



# 相对论重离子对撞中奇异强子产生机制的实验研究进展

陈金辉<sup>1\*</sup>, 马余刚<sup>1</sup>, 朱相雷<sup>2</sup>

1. 复旦大学现代物理研究所, 核物理与离子束应用教育部重点实验室, 上海 200433;

2. 清华大学工程物理系, 北京 100084

\* 联系人, E-mail: [chenjinhui@fudan.edu.cn](mailto:chenjinhui@fudan.edu.cn)

2021-03-04 收稿, 2021-06-18 修回, 2021-06-23 接受, 2021-06-24 网络版发表

国家自然科学基金(12025501, 11890714, 11775288)和中国科学院B类战略性先导科技专项(XDB34030200)资助

**摘要** 相对论重离子对撞是实验室研究夸克物质的理想途径, 其中奇异性增强是寻找和研究新物质形态夸克胶子等离子体(quark-gluon plasma, QGP)的重要探针之一. 本文系统阐述了我们课题组在奇异强子产生实验研究方面的几个工作, 包括: (1) 奇异强子产生机制的实验测量. 从奇异夸克动力学角度研究QGP性质, 并研究其产额比与量子色动力学(quantum chromodynamics, QCD)物质相变的联系, 发现在金核+金核对撞能量大于或小于 $\sqrt{s_{NN}}=19.6$  GeV的实验区间, 奇异强子产额随着横向动量变化出现显著差异. 例如, 在束流能量大于或等于19.6 GeV时, 多奇异性强子产额比符合夸克并合模型描述; 在束流能量小于19.6 GeV能区, 该实验数据迅速偏离夸克并合模型计算结果, 这可能是QCD相变的信号. (2) 奇异性原子核-超氙核质量和结合能的精确测量. 实验结果以高精度验证了电荷-宇称-时间(charge, parity, time, CPT)联合变换不变性在超氙核-反超氙核系统上成立, 实现了CPT对称性在迄今为止最重反物质原子核上的检验, 测量结果将为扩展标准模型参数提供实验限制. 同时, 发现超氙核结合能远大于0, 更新了近50年前的测量结果, 回应了长期困扰学界的超氙核结合能的“Dalitz之惑”. 新的测量结果也为理论计算超子-核子之间相互作用提供了更为精确的限制. (3) 多奇异性强子-核子相互作用的测量. 实验结果提供了奇数 $S=-3$ 的 $\Omega$ 超子与奇数 $S=0$ 的质子作用强度的第一手数据, 发现它们之间存在强吸引作用, 有望形成奇异双重子态, 检验了质子- $\Omega$ 双重子态的理论假设. 这些研究丰富了人们对强相互作用, 尤其是QGP中奇异强子产额增强、物质-反物质基本对称性和多奇异性强子奇特态等的认识.

**关键词** 相对论重离子对撞, 夸克胶子等离子体, 奇异性增强, 奇异强子, 超氙核, 超子-核子相互作用

物质科学的基本问题是物质的结构和形态. 20世纪物理学在探索物质的深层次结构方面取得了很大的成功. 例如, 发现强子内部存在更深层次的基本粒子, 通常称其为夸克和胶子. 夸克和胶子之间的非阿贝尔色相互作用具有渐近自由的性质<sup>[1,2]</sup>. 低温时, 夸克作用势随距离线性上升, 表现出夸克禁闭; 高温时, 夸克作用势是常数, 夸克解开禁闭. 在自然界温度下, 夸克和胶子被强相互作用力禁闭在核子内, 因此在自然界没有发现自由的夸克和胶子. 理论表明, 用动力学的方

法不能解除在强子内夸克的色禁闭, 但可通过热力学的集体效应来改变量子色动力学(quantum chromodynamics, QCD)的真空结构, 使得夸克和胶子在一个较大的范围内运动, 形成一种新的物质形态——夸克-胶子等离子体(quark-gluon plasma, QGP)<sup>[3]</sup>.

宇宙大爆炸理论认为, 宇宙诞生后百万分之一秒内, 在极端的高温高密条件下产生过QGP. 超高温或超高密度之下的新物质形态是21世纪物理学的研究热点. 因此, 在实验室环境下模拟这种超高温高密的极端条

**引用格式:** 陈金辉, 马余刚, 朱相雷. 相对论重离子对撞中奇异强子产生机制的实验研究进展. 科学通报, 2021, 66: 4358–4367

Chen J H, Ma Y G, Zhu X L. Progress in experimental studies of the mechanism of strange hadron production in relativistic heavy-ion collisions (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 4358–4367, doi: [10.1360/TB-2021-0237](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0237)

件,寻找这种新物质形态并研究其性质,从更深层次来理解宇宙物质起源和演化是重离子对撞实验的主要科学目标(详见近期综述<sup>[4-8]</sup>).20世纪70年代, Lee<sup>[9]</sup>建议,通过超高能重离子对撞,使用大型加速器将重核加速到接近光速并发生对心对撞,从而形成并研究QGP.相对论重离子对撞产生的能量将沉积在一个原子核大小的空间中,其能量密度远大于核物质到QGP相变的阈值( $1\text{ GeV/fm}^3$ )<sup>[10]</sup>,从而在极短的时间内创造出高温高密度的物理环境,产生QGP.经过近50年的不懈努力,高能核物理学科在研究新物质形态上取得了重要进展,一系列支持QGP形成的实验信号陆续被发现.例如,高能重离子对撞中喷注淬火现象的发现;不同夸克味道组分的强子较强的集体流及其组分夸克数标度行为;重核中心对撞中奇异性产额增强等<sup>[11-14]</sup>.

QGP的奇异性产额增强信号是Rafelski和Müller<sup>[15]</sup>在20世纪80年代初提出来的.由于奇异夸克的质量与QCD热密物质相变的临界温度相当,因此奇异夸克会在QGP中大量产生,奇异强子产生的增强是QGP存在的信号之一.相对论重离子对撞由于在极小的空间中聚集了大量的能量,其能量密度越过发生退禁闭相变的阈值,使得QGP中胶子对融合( $gg \rightarrow ss$ )成为奇异夸克对产生的主导途径.这个过程随着系统能量密度的提高而越发显著,因此随着束流能量从AGS(alternating gradient synchrotron)上升到SPS(super proton synchrotron),再到RHIC(relativistic heavy ion collider),最后到最高的LHC(large hadron collider),可以显著地观测到奇异强子产额增加,或者重离子中心对撞中的奇异强子产额相对于同一束流能量下质子对撞中的显著增强.实验上确实观测到这样的信号,例如,反奇异超子和 $\phi$ 介子相对 $\pi$ 介子的产额随束流能量先上升然后趋于饱和值;重核对撞中奇异超子产额相对同能量质子对撞的显著增强<sup>[16-24]</sup>.近期, LHC也在质子-质子对撞实验的高多粒子数事例中观测到显著的奇异性产额增强<sup>[25]</sup>.这有别于传统上QGP研究聚焦在重离子对撞中,关于小系统事例中QGP信号的研究成为当前研究热点之一.下面将集中介绍在RHIC加速器的STAR(solenoid tracker at RHIC)实验组束流能量扫描实验中,开展奇异强子产生机制实验测量的相关工作.

