 ($\mu_B \approx 0$), 参见图 1. 格点量子色动力学的计算结果预测^[4] 在高温低重子密度区, 从 QGP 相到强子相将是平滑过渡 (Crossover). 但是在低温高重子密度区, 量子色动力学的模型计算则预言从 QGP 相到强子相是一级相变^[5]. 单纯从量子热力学角度来考虑, 从高温低密到低温高密区的转变必须由临界点来完成, 临界点就是一级相边界的终点. 临界点具有普适性, 与具体相互作用的特点无关. 正如临界点在水 (主要是电磁相互作用) 的相图中的重要性一样, 研究寻找的强相互作用临界点反映了在确定外部条件下 QCD 物质自组织的状态, 它的存在与否将直接

影响人们对 QCD 相结构和宇宙早期演化的理解.

理想的相变临界点仅存在于无限大的稳定系统中. 考虑到核-核碰撞中产生核物质的体积和寿命均有限, 因此在热密核物质中的临界点可能是以弥散“临界区 (Critical Region)”形式存在. QCD 唯象模型计算^[1] 表明, 当系统的化学冻结曲线 (图 5 中的蓝色虚线) 经过临界区时, 守恒荷 (强相互作用中的守恒荷包括净重子数、净奇异子数和净电荷) 的高阶关联函数将有明显的振荡涨落, 其峰值就是化学冻结曲线上最接近临界区的能量点. 模型计算^[1] 又表明, 净重子数分布的振荡涨落相对更为明显.

图 5 展示了最新净质子四阶关联的实验数据随碰撞能量的依赖, 数据来自 RHIC-STAR^[6,7] 和 SIS-HADES^[8]. UrQMD 模型计算结果和预言的 RHIC BES-II 统计误差分别由灰色和绿色线段表示. 红色实线和蓝色虚线表示数据的非单调性, 正如理论模型的预言^[1], 虽然 HADES 的数据显示在质心系能量为 2.4 GeV 的 Au+Au 中心碰撞中, 质子的四阶关联几乎等于零, 暗示 QCD 临界点存在^[8], 但是实验数据的统计和系统误差都太大, 需要未来包括 CEE^[9] 在内的下一代实验在质心系 2.5–8 GeV 能区间的精确测量, 协同确定临界点的能量位置.

3 HIAF 上的外靶实验

强流重离子加速器装置 (HIAF) 已在惠州开工建设. 预计 2025 年建成后, 它将提供质心系能量为 2–3.5 GeV 的高亮度重离子碰撞固定靶实验^[1]. 图 6 展现目前对撞机实验反应率 (红色) 和未来高亮度固定靶实验反应率 (黑色) 相对于质心系能量的依赖. 由图可见, 所有固定靶实验都聚焦在小于 8 GeV 能区, 这些实验都位于尚未开发的高重子密度区.

3.1 HIAF 上的外靶实验 CEE

目前, 兰州外靶实验装置 CEE (低温高密核物质测量谱仪) 正在关键的研制阶段. 其测量手段为: 利用大接收度的超导磁铁, 通过时间投影室、硅像素、高计数率飞行时间谱仪等多种国内首次采用的先进探测器, 配合先进的电子学技术, 实现对中能重离子碰撞产物的全空间探测和鉴别. 该项目的成功对于提升国家大科学装置在实验核物理领域的国际地位、推动高密

图 5 RHIC Au+Au 5%中心碰撞中净质子四阶关联与碰撞能量的依赖关系(实心圆点)[6,7]。三角是HADES 0–10%中心碰撞数据点[8]。绿色区域是预计的RHIC第二期能量扫描计划(BES-II)结果的数据统计误差,灰色区域是UrQMD模型在相同中心度的计算结果。黄色区域表示高重子密度区

Figure 5 Collision energy dependence of the fourth order moments of net-protons from top 5% central Au+Au collisions at RHIC (circles) [6,7]. Triangle is from the HADES [8]. The green-band indicates the statistical uncertainty from the RHIC BES-II and the gray-band stands for results from the UrQMD model calculations at the same centrality. Yellow-hatched region indicates the high baryon density region.

图 6 高能核物理加速器装置上的核反应率与碰撞能量的关系。其中红色表示对撞实验的核反应率,黑色表示固定靶实验的核反应率

Figure 6 Reaction rates show as a function of collision energy for various accelerating facilities. While red symbols represent the colliders, the black symbols stand for the fixed-target collisions.

