RHIC能区STAR上重味夸克偶素产生的实验进展

王鹏飞^{1,2}, 查王妹^{1,2*}, 唐泽波^{1,2}

1. 中国科学技术大学核探测与核电子学国家重点实验室, 合肥 230026;

2. 中国科学技术大学物理学院近代物理系, 合肥 230026

*联系人, E-mail: first@ustc.edu.cn

收稿日期: 2019-02-25; 接受日期: 2019-06-06; 网络出版日期: 2019-08-29

国家重点基础研究发展计划(编号: 2014CB845403)资助

摘要 相对论重离子对撞最主要的物理目标之一是寻找夸克-胶子等离子体(QGP)存在的证据并研究其特性. 在研究QGP的诸多探针中, 重味夸克偶素在重离子碰撞中由于“色屏蔽”效应而造成的压低被认为是QGP产生的直接信号. 随着实验和理论的进展, 人们发现QGP中的“再产生”和冷核物质效应也会显著地影响重味夸克偶素在重离子碰撞中的产额. 近年来, 以中美为主研制的STAR缪子探测器(MTD)大大提升了RHIC能区的重味夸克偶素实验研究能力, 为探索其在QGP中的各项行为提供了精准的实验依据. 本文总结了RHIC-STAR合作组近年来在200 GeV质子-金核和金核-金核对撞中重味夸克偶素 J/ψ 及 Υ 的产生的实验研究进展, 并介绍了近年来相对论重离子碰撞中重味夸克偶素一个新的研究方向——极低横动量 J/ψ 的实验研究.

关键词 夸克-胶子等离子体, 相对论重离子对撞, 重味夸克偶素, 色屏蔽, 相干光致产生

PACS: 12.38.Mh, 25.20.Lj

1 引言

重味夸克偶素是由重味夸克(粲夸克与底夸克)及其反夸克组成的束缚态. 第一个粲偶素于1974年由美国布鲁克海汶国家实验室(Brookhaven National Laboratory)和SLAC国家加速器实验室(SLAC National Accelerator Laboratory)的实验组同时发现, 他们分别命名该粒子为 J 粒子和 ψ 粒子. 其中布鲁克海汶国家实验室的实验组由华裔科学家丁肇中教授领衔, SLAC国家加速器实验室的实验组由里克特(B. Richter)教授领衔. 他们因此获得1976年诺贝尔物理学奖. 自此至今

的40多年内, 人们陆续发现了许多不同的重味夸克偶素态以及类重味夸克偶素态, 包括1976年发现的第一个底偶素 Υ 粒子. 在量子色动力学(Quantum Chromodynamics, QCD)的检验与特性研究中, 对粲偶素和底偶素的研究发挥了重要的作用.

量子色动力学的一个重要特征是夸克色禁闭, 即带有色荷的夸克被禁闭在色中性的强子(如质子、中子等)中. 到目前为止人们还没有发现自由的夸克. 然而, 格点量子力学理论预言在极端高温高密的状态下存在一种新的物质形态——夸克-胶子等离子体(Quark-Gluon Plasma, QGP). 在这种物质中, 夸克禁闭被解除,

引用格式: 王鹏飞, 查王妹, 唐泽波. RHIC能区STAR上重味夸克偶素产生的实验进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 102004
Wang P F, Zha W M, Tang Z B. Recent progress of quarkonium measurements in heavy-ion collisions at RHIC energies from STAR (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 102004, doi: [10.1360/SSPMA-2019-0056](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0056)

夸克不再被约束在强子里, 而是可以在更大的区间运动. 李政道教授等人认为, 这一极端条件可以通过相对论重离子碰撞实验实现. 将剥离了部分或者全部电子的原子如金原子加速到接近光速, 然后进行对撞, 可以产生由大量夸克和胶子组成的高温高密介质, 这必将导致一系列“涌现”效应. 对该物质特性的研究是粒子物理与原子核物理研究的一个重要前沿领域. 目前用于该方面实验研究的加速器主要有位于布鲁克海汶国家实验室的相对论重离子对撞机(Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC)和位于欧洲核子研究中心CERN的大型强子对撞机(Large Hadron Collider, LHC)等.

重味夸克偶素是夸克-胶子等离子体的重要探针. 1986年, Matsui和Satz^[1]指出, 在相对论重离子碰撞中, 由于色荷德拜屏蔽造成的重味夸克偶素产额压低是夸克-胶子等离子体形成的标志信号. 这是因为在重味夸克偶素中, 重味夸克与其反夸克之间的相互作用很强, 它们被束缚得很紧, 很难被离解. 但是在夸克-胶子等离子体中, 由于正反重味夸克周围存在许多自由的夸克和胶子, 它们会与重味夸克或反重味夸克相互作用, 从而屏蔽重味夸克与其反夸克之间的束缚. 这一屏蔽效应被称为色屏蔽(Color Screening), 可以用德拜屏蔽长度描述, 与介质的温度成反比. 当色荷德拜屏蔽长度小于重味夸克偶素的尺寸时, 束缚态将会被离解. 这一效应又被称为QGP“熔解”(Melting)效应, 它与QGP的解禁闭、温度分布、时空演化等密切相关, 是研究QGP特性的重要手段.