## 1 奇异强子产生机制实验研究进展

STAR束流能量扫描实验是从其高能端逐渐往下扫描,其主要目标是研究QCD相结构,包括:(1) 在高端

观测到的QGP信号何时消失?(2) 寻找QCD一级相变的证据;(3) 寻找可能存在的QCD相变临界点<sup>[26]</sup>.随着束流能量往下扫描,系统的能量密度逐渐变小,热密核物质的温度逐渐降低,预期与QCD物质自由度或者QCD相变相关的若干物理观测量会发生显著变化,例如质子直接流随束流能量变化和一级相变的联系<sup>[27,28]</sup>.守恒荷高阶矩的测量显示,在每核子对质心系能量为19.6 GeV附近可能存在相变的迹象<sup>[29,30]</sup>,那么相应的高能端重核系统中出现的奇异性增强现象是否也消失呢?

奇异性产额增强被多个实验测量,一般通过其相对于 $\pi$ 介子产额比来研究.图1(a)中空五角星是STAR束流能量扫描实验结果.新的实验数据精度更高,与已经发表的实验结果趋势一致,并符合热力学统计模型和运输模型描述.数据显示, $\Lambda$ 、 $\Xi$ 的反粒子与 $\pi$ 介子产额比在束流能量扫描实验能区随着对撞能量增大而迅速增大,并在RHIC 200 GeV对撞中达到饱和.这意味着,束流能量扫描实验能区较低能量下(小于11.5 GeV)产生的介质与较高能量区(大于19.6 GeV)对撞中产生的介质存在显著差别.而超子 $\Lambda$ 、 $\Xi$ 与 $\pi$ 介子产额比都在7.7 GeV对撞能量下显示出最大值,然后随着能量提高而持续下降.这一现象与较低能区对撞中产生的高重子数密度环境有关<sup>[18]</sup>.可能有两种解释:一种可能是7.7 GeV的对撞中产生了强子气体环境,由于核子-核子对撞中的奇异粒子协同产生导致奇异超子增强;另一种可能是7.7 GeV的对撞中有丰夸克的QGP产生,奇异夸克按统计规律更容易与上、下夸克重组强子化为奇异超子.图1(b)显示,反重子与重子产额比随对撞能量增大而快速增大,各种反超子与超子产额比随着奇异性数变大而增大,这个差异也与统计模型预言一致.实验中还需要进行更系统的测量,尤其是更高精度地测量各种超子的横向动量谱和集体流,用于区分不同的模型计算结果,以厘清反应中产生介质的物态<sup>[31]</sup>.

在相对论重离子对撞中,由于末态强子数众多,再散射和共振态衰变会显著影响QGP形成时刻的热力学行为,包括前文讨论的 $\Lambda$ 、 $\Xi$ 测量结果.由于多奇异性强子 $\Omega$ 、 $\phi$ 在强子媒介中的作用截面远远小于 $\pi$ 、K介子的,因此受强子再散射过程影响小,可以很好地保留反应系统早期的物理信息,是研究高能重离子对撞早期动力学的有效探针<sup>[33,34]</sup>.同时,随着束流能量往低能端扫描以及系统温度的降低,强子产生道将与胶子对融合形成竞争,通过 $\Omega$ 、 $\phi$ 的实验测量也将给出QCD物

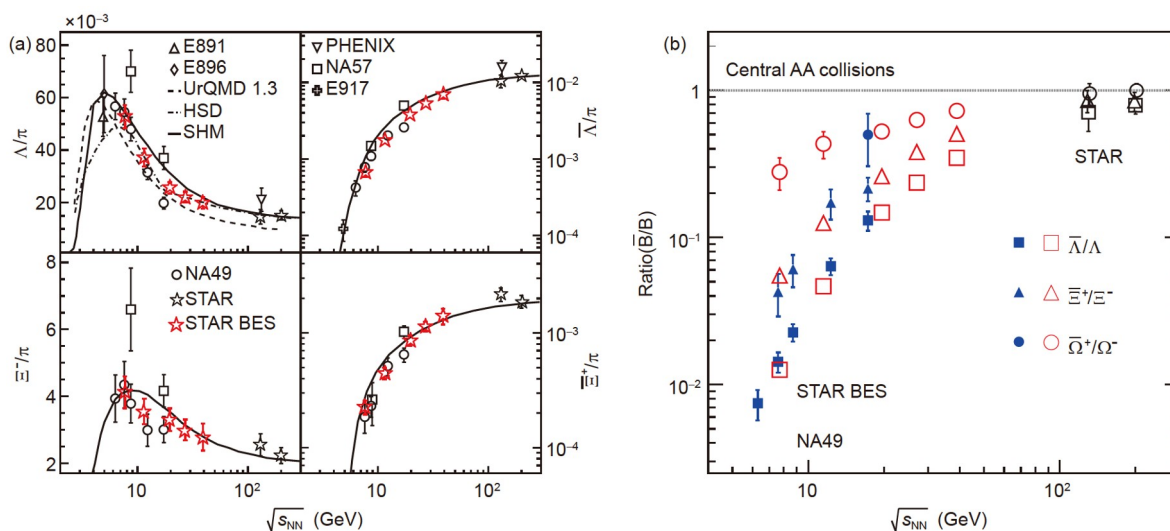


图 1 (网络版彩色) 奇异强子相对  $\pi$  介子产额比(a) 和反奇异强子相对奇异强子产额比(b) 随束流能量的变化<sup>[31]</sup>. 空心五角星为 STAR 束流能量扫描实验测量结果, 其他数据点是以前发表的实验结果, 实线和虚线代表理论计算结果  
Figure 1 (Color online) The yield ratio of strange hadron and  $\pi$  meson (a) and the yield ratio of anti-strange hadron and strange hadron (b) as a function of collision energy<sup>[31]</sup>. Open stars are results from the STAR beam energy scan experiment, while other symbols represent early measurements in the field. Solid lines and dashed lines are the theoretical calculation results