核物质性质研究的国际进展以及自主开发核探测和快电子学等尖端技术具有重要意义。

图7(a)和(b)分别是以水平面方向和垂直方向为视角的外靶实验CEE概念设计图。CEE的主要探测器系

统包括: 高温超导二级磁铁、带有最新读出电路的时间投影室(TPC)、自主研发的顶层金属(Topmetal)微像素定位探测器、时间触发T0探测器、内飞行时间探测器(iTOF)、多丝漂移室(MWDC)、飞行时间探测器(TOF)和零角度量能器(ZDC)。更多细节关于CEE的信息在文献[9]中有具体描述。

CEE的质心系能区是2.3–4.5 GeV, 分别由HIRFL (兰州, $E_{\text{Lab}}=0.5$ GeV/u)和HIAF(惠州, $E_{\text{Lab}}=2.5$ GeV/u)加速器群提供。这是高重子密度区最重要的能区, 尤其是对QCD临界点的探索。由UrQMD输运模型0.5 GeV U+U中心碰撞($b=0$ fm)的仿真结果, 我们看到CEE的设计结构可以接收到绝大多数反应产生的质子和 π -介子, 参见图8。大部分带电粒子特别是中心快度区($y=0$)的粒子都能被CEE探测。良好的探测器接收度和探测效率为将来研究带电粒子产额、产额比和高阶关联涨落提供了重要保障。

CEE实验的特点和创新: (1) 具有较大的相空间覆盖, 同时利用固定靶实验产物前冲的特点, 强调前角区测量; (2) 采用当前先进的探测器、快电子学和DAQ技术, 将CEE的事件率提到最大, 提高束流的利用率和利用放射性束流实验的潜能。CEE的设计计数率是 10^4 , 比该能区已有的探测器高出近一个量级; (3) CEE的部分探测器子系统将采用全新的技术和设计, 预计会形成众多的技术突破。例如, 硅微像素定位探测器将直接采用Topmetal集成电路作为信号读出端, 这将大大提高探测器的颗粒度和读出效率, 具有将高分辨径迹探测器微型化的诱人前景; 大体积的中心TPC探测器成功研制, 将填补这一探测器在国内实验装置上应用的空白; 而大面积多丝漂移室径迹阵列的成功研制和应用, 将使宇宙射线成像等大型化径迹测量成为可能; 数据获取系统(DAQ)采用高密度、高精度、高速度等新技术, 具备高速数据传输能力、灵活的通道互连能力以及强大的数据处理能力。

3.2 外靶实验CEE的物理目标

兰州重离子研究装置-冷却储存环(HIRFL-CSR)可以提供入射能量在0.5–1.2 GeV的各种离子束流(可以重至铀), 而已经开工建设的HIAF能够提供2–4 GeV/u的重离子束流。这些重离子束流能量覆盖的质心系能量是2.2–4.5 GeV, 相对应的重子数密度是850–750 MeV。该能区核反应能够达到的重子数密度是核物质基态的

图 7 (a) 外靶实验CEE概念设计(I); (b) 外靶实验CEE概念设计(II, 俯视图)

Figure 7 (a) Conceptual design of the CEE experiment (I); (b) the same as (a) with a top-view of the CEE layout.

图 8 外靶实验CEE. 质子(a)、 π -介子(b)运动学接收度, 500 MeV U+U碰撞 ($b=0$ fm)

Figure 8 CEE experiment. The acceptances in p_T versus rapidity y for protons and pions, respectively. The data is from the simulation of the most central ($b = 0$ fm) U+U collisions at 500 MeV.

2–3倍. 虽然在该能区我们不能产生夸克-胶子等离子体, 参见图1, 但这是人们研究高重子密度区核物质状态方程和寻找QCD临界点的关键区域. 下面简述3个重要的物理研究.

(1) QCD相结构

由于理解QCD的相结构具有重要的科学意义, 国际上建立了一系列的大型装置开展高能重离子碰撞实验, 在不同能区寻找新的物质形态, 研究QCD的相结构. 正在运行的RHIC和LHC上的高能重离子实验碰撞能产生极高温度的强耦合QGP. 这种高能区的物理目标是寻找高温QGP并探索其性质. 与最高能量RHIC和LHC实验不同, FAIR-CBM和RHIC-STAR的束流能量扫描的目的是研究中等重子数密度能区相边界的性质和可能的相变临界点. 有迹象表明, 在以上能区可能会