随着相对论重离子碰撞中重味夸克偶素产生的深入研究, 人们发现RHIC能区 J/ψ 的产额压低程度与SPS能区相当, 并且在前向快度区产额压低程度比在中间快度区更强. 由此认为除了QGP熔解效应这一效应, 可能还存在另一种热核物质效应——重味夸克重组(Recombination)效应, 即关联或不关联的重味夸克与反重味夸克可以在QGP演化中或者强子化相边界上重新组合成粲偶素^[2]. 由于重味夸克偶素产生截面比重味夸克对产生截面低2个数量级, 重味夸克重组效应可以对相对论重离子碰撞中重味夸克偶素的产额造成明显影响. 重组效应与重味夸克产生截面、热化程度、介质时空演化等密切相关, 会造成重味夸克偶素的产额增强.

除了这两种热核物质效应外, 相对论重离子碰撞中重味夸克偶素的产生还受到冷核物质(Cold Nuclear

Matter, CNM)效应的影响. 冷核物质效应包括原子核中的部分子分布函数相对核子中部分子分布函数的改变(nuclear Parton Distribution Function, nPDF)、核吸收(Nuclear Absorption)、同行粒子离解(Breakup by Comover)、相干能损(Coherent Energy Loss)、Cronin效应等^[3]. 这些效应也会造成重味夸克偶素产额的变化或者横动量谱形状的变化等.

因此, 相对论重离子碰撞中重味夸克偶素的产生受到QGP熔解效应、重味夸克重组效应和冷核物质效应这三类效应的共同作用. 实验上很难区分开这三种效应来单独研究某一种效应. 因为这些效应的相对贡献依赖于夸克偶素类型、高温高密介质的初始能量密度和尺度等以及重味夸克偶素的速度和横动量等, 所以为了全面理解夸克-胶子等离子体中重味夸克偶素产生机制, 必须系统地研究不同重味夸克偶素在不同碰撞能量和碰撞系统中的产生.

STAR合作组近年来新安装了缪子望远镜探测器(Muon Telescope Detector, MTD)^[4]. MTD是以中美为主联合研制的基于多气隙电阻板室(Multi-gap Resistive Plate Chamber, MRPC)技术的探测器. 中国科学技术大学和清华大学联合承担了该探测器MRPC模块的研制和生产任务. 缪子望远镜探测器安装在STAR磁铁外面, 利用磁铁的轭铁作为强子吸收体, 覆盖了 $-0.5 < y < 0.5$ 的快度范围和45%的 2π 方位角. MRPC的信号从长读出条两端引出. 信号到达读出条两端的时间差可以用来测量粒子的击中位置, 信号到达两端的平均时间则可以用来测量粒子的到达时间. 将MTD击中点与时间投影室(Time Projection Chamber, TPC)重建出的径迹进行时间和两维空间的匹配, 利用一层探测器就可以实现缪子的测量与识别. MTD是RHIC能区目前唯一的中间快度区缪子探测器, 可以为缪子相关测量提供快速触发, 从而有效提高积分亮度. 在MTD的帮助下, STAR首次可以从双缪子衰变道来进行重味夸克偶素的研究, 并且STAR在重味夸克偶素测量方面的统计误差和系统误差得到了大大改善. MTD于2013年开始安装并部分投入物理运行, 自2014年开始全部投入运行, 在2014和2016年采集了大统计量200 GeV金核-金核碰撞中双缪子产生数据, 对应积分亮度分别为14.2和12.8 nb⁻¹. 2015年采集了200 GeV质子-质子与质子-金核碰撞数据, 对应积分亮度分别为122 pb⁻¹和409 nb⁻¹. 200 GeV质子-金核数据可用于研究重味夸克

偶素的冷核物质效应研究. 而MTD采集的2014与2016年的200 GeV金核-金核实验使得我们可以利用同一个探测器测量从低动量到高横动量区J/ψ的核修正因子(R_{AA}), 这大大降低了J/ψ产额压低横动量依赖测量的系统误差. 这一数据也使得我们得到了200 GeV金核-金核碰撞中迄今为止最高精度的Υ产额压低测量数据. 而200 GeV质子-质子碰撞实验数据为重味夸克偶素热核效应和冷核效应提供了重要的参考数据.

ALICE实验组发现在擦边铅核-铅核碰撞中极低横动量J/ψ的产额有显著增强, 这一实验结果可以用相干光致产生机制来解释^[5]. 如果能够确认该结果来自相干光致产生, 那么此过程可以为夸克-胶子等离子体提供一个新的强有力探针. 因此, 极低横动量J/ψ在相对论重离子碰撞中的产生机制成为了当前高能核物理领域的研究热点之一. STAR合作组近年来利用200 GeV金核-金核碰撞实验数据对极低横动量J/ψ的产生开展了系列测量.