质从夸克相到强子相过渡的信号. 在 STAR 束流能量扫描实验中, 我们着重研究了  $\Omega$ 、 $\phi$  产额比的横动量依赖随着束流能量和中心度的变化关系(图 2). 研究发现, 在能量 19.6 GeV 以上的金核+金核中心对撞中,  $\Omega$ 、 $\phi$  产额比在中等横动量区几乎相等, 并且与奇异夸克并合模型计算结果相符; 但是当束流能量降低到 11.5 GeV 以下时, 此产额比在中等横动量区快速下降. 新的实验数据表明, 11.5 和 19.6 GeV 能量的金核+金核碰撞形成的介质性质差别较大, 我们的测量结果支持 19.6 GeV 以上的中心对撞中夸克自由度强于强子自由度, 11.5 GeV 以下则强子自由度强于夸克自由度<sup>[32]</sup>. 在 TeV 能区, LHC 加速器上的 ALICE (a large ion collider experiment) 实验组通过测量铅+铅中心对撞中  $\Omega$ 、 $\phi$  的产额比随着横动量的变化行为, 并与相同能量下的质子对撞结果比较, 发现铅+铅、质子-质子对撞实验结果在低横动量较为接近, 但是随着横动量增大, 铅+铅对撞实验中的比值是质子对撞中的 2~3 倍, 并且开始偏离弦碎裂模型描述, 表明新的物理机制, 例如夸克并合机制, 在重离子反应中变得重要<sup>[35]</sup>. 另一方面, LHC 在质子对撞的高粒子数事例中观察到突出的奇异性产额增强, 表明夸克胶子等离子体也可能在强子对撞中形成<sup>[25]</sup>. 这有别于前面讨论的重离子对撞实验结果, 提供了研究 QGP 的一个新思路.

目前重离子对撞实验一般通过研究物理量的涨落来研究 QCD 相变临界点, 例如净质子数目分布的四阶矩的涨落, STAR 束流能量扫描实验测量发现, 该涨落随着能量的变化呈现一个非线性的行为<sup>[29,30]</sup>. 理论研究指出<sup>[36]</sup>, 重子密度涨落也是寻找 QCD 临界点的有效手段, 可以利用重离子对撞中的中子密度涨落来寻找临界点. 从核子并合模型出发, 该理论研究指出, 质子、氘、氚的产额比  $\mathcal{O}_{p-d-t} = \frac{N_p N_t}{N_d^2}$  可以反映中子密度的相对涨落. 他们进一步结合 SPSS 已发表的实验数据, 计算出该产额比随着对撞能量的变化呈现非单调行为, 可能是 QCD 相变临界点的信号<sup>[37]</sup>.

结合以上讨论, 我们提出, 可以通过研究重离子对撞中的夸克密度涨落来研究 QCD 相变临界点. 由于奇异夸克的质量与 QCD 相变的温度相当, 因此奇异夸克将在 QGP 中大量产生, 在发生 QCD 相变的区域, 奇异夸克密度涨落可能也会出现明显增强<sup>[38]</sup>. 我们基于夸克并合模型的推导和计算, 在夸克并合模型中引入夸克密度的相对涨落, 提出奇异强子  $K$ 、 $\Lambda$ 、 $\Xi$ 、 $\phi$  的产额组合比可以反映重离子对撞实验中奇异夸克密度的涨落<sup>[38]</sup>. 在夸克并合模型中<sup>[36]</sup>, 重离子对撞中产生的强子  $h$  的产额可以用以下公式计算:

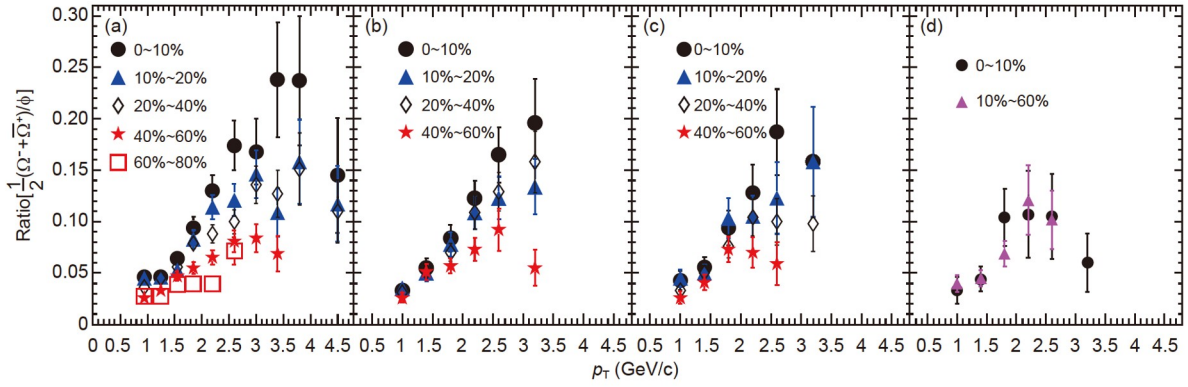


图 2 (网络版彩色)STAR束流能量扫描实验中 $\Omega$ 、 $\phi$ 产额比随系统中心度和粒子横向动量的变化<sup>[32]</sup>. 误差代表统计误差和系统误差之和. (a) Au+Au @  $\sqrt{s_{NN}}=39$  GeV; (b) Au+Au @  $\sqrt{s_{NN}}=27$  GeV; (c) Au+Au @  $\sqrt{s_{NN}}=19.6$  GeV; (d) Au+Au @  $\sqrt{s_{NN}}=11.5$  GeV

Figure 2 (Color online) The yield ratio of  $\Omega$  and  $\phi$  as a function of collision centrality and particle transverse momentum from the STAR beam energy scan experiment, where error bars present sum of statistical and systematical uncertainties<sup>[32]</sup>. (a) Au+Au @  $\sqrt{s_{NN}}=39$  GeV; (b) Au+Au @  $\sqrt{s_{NN}}=27$  GeV; (c) Au+Au @  $\sqrt{s_{NN}}=19.6$  GeV; (d) Au+Au @  $\sqrt{s_{NN}}=11.5$  GeV

$$N_h = g_c g_{rel} g_{size} \left( \sum_{i=1}^A m_i \right)^{3/2} \left[ \prod_{i=1}^A \frac{N_i}{m_i^{2/3}} \right] \times \prod_{i=1}^{A-1} \frac{(4\pi/\omega)^{3/2}}{V_C(1+x^2)} \left( \frac{x^2}{1+x^2} \right)^{l_i} G(l_i, x), \quad (1)$$

其中,  $g_c$ 是合并因子,  $g_{rel}$ 是相对论修正因子,  $g_{size}$ 是体积修正因子. 利用式(1)可以得到在未加入夸克密度涨落时奇异强子的产额表达式, 从而得到其产额比:

$$O_{K-\Xi-\phi-\Lambda} = \frac{1}{3} \times \frac{g_{rel,K} g_{rel,\Xi}}{g_{rel,\phi} g_{rel,\Lambda}} \times \frac{(m_u + m_s)^{2/3} (m_d + 2m_s)^{2/3}}{(m_s + m_s)^{2/3} (m_u + m_d + m_s)^{2/3}}. \quad (2)$$

由于 $g_{rel}$ 随对撞能量的变化非常小, 该产额比可以视为一个不随能量变化的常数, 在考虑高质量共振态衰变的影响之后, 产额比的值约为1.1.