有重要的结果出现. 图5展示了RHIC-STAR第一期能量扫描的初步结果. 图中显示净质子数(实心点)的四阶涨落($\kappa\sigma^2$)有明显的非单调的能量依赖性, 在最大的净重子密度区(对应 $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$ GeV)呈现一个峰值, 这意味着此处有一个长程吸引关联在起作用. 而另一方面, UrQMD(灰色线)计算的结果却呈现一个单调下降的趋势, 符合重子数守恒的预期. 实验上要观测QCD临界点附近的振荡特征, 需要进行能量更低的重离子碰撞实验, 如FAIR-CBM和CEE的实验. 可以说QCD相图方面的工作, 正处在一个面临新发现的关键期. 通过对CEE, FAIR能区重离子碰撞集体运动行为开展研究, 包括集体流、强子谱的性质、轻核产额和粒子的高阶关联函数, 结合其他加速器上重离子碰撞的实验结果, 并与各种相对论重离子碰撞模型进行比较可以使

全面了解从强子相到夸克相的相变性质.

(2) 核物质手征性和极化效应

① 虽然低能HIAF能量下电磁场的强度降低, 但是磁场寿命将延长, 所以依赖于电磁场的多种与手征性相关的集体输运效应有望在HIAF能量下观测到, 并得到进一步的深入研究. 一方面, 手征效应的实验背景机制随着能量的降低也有了新变化, 比如集体流在低能量下会由于QGP的寿命缩短而压低, 共振态衰变的影响会由于强子相的地位越发重要而变得更加突出, 这些都需要通过借助一些描述相对论重离子碰撞的动力学演化模型来详尽地模拟和研究. HIAF能区的实验提供了寻找和探索与手征性相关的集体输运效应的机会. 另一方面, 除磁场外手征磁效应的实现还依赖于手征不对称度(通常用一个手征化学势来表征)的存在. 在HIAF能区, 我们可以预计手征对称性并没有恢复, 理论上预计这种情况下手征不对称度会被压低, 从而影响手征磁效应的实现. 因此, 在HIAF能区对于手征磁效应等信号的探测也将给我们提供关于手征对称性破缺对于手征磁效应等反常输运现象影响的重要信息. 此外, 开展在高密核物质中强洛伦兹力下的一些动力学效应的研究也是非常有意义的. ② 极化效应的研究: HIAF装置的高亮度和低碰撞能量给整体极化效应的研究提供新的机会. 在HIAF能区可以测量低碰撞能量的多种超子的整体极化, 使人们能研究其随碰撞能量和集体流的依赖行为. 在HIAF装置上可以实现多种碰撞例如质子与原子核碰撞, 这就使研究小系统的整体极化效应成为可能. 对HIAF能区产生的核物质的整体极化效应的研究, 是以前未涉及的研究课题. 探索它的存在与否及其性质可以深化人们对强子层次的自旋轨道耦合的认识. 矢量介子的自旋排列也是重要的研究方向, 也可以与超子极化研究平行开展.

(3) 对称能

在QCD相图的高重子数密度区域, 同位旋自由度将扮演重要的作用. QCD性质中非常引人关注的是非对称核物质状态方程, 它对于发展适用于远离稳定线的核结构理论和理解致密星体内部结构有非常重要的科学意义, 同时对确定非对称核物质中核子-核子相互作用的同位旋依赖性至关重要. 在HIRFL-CSR能区, 重离子碰撞导致核物质的压缩, 这一能区的重核碰撞, 或者丰中子放射性束流引起的核反应, 具有最大的核阻止, 导致观测量对状态方程依赖的敏感度最大, 是研究两倍饱和密度区对称能的理想区域^[9].

4 结论

低温高密核物质测量谱仪(CSR External-target Experiment), 将是我国第一台运行于GeV能区的、自主研发的、基于国内核物理大科学装置HIRFL-CSR的大型核物理实验装置^[8]. 其主要的科学功能是实现该能区重离子碰撞中带电子产物的近全空间测量, 为致密天体性质、核反应动力学、自旋和同位旋相关的核力与核物质状态方程性质、高重子数密度QCD相图等重要的科学问题研究提供实验数据, 并为寻找QCD临界点作出重要贡献. 这与已有的RHIC数据^[6,7,10]与其他装置的数据将构成一幅完整的核物质相图. 未来HIAF的建成, 经适当的升级改造后, CEE还可继续发挥作用. 另外, 未来高能电子与离子对撞提供了研究核子内部的部分子结构^[11]、原子核物质结构与性质、奇特强子态等方面的条件, 我国在这些方面的相应研究也已规划, 这为中国未来高能核物理的发展引出了新的方向^[12].