在夸克并合模型中引入了夸克密度涨落<sup>[36]</sup>:

$$n_q(\vec{r}) = \frac{1}{V_C} \int n_q(\vec{r}) d\vec{r} + \delta n_q(\vec{r}) = \langle q \rangle + \delta q(\vec{r}). \quad (3)$$

式(3)描述了夸克密度在相空间的分布,  $\delta q$ 项即为偏离平均值的涨落项. 将式(3)代入式(1), 然后定义奇异夸克的密度涨落 $\Delta q = \langle (\delta q)^2 \rangle / \langle q \rangle^2$ 以及不同夸克密度之间的关联 $\alpha_{q_1 q_2} = \langle \delta q_1 \delta q_2 \rangle / (\langle q_1 \rangle \langle q_2 \rangle)$  (这里, 只考虑两种不同种类夸克之间的关联, 忽略高阶项的影响), 可以得到包含夸克密度涨落的奇异强子的产额公式, 从而得到其产额比为

$$O_{K-\Xi-\phi-\Lambda} = \frac{1}{3} \times \frac{g_{rel,K} g_{rel,\Xi}}{g_{rel,\phi} g_{rel,\Lambda}} \times \frac{(m_u + m_s)^{2/3} (m_d + 2m_s)^{2/3}}{(m_s + m_s)^{2/3} (m_u + m_d + m_s)^{2/3}} \times \frac{(1 + \alpha_{su})(1 + \Delta s + 2\alpha_{sd})}{(1 + \alpha_{ss})(1 + \alpha_{sd} + \alpha_{su} + \alpha_{ud})}. \quad (4)$$

可以看出, 我们提出的产额比不再是一个常数, 而是与奇异夸克的密度涨落以及不同夸克密度之间的关联相关. 由于式(4)中有4个不同的关联因子(不同的夸克味道), 要提取这些关联因子的数值很困难. 这里, 考虑了两种极端情况: (1) 不同味道夸克密度之间没有关联, 所有的关联因子都为0, 可得到组合产额比为 $O_{K-\Xi-\phi-\Lambda} = g(1 + \Delta s)$ , 其中 $g$ 为常数项. 在这种情况下, 产额比的大小与奇异夸克的密度涨落呈线性关系. (2) 不同味道夸克密度之间有很强的关联, 所有的关联因子都相等, 可得产额比为 $O_{K-\Xi-\phi-\Lambda} = g$ , 为常数项 $g$ . 但是, 奇异夸克的质量远大于上夸克和下夸克的质量, 奇异夸克在QGP中会受到与上、下夸克不同的相互作用, 因此奇异夸克的密度涨落应该不同于上、下夸克. 在这种情况下, 产额比的大小依然会受到奇异夸克密度涨落的影响, 可能呈现出能量依赖性.

从RHIC和SPS已经发表的实验数据中分析产额比随着束流能量的变化关系, 并与我们的计算结果比较(图3). 可以看到, 重离子对撞实验中奇异强子产额的组合比随着对撞能量的变化呈现非线性行为, 并且该非线性行为不能被当前流行的统计模型或者夸克并合

模型的理论计算结果所解释. 在前面的讨论中, 我们在夸克并合模型中引入了夸克密度涨落, 得到了一个结论: 在引入了夸克密度涨落后, 奇异强子的产额比不再是一个常数, 其大小会受到奇异夸克密度涨落的影响. 在该理论框架下, 实验上观察到的产额比的非线性行为反映了不同对撞能量下奇异夸克密度涨落的变化行为, 该变化可能受到QCD相变涨落的影响, 可能反映了相变临界点的信息. 值得注意的是, 在200 GeV下, 一般认为, 该能量下QCD物质远离相变临界点, 因此奇异夸克密度涨落应该很小. 如从图3可以看出, 200 GeV下产额比的实验结果与没有引入夸克密度涨落的夸克并合模型的计算结果一致. 我们也发现, 当前实验结果的误差比较大, 在未来的重离子对撞实验中获取更为精确的实验数据显得很急迫. 另一方面, 奇异夸克密度涨落的物理思路也可以应用到奇异强子-核子系统中, 类似于核子密度涨落, 超子-核子密度涨落也可以相应计算<sup>[39]</sup>.

## 2 STAR高能区重离子中心对撞中反物质原子核的实验研究

相对论重离子对撞机将两束金离子加速到每核子100 GeV的能量, 然后在STAR探测器中心对撞. “核子重如牛, 对撞生新态”, 通过此种剧烈的对撞实验产生新物质形态QGP. 在QGP冷却过程中, 大量含有奇异夸克的奇异强子及其反物质产生, 因此RHIC也是研究反物质的理想实验场所<sup>[40]</sup>. RHIC对撞实验中奇异性的产生使得超氙核与反超氙核大量产生. 超氙核是由一个中子、一个质子、一个 $\Lambda$ 超子组成的束缚态, 其主要衰变道为 $\pi$ 介子和氦3( $^3\text{He}$ )或者 $\pi$ 介子和氘(d)以及质子(p). 自然界中的普通物质由质子与中子组成, 它们只含有上夸克和下夸克, 而超氙核里面的 $\Lambda$ 超子不仅含有上、下夸克, 还包含有一个奇异夸克. 因此, 对超氙核的研究将极大地丰富我们对物质世界的认识.

另一方面, STAR探测器于2014年开始运行重味径迹探测器, 其优越的位置分辨能力对于稀有粒子的研究起重要作用, 直接体现在它能够有力地压低超氙核的统计组合背景. 我们通过不断的尝试和优化, 在大量压低背景分析之后, 在大约46亿个金+金对撞事件中找到了156个超氙信号和57个反超氙信号<sup>[41]</sup>(图4). 图4中新的不变质量分布相对于仅仅通过STAR主探测器(时间投影室)发现反超氙核的实验测量<sup>[42]</sup>, 极大地压低了组合背景, 对于控制超氙核质量及结合能测量的系统

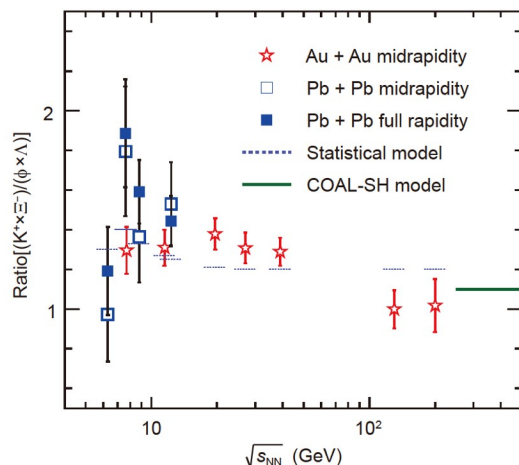


图3 (网络版彩色) 奇异强子产额比随束流能量的变化. 其中, 方形代表SPS的Pb+Pb中心对撞, 空心方形代表中快度区域的实验结果, 实心方形代表全快度区域的结果; 五角星代表RHIC-STAR实验Au+Au中心对撞在中快度区域的实验结果. 虚线代表统计模型的计算结果, 右边的水平实线代表没有引入夸克密度涨落的夸克并合模型计算结果<sup>[38]</sup>.

Figure 3 (Color online) Collision energy dependence of the strange hadron yield ratio. Squares represent results from central Pb+Pb collisions at SPS. Open and fill squares denote the ratios obtained in midrapidity and full rapidity, respectively. Stars are results of central Au+Au collisions in midrapidity at RHIC-STAR. Dashed lines are the ratio calculated from the statistical model. The horizontal line on the right side of the figure shows the ratio calculated from the COAL-SH (coalescence-Shanghai) model without quark density fluctuation<sup>[38]</sup>.

误差起到重要作用. 经过严格的探测器响应修正之后, 得到超氙核质量 $m=2990.95\pm0.13(\text{stat.})\pm0.11(\text{syst.})$  MeV/ $c^2$ , 反超氙核质量 $m=2990.60\pm0.28(\text{stat.})\pm0.11(\text{syst.})$  MeV/ $c^2$ , 两者统计合并, 得到结果为 $m=2990.89\pm0.12(\text{stat.})\pm0.11(\text{syst.})$  MeV/ $c^2$ . 随后, 从质量测量结果算出超氙核、反超氙核的质量差和结合能, 其数值为 $\Delta m/m=(0.1\pm2.0(\text{stat.})\pm1.0(\text{syst.}))\times10^{-4}$ ,  $B=0.41\pm0.12(\text{stat.})\pm0.11(\text{syst.})$  MeV.

对称性在自然界中普遍存在. 在历史上很长一段时间内, 人们一直认为宇称对所有物理过程都是守恒的. 1956年, Lee和Yang<sup>[43,44]</sup>在理论上提出, 在弱相互作用中宇称不守恒. 随后, Wu等人<sup>[45]</sup>在实验上证实了宇称不守恒. 1957年的诺贝尔物理学奖授予了宇称不守恒的发现. 随后, 物理学家很快发现了电荷宇称联合反演不守恒(CP破坏)<sup>[46]</sup>, 该研究也获得了诺贝尔物理学奖. 历史上宇称不守恒和CP破坏的发现极大地促进了物理学的发展. 目前CPT理论认为, 一切物理过程在电荷、宇称、时间联合变换时具有不变性, 并且认为, 物质与反物质具有完全相同的质量. 物理学家一直试图

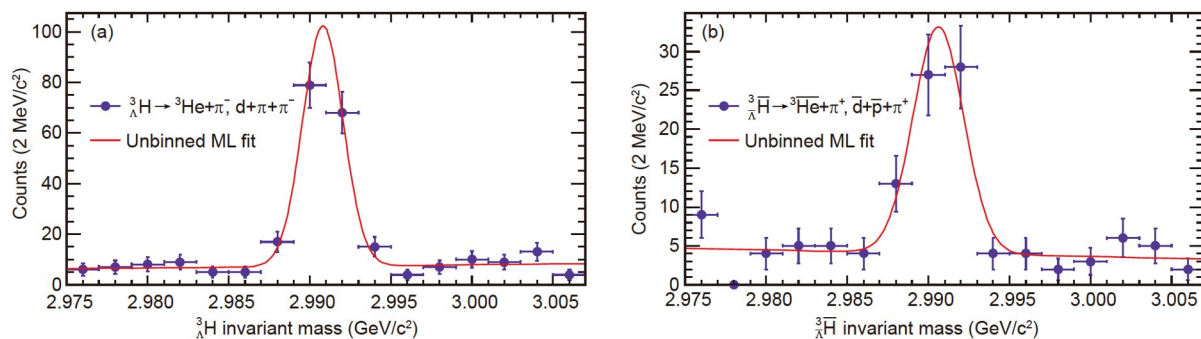


图4 (网络版彩色)从近46亿个金+金对撞事例中,通过 $\pi$ 介子和氦3两体衰变道, $\pi$ 介子和氦、质子三体衰变道重建超氦核信号(a)及其相应的反超氦核不变质量分布(b)<sup>[41]</sup>.实验数据是两体和三体衰变道合并的结果,实线是高斯函数拟合

Figure 4 (Color online) Utilizing both 2-body ( $\pi+{}^3\text{He}$ ) and 3-body ( $\pi+d+p$ ) decay channels, the invariant mass distribution of hypertriton from 4.6 billion Au+Au collision events (a) and the corresponding invariant mass distribution of antihypertriton (b)<sup>[41]</sup>. The distributions are combined result of 2-body and 3-body decay channels, and the curves represent a fit with a Gaussian function

在实验上寻找CPT破坏的信号,并且已经通过测量各种强子的正反粒子质量差别来验证CPT对称性.目前对正反K介子的质量测量显示,在 $10^{-18}$ 精度上正反K介子质量相等<sup>[47]</sup>.尽管对各类强子的正反粒子作了很多测量,但是在原子核层面上的测量非常稀少.其中,近期的一个实验结果是欧洲核子中心ALICE实验组在2015年完成的反氦核/氦核、反氦3/氦3质量差别.该实验结果对于氦3/反氦3相对质量差的测量精度只有 $10^{-3}$ ,并且不包含奇异夸克<sup>[48]</sup>.我们的新数据在世界上首次精确测量了反奇异夸克原子核——反超氦与超氦核的质量差别,并且以 $10^{-4}$ 精度验证了CPT对称性在超核上的成立.该测量也是迄今为止CPT对称性验证的最重的反物质原子核,测量结果将为扩展标准模型参数提供实验限制<sup>[49]</sup>.