致谢 感谢各位合作者, 特别是王群、马国亮、庄鹏飞、杨建成、赵红卫、张亚鹏、肖志刚、罗晓峰、徐珊珊、施梳苏、梁作堂、黄旭光、黄梅和CEE合作组全体成员.

参考文献

- 1 Bzdak A, Esumi S I, Koch V, et al. Mapping the phases of quantum chromodynamics with beam energy scan. *Phys Rep*, 2020, 853: 1–87
- 2 Adamczyk L, Adkins J K, Agakishiev G, et al. Observation of an energy-dependent difference in elliptic flow between particles and antiparticles in relativistic heavy ion collisions. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 142301, arXiv: 1301.2347; Adamczyk L, Adams J R, Adkins J K, et al. Beam-

- energy dependence of directed flow of Λ , $K^{+/-}$, K_S^0 and ϕ in Au+Au collisions. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 062301
- 3 Adamczyk L, Adkins J K, Agakishiev G, et al. Global Λ hyperon polarization in nuclear collisions. *Nature*, 2017, 548: 62–65, arXiv: 1701.06657
 - 4 Aoki Y, Endrődi G, Fodor Z, et al. The order of the quantum chromodynamics transition predicted by the standard model of particle physics. *Nature*, 2006, 443: 675–678, arXiv: hep-lat/0611014
 - 5 Fukushima K, Hatsuda T. The phase diagram of dense QCD. *Rep Prog Phys*, 2011, 74: 014001, arXiv: 1005.4814
 - 6 Adam J, et al. (STAR Collaboration). Net-proton number fluctuations and the quantum chromodynamics critical point. arXiv: 2001.02852
 - 7 Luo X, Xu N. Search for the QCD critical point with fluctuations of conserved quantities in relativistic heavy-ion collisions at RHIC: An overview. *Nucl Sci Tech*, 2017, 28: 112
 - 8 Adamczewski-Musch J, et al. (HADES Collaboration). Proton number fluctuations in 2.4 GeV Au+Au collisions studied with HADES. *Phys Rev C*, 2020, 102: 024914. arXiv: 2002.08701
 - 9 Lü L M, Yi H, Xiao Z G, et al. Conceptual design of the HIRFL-CSR external-target experiment. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2017, 60: 012021
 - 10 Ma Y G. Special Topic: High temperature and dense nuclear matter (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2019, 49: 102001 [马余刚. 高温高密核物质形态研究专题·编者按. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 102001]
 - 11 Xu Q H, Liang Z T. Nucleon spin structure and measurements on sea quark polarization at RHIC (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2019, 49: 102007 [徐庆华, 梁作堂. 质子自旋结构与RHIC上海夸克自旋分布的测量. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 102007]
 - 12 Cao X, Chang L, Chang N B, et al. Electron ion collider in China (in Chinese). *Nucl Tech*, 2020, 43: 020001 [曹须, 常雷, 畅宁波, 等. 中国极化电子离子对撞机计划, 核技术, 2020, 43: 020001]

Study of the QCD phase structure at HIAF

MA YuGang^{1,2*}, XU Nu^{3,4*} & LIU Feng^{3*}

¹ Key Laboratory of Nuclear Physics and Ion-beam Application (MOE), Institute of Modern Physics, Department of Nuclear Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China;

² Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³ College of Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan 430079, China;

⁴ Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

High-energy nuclear collisions offer a unique opportunity for studying the properties of the nuclear matter under extreme conditions, the evolution of the universe soon after the big bang as well as the inner structure of stars. Quantum chromodynamics (QCD), the theory for strong interaction, has predicted the existence of the new form of matter, where the de-confined quarks and gluons move “freely” in a volume that is much larger than that of an ordinary nucleon, the quark-gluon plasma (QGP). After more than thirty years of searching, scientists have collected circumstantial evidences of QGP from the relativistic heavy-ion collisions at the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) and the Large Hadron Collider (LHC). Thermodynamically one might expect phase boundary or/and critical point that accompany the new phase of matter. Nowadays the QCD phase structure, especially in the high baryon density region, has become the focus in order to search for the QCD phase boundary and possible critical point. In this article, the experimental status on the QCD phase structure will be reviewed. Discussion will include the collectivity, chirality and criticality in high-energy nuclear collisions. These will be followed by the discussion of the main physics programs for the future experiment. The CSR-External-target Experiment (CEE) at both HIRFL and HIAF accelerator complexes, will be discussed.

QCD, phase structure, critical point, chirality, collective flow, nucleus-nucleus collisions

PACS: 25.75.-q, 25.75.Ld, 12.38.Gc, 11.30.Rd

doi: 10.1360/SSPMA-2020-0302