超氦核 $\Lambda$ 分离能的测量也为我们理解中子星性质提供了重要帮助.理论认为,中子星内部存在奇异夸克物质<sup>[50]</sup>,因此,超子-核子、超子-超子之间的相互作用信息对理解中子星状态方程有十分重要的意义.依赖不同的作用强度,中子星的内核可以含有超子、奇异夸克物质或者K介子凝聚<sup>[51]</sup>.由于超子的平均寿命较短,通过超子次级束散射实验获取超子-核子相互作用信息的数据稀少,且误差较大,而超氦核作为一个天然的超子-核子相互作用系统,其 $\Lambda$ 分离能大小与超子-核子相互作用强度有直接关系. STAR实验组通过超氦核 $\Lambda$ 分离能的测量发现,超子-核子之间的相互作用强度比早期预期的强,新的测量结果将为理论计算超子-核子之间相互作用提供更为精确的限制.同时,新数据对理解轻超核等少体系统也有重要指导意义.例如,超氦核结合能新的实验数据和质量数 $A=4, 5$ 轻超核的

实验结果是理解轻超核若干重要问题的关键,包括“ ${}^4_{\Lambda}\text{H}-{}^4_{\Lambda}\text{He}$ 电荷对称性破缺”等问题<sup>[52]</sup>.

相对论重离子对撞也为多奇异性超子-核子相互作用实验研究提供了机会.我们基于STAR实验组2014年采集的大统计量实验数据,开展了质子- $\Omega$ 超子动量关联函数的实验研究.考虑到统计误差和系统误差,将金核+金核周边对撞测量结果和中心对撞结果相比(图5),这样的处理有效地消除了库仑相互作用的因素,能够获得敏感于多奇异性双重子态的实验信息.结合格点QCD理论计算结果,如图5所示,我们新测量得到的实验数据与 $V_{\text{int}}$ 势的计算更为接近,符合质子- $\Omega$ 超子之间结合能为27 MeV的理论预期<sup>[53]</sup>.尽管STAR实验组当前的结果带有较大的统计误差,但仍然更为接近质子- $\Omega$ 系统很可能是一个束缚的双重子态的预期<sup>[54]</sup>.近期,ALICE实验组<sup>[55]</sup>也在LHC能区质子对撞实验中完成了质子- $\Omega$ 超子动量关联函数测量,其结果指出,质子- $\Omega$ 存在吸引相互作用,但不足以形成深度束缚态. STAR和ALICE实验测量的系统差别大,提取的核物质尺寸具有较大的不确定性,可能是两者结论差异的原因.

### 3 总结与展望

相对论重离子对撞是研究高温高密夸克新物质形态的理想实验途径,在过去20年采集了大量珍贵的数据,获得了成批激动人心的新发现.奇异强子的实验研究只是其中的一小部分,它给科研人员提供了研究QGP的一个手段.考虑到热密核物质的复杂性,未来这样的实验研究将会持续,包括通过新的实验技术,瞄准

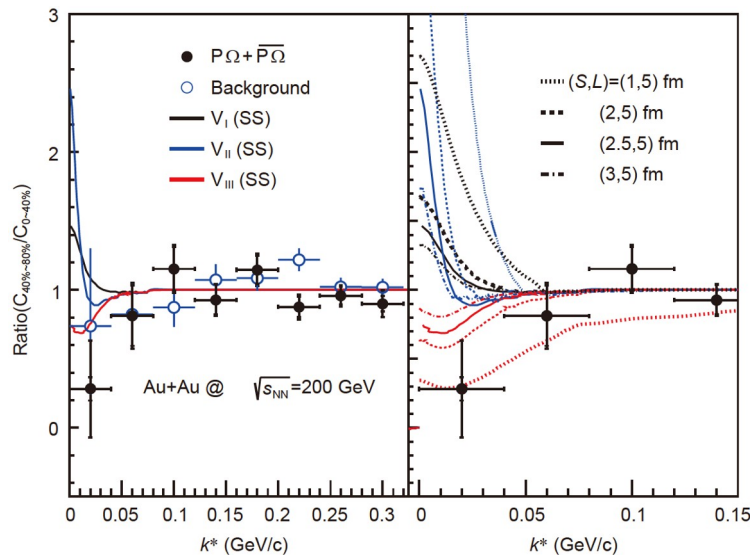


图 5 (网络版彩色)相对论重离子对撞中质子- $\Omega$ 动量关联函数的周边对撞结果(40%~80%中心度)和中心对撞结果(0~40%中心度)的比值<sup>[53]</sup>. 不同线代表3种不同作用势的格点QCD计算结果, 右图聚焦于小相对动量 $k^*$ 区间实验数据和格点QCD计算中不同源参数的对比

Figure 5 (Color online) The ratio of proton- $\Omega$  correlation function in peripheral collisions (40%–80% centrality) and central collisions (0–40% centrality) in relativistic heavy-ion collisions<sup>[53]</sup>. Lines represent lattice QCD calculations with three different potentials, and right panel zooms in the comparison at small relative momentum  $k^*$  region of experimental data and lattice QCD calculations with different source parameters

新的物理目标. 例如, QCD物质相结构的实验研究是我国正在建造的大科学装置强流重离子加速器的科学目标之一<sup>[56]</sup>, 而高重子密度区间核物质状态方程的研究是即将建成的德国反质子-离子研究装置(facility for antiproton and ion research, FAIR)上的CBM(compact

baryon matter)实验、俄罗斯重离子超导同步加速器(nuclotron-based ion collider facility, NICA)上的MPD(multi-purpose detector)实验的重要科学目标. 围绕这些新物理问题的研究将推动我国基础科学装置的建设 and 高科技人才的培养.

## 参考文献

- Gross D J, Wilczek F. Ultraviolet behavior of non-abelian gauge theories. *Phys Rev Lett*, 1973, 30: 1343–1346
- Politzer H D. Reliable perturbative results for strong interactions? *Phys Rev Lett*, 1973, 30: 1346–1349
- Lee T D. The strongly interacting quark-gluon plasma and future physics. *Nucl Phys A*, 2005, 750: 1–8
- Luo X F, Liu F, Xu N. Quark soup cooking at trillions of degrees: Experimental study on the phase structure of nuclear matter and the quantum chromodynamics critical point (in Chinese). *Physics*, 2021, 50: 98–107 [罗晓峰, 刘峰, 许怒. 万亿摄氏度下烹煮夸克汤: 核物质相结构和量子色动力学相变临界点的实验研究. *物理*, 2021, 50: 98–107]
- Shen C, Yan L. Recent development of hydrodynamic modeling in heavy-ion collisions. *Nucl Sci Tech*, 2020, 31: 122
- Tang Z B, Zha W M, Zhang Y F. An experimental review of open heavy flavor and quarkonium production at RHIC. *Nucl Sci Tech*, 2020, 31: 81
- Li Y, Lü C D, Yang Y D. Heavy flavour physics: A portal to new physics (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 2536–2545 [李营, 吕才典, 杨亚东. 重味夸克: 通往新物理之门. *科学通报*, 2018, 63: 2536–2545]
- Gao Y N. Experimental discovery of the pentaquark (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 2933–2940 [高原宁. 五夸克态的实验发现. *科学通报*, 2020, 65: 2933–2940]
- Lee T D. Abnormal nuclear states and vacuum excitation. *Rev Mod Phys*, 1975, 47: 267–275
- Shuryak E V. Quantum chromodynamics and the theory of superdense matter. *Phys Rep*, 1980, 61: 71–158
- Arsene I, Bearden I G, Beavis D, et al. Quark-gluon plasma and color glass condensate at RHIC? The perspective from the BRAHMS experiment. *Nucl Phys A*, 2005, 757: 1–27
- Back B B, Baker M D, Ballintijn M, et al. The PHOBOS perspective on discoveries at RHIC. *Nucl Phys A*, 2005, 757: 28–101
- Adams J, Aggarwal M M, Ahammed Z, et al. Experimental and theoretical challenges in the search for the quark-gluon plasma: The STAR

- Collaboration's critical assessment of the evidence from RHIC collisions. *Nucl Phys A*, 2005, 757: 102–183
- 14 Adcox K, Adler S S, Afanasiev S, et al. Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX Collaboration. *Nucl Phys A*, 2005, 757: 184–283
  - 15 Rafelski J, Müller B. Strangeness production in the quark-gluon plasma. *Phys Rev Lett*, 1982, 48: 1066–1069
  - 16 Ahle L, Akiba Y, Ashktorab K, et al. Centrality dependence of kaon yields in Si+Au and Au+Au collisions at relativistic energies. *Phys Rev C*, 1999, 60: 044904
  - 17 Afanasiev S V, Anticic T, Barna D, et al. Energy dependence of pion and kaon production in central Pb+Pb collisions. *Phys Rev C*, 2002, 66: 054902
  - 18 Anticic T, Baatar B, Barna D, et al. Lambda and anti-Lambda production in central Pb-Pb collisions at 40, 80, and 158.4 GeV. *Phys Rev Lett*, 2004, 93: 022302
  - 19 Adams J, Aggarwal M M, Ahammed Z, et al. Scaling properties of hyperon production in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV. *Phys Rev Lett*, 2007, 98: 062301
  - 20 Abelev B I, Aggarwal M M, Ahammed Z, et al. Partonic flow and  $\phi$ -meson production in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 112301
  - 21 Abelev B I, Aggarwal M M, Ahammed Z, et al. Enhanced strange baryon production in Au+Au collisions compared to p+p at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV. *Phys Rev C*, 2008, 77: 044908
  - 22 Abelev B I, Aggarwal M M, Ahammed Z, et al. Measurements of  $\phi$  meson production in relativistic heavy-ion collisions at the BNL Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC). *Phys Rev C*, 2009, 79: 064903
  - 23 Abelev B I, Aggarwal M M, Ahammed Z, et al. Energy and system size dependence of  $\phi$  meson production in Cu+Cu and Au+Au collisions. *Phys Lett B*, 2009, 673: 183–191
  - 24 Abelev B, Adam J, Adamová D, et al. K-short and Lambda production in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 222301
  - 25 Adam J, Adamová D, Aggarwal M M, et al. Enhanced production of multi-strange hadrons in high-multiplicity proton-proton collisions. *Nat Phys*, 2017, 13: 535–539
  - 26 Aggarwal M M, Ahammed Z, Alakhverdyants A V, et al. An experimental exploration of the QCD phase diagram: The search for the critical point and the onset of deconfinement. 2010, arXiv: [1007.2613](https://arxiv.org/abs/1007.2613)
  - 27 Adamczyk L, Adkins J K, Agakishiev G, et al. Beam-energy dependence of the directed flow of protons, antiprotons, and pions in Au+Au collisions. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 162301
  - 28 Adamczyk L, Adams J R, Adkins J K, et al. Beam-energy dependence of direct flow of  $\Lambda$ ,  $\bar{\Lambda}$ ,  $K^\pm$ ,  $K_s^0$  and  $\phi$  in Au+Au collisions. *Phys Rev Lett*, 2018, 120: 062301
  - 29 Adamczyk L, Adkins J K, Agakishiev G, et al. Energy dependence of moments of net-proton multiplicity distributions at RHIC. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 032302
  - 30 Adam J, Adamczyk L, Adams J R, et al. Nonmonotonic energy dependence of net-proton number fluctuations. *Phys Rev Lett*, 2021, 126: 092301
  - 31 Adam J, Adamczyk L, Adams J R, et al. Strange hadron production in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 7.7, 11.5, 19.6, 27$ , and 39 GeV. *Phys Rev C*, 2020, 102: 034909
  - 32 Adamczyk L, Adkins J K, Agakishiev G, et al. Probing parton dynamics of QCD matter with  $\Omega$  and  $\phi$  production. *Phys Rev C*, 2016, 93: 021903
  - 33 van Hecke H, Sorge H, Xu N. Evidence of early multistrange hadron freeze-out in high energy nuclear collisions. *Phys Rev Lett*, 1998, 81: 5764–5767
  - 34 Shor A.  $\phi$ -Meson production as a probe of the quark-gluon plasma. *Phys Rev Lett*, 1985, 54: 1122–1125
  - 35 Abelev B, Adam J, Adamová D, et al.  $K^*(892)^0$  and  $\Phi(1020)$  production in Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV. *Phys Rev C*, 2015, 91: 024609
  - 36 Sun K J, Chen L W, Ko C M, et al. Probing QCD critical fluctuations from light nuclei production in relativistic heavy-ion collisions. *Phys Lett B*, 2017, 774: 103–107
  - 37 Sun K J, Chen L W, Ko C M, et al. Light nuclei production as a probe of the QCD phase diagram. *Phys Lett B*, 2018, 781: 499–504
  - 38 Shao T, Chen J, Ko C M, et al. Probing QCD critical fluctuations from the yield ratio of strange hadrons in relativistic heavy-ion collisions. *Phys Lett B*, 2020, 801: 135177
  - 39 Shao T H, Chen J H, Ko C M, et al. Yield ratio of hypertriton to light nuclei in heavy-ion collisions from  $\sqrt{s_{NN}} = 4.9$  GeV to 2.76 TeV. *Chin Phys C*, 2020, 44: 114001
  - 40 Abelev B I, Aggarwal M M, Ahammed Z, et al. Observation of an antimatter hypernucleus. *Science*, 2010, 328: 58–62
  - 41 Adam J, Adamczyk L, Adams J R, et al. Measurement of the mass difference and the binding energy of the hypertriton and antihypertriton. *Nat Phys*, 2020, 16: 409–412
  - 42 Adamczyk L, Adams J R, Adkins J K, et al. Measurement of the hypertriton lifetime in Au+Au collisions at the BNL relativistic heavy ion collider. *Phys Rev C*, 2018, 97: 054909

- 43 Lee T D, Yang C N. Question of parity conservation in weak interactions. [Phys Rev](#), 1956, 104: 254–258
- 44 Lee T D, Yang C N. Errata: Question of parity conservation in weak interactions. [Phys Rev](#), 1957, 106: 1371
- 45 Wu C S, Ambler E, Hayward R W, et al. Experimental test of parity conservation in beta decay. [Phys Rev](#), 1957, 105: 1413–1415
- 46 Christenson J H, Cronin J W, Fitch V L, et al. Evidence for the  $2\pi$  decay of the  $K_2^0$  meson. [Phys Rev Lett](#), 1964, 13: 138–140
- 47 Chen J, Keane D, Ma Y G, et al. Antinuclei in heavy-ion collisions. [Phys Rep](#), 2018, 760: 1–39
- 48 Adam J, Adamova D, Aggarwal M M, et al. Precision measurement of the mass difference between light nuclei and anti-nuclei. [Nat Phys](#), 2015, 11: 811–814
- 49 Colladay D, Kostelecký V A. CPT violation and the standard model. [Phys Rev D](#), 1997, 55: 6760–6774
- 50 Annala E, Gorda T, Kurkela A, et al. Evidence for quark-matter cores in massive neutron stars. [Nat Phys](#), 2020, 16: 907–910
- 51 Lattimer J M, Prakash M. The physics of neutron stars. [Science](#), 2004, 304: 536–542
- 52 Gazda D, Gal A. *Ab initio* calculations of charge symmetry breaking in the  $A=4$  hypernuclei. [Phys Rev Lett](#), 2016, 116: 122501
- 53 Adam J, Adamczyk L, Adams J R, et al. The proton- $\Omega$  correlation function in Au+Au collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV. [Phys Lett B](#), 2019, 790: 490–497
- 54 Goldman T, Maltman K, Stephenson G J, et al. Strangeness -3 dibaryons. [Phys Rev Lett](#), 1987, 59: 627–629
- 55 Acharya S, Adamova D, Adler A, et al. Unveiling the strong interaction among hadrons at the LHC. [Nature](#), 2020, 588: 232–238
- 56 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 [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]

Summary for “相对论重离子对撞中奇异强子产生机制的实验研究进展”

# Progress in experimental studies of the mechanism of strange hadron production in relativistic heavy-ion collisions

Jinhui Chen<sup>1\*</sup>, Yu-Gang Ma<sup>1</sup> & Xianglei Zhu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Nuclear Physics and Ion-beam Application, Ministry of Education, Institute of Modern Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China;

<sup>2</sup> Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

\* Corresponding author, E-mail: [chenjinhui@fudan.edu.cn](mailto:chenjinhui@fudan.edu.cn)

Relativistic heavy-ion collision is an ideal way to study the quark matter in laboratory, among which strangeness enhancement is one of the significant probes to search and study the new state of matter, the quark gluon plasma (QGP). Several of our efforts on experimental studies of the strange hadron production are discussed systematically in this review. They include: (1) Measurement of strange hadron production at relativistic heavy-ion collider (RHIC), to study the nature of QGP from the probe of strange quark dynamics, and explore the relationship between strange hadron yield ratio and the quantum chromodynamics (QCD) phase transition, where our data seem to present a clear difference of strange hadron production as a function of their transverse momentum in Au+Au collisions above or lower than the center of mass energy  $\sqrt{s_{NN}}=19.6$  GeV. For example, the multistrange hadron yield ratio is consistent with the quark coalescence model prediction when the collision energy is equal to or larger than 19.6 GeV, favoring the formation of QGP in such collisions; when the collision energy is lower than 19.6 GeV, the yield ratio rapidly deviates from quark coalescence model calculation result, suggesting the importance of hadronic degree of freedom in such collisions. Such a clear difference of strange hadron yield ratio vs. collision energies may be an experimental signal of the QCD phase transition, although statistical uncertainty is still large. (2) Accurate measurement of the mass and the binding energy of the strange nuclei, the hypertriton and the antihypertriton, where the high precision mass measurement data support the CPT (charge, parity, time) invariant in hypertriton and antihypertriton system. So far, this is the CPT invariant test in most heavy antimatter nuclei ever explored. The measurement will also provide experimental constraint on the standard model extension (SME) parameterization. Meanwhile, we obtain the binding energy of hypertriton far above zero. It updates the commonly used data of nearly 50 years ago in the field and answers the Dalitz's 2003's open question on the hypertriton binding energy, where the discrepancy between data and theoretical calculation seems merged now. The data also provide more accurate constraint on the theoretical calculation of hyperon-nucleon interaction, particularly on the few body system, where quite a few profound phenomena pending, such as the so-called charge symmetry breaking on the atomic number  $A=4$  hypernuclei system. (3) Measurement of multistrange hadron and nucleon correlations in the momentum space, with first-hand data on the baryon interaction between strange number  $S=-3$   $\Omega$  hyperon and the  $S=0$  proton, where experimental results suggest strong attractive interaction between  $\Omega$  and proton, favoring the formation of multistrange dibaryon in such collisions. This extends the traditional studies of baryon interactions with nucleon scattering from up and down quarks to strange quarks. We demonstrate how, using precision measurements of  $\Omega$  and proton correlations, the effect of the strong interaction for this hadron-hadron pair can be studied with precision comparable with predictions from lattice calculations. The measurement provides a test of the  $\Omega$ -proton dibaryon hypothesis as well. In short, our studies have enriched human understanding of the strong interaction, especially the properties of the QGP of strange hadron yield enhancement, matter-antimatter fundamental symmetry and multistrange exotic hadron states.

**relativistic heavy-ion collisions, quark gluon plasma, strangeness enhancement, strange hadron, hypertriton, hyperon-nucleon interaction**

doi: [10.1360/TB-2021-0237](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0237)