本文将总结近年来RHIC能区相对论重离子碰撞中重味夸克偶素产生的实验研究进展. 第2节为质子-金核碰撞与金核-金核碰撞中J/ψ产生的实验研究. 第3节为质子-金核碰撞与金核-金核碰撞中Υ产生的实验研究. 第4节为擦边金核-金核碰撞中极低横动量J/ψ产生的实验与唯象模型研究. 第5节为讨论和总结.

2 相对论重离子碰撞中J/ψ产生

因为J/ψ具有较大的产额和较大的双轻子衰变分支比, 所以它是相对论重离子碰撞中研究得最多的重味夸克偶素.

2.1 200 GeV质子-金核碰撞中J/ψ产生

在解释相对论重离子碰撞中J/ψ产额压低的实验现象时, 对J/ψ冷核物质效应的理解至关重要. 人们一般用核修正因子 R_{AB} 来表征J/ψ产额的压低程度:

$$R_{AB} = \frac{1}{T_{AB}} \frac{d^2 N_{AB}/dp_T dy}{d^2 \sigma_{pp}/dp_T dy}, \quad (1)$$

其中, T_{AB} 是A+B碰撞中的核重叠函数, $d^2 N_{AB}/dp_T dy$ 是J/ψ在A+B碰撞中的产额, $d^2 \sigma_{pp}/dp_T dy$ 是J/ψ在p+p碰撞中的产额. 近年来STAR利用MTD触发的双缪子事例对200 GeV质子-金核中的J/ψ核修正因子进行了测量.

图1中红色实心圆点为质子-金核碰撞中0–100%中心度J/ψ的核修正因子 R_{pAu} . 这些数据覆盖了中心快度区1–10 GeV/c的横动量区间. 图中黑色空心圆点为PHE-NIX合作组之前在200 GeV氩核-金核碰撞中测量的J/ψ核修正因子 R_{dAu} ^[6]. 两组数据在统计误差和系统误差范围内符合. 两者最大的差别在3–5 GeV/c横动量范围, 仅为1.4倍标准偏差. 这表明质子-金核与氩核-金核中J/ψ的冷核物质效应相当. 两组实验结果都显示在低横动量区J/ψ具有较为明显的产额压低现象, 而在高横动量区, 核修正因子没有显示产额压低. 图中虚线与阴影区域为不同的理论计算结果^[7,8]. nCTEQ15和EPS09N-LO等理论包含了nPDF效应的影响, 其计算结果与实验数据相符. 然而, 包含了额外的核吸收效应的理论计算与实验结果更接近, 如图中虚线所示^[9].

2.2 200 GeV金核-金核碰撞中J/ψ产生

得益于中美为主联合研制的MTD探测器, STAR合作组通过双缪子衰变道测量了0–10 GeV/c宽横动量范围内J/ψ的核修正因子. 图2(a)中红色星状数据点为0–40%中心度200 GeV金核-金核碰撞中J/ψ在不同横动量区间的核修正因子. 图中实心方框与实心圆点分别为ALICE合作组与CMS实验组测量的2.76 TeV铅核-铅核中心碰撞中J/ψ的核修正因子^[11,12]. 实验数据显示在RHIC能区和LHC能区均观测到了J/ψ产额有明显

图1 (网络版彩图) 200 GeV质子-金核与氩核-金核碰撞中J/ψ的核修正因子测量结果及其与理论计算结果的比较. 图取自文献^[10]

Figure 1 (Color online) J/ψ nuclear modification factor as a function of transverse momentum in p+Au and d+Au collisions at 200 GeV. Theoretical calculations are also shown for comparison. The figure is taken from ref. ^[10].

图 2 (网络版彩图) 200 GeV 金核-金核碰撞中中心快度区 J/ψ 核修正因子对横动量(a)和中心度(b)的依赖性及其与 LHC 能区测量结果和理论计算的比较. 图来自文献[10]

Figure 2 (Color online) J/ψ nuclear modification factor as a function of transverse momentum (a) and centrality (b) at mid-rapidity in Au+Au collisions at 200 GeV. The LHC results and theoretical calculations from transport models are also shown for comparison. The figure is taken from ref. [10].

压低, 这指向了重味夸克偶素在 QGP 中的熔解效应. J/ψ 核修正因子的横动量依赖在 RHIC 能区与 LHC 能区具有明显不同的趋势. 在 RHIC 能区, 核修正因子随着横动量的增加没有变化或缓慢增加, 而在 LHC 能区则呈现明显下降的趋势. 这可能是因为 LHC 能区重味夸克产生截面大于 RHIC 能区, 导致 LHC 能区在低横动量区的重组合效应更加明显. 输运模型的理论计算包含了冷核物质效应、QGP 熔解效应和重味夸克重组合效应. 图 2 显示了不同输运模型在 RHIC 能区和 LHC 能区的理论计算结果^[13-16], 分为不同线型以及不同颜色阴影区. 他们都能够系统地描述不同能区 J/ψ 的核修正因子测量结果. 由于重味夸克重组合效应主要集中在低横动量区, 为了方便区分 QGP 熔解效应和重组合效应, 我们可以分别研究低横动量和高横动量 J/ψ 核修正因子的中心度依赖关系. 图 2(b) 为 RHIC 和 LHC 能区中间快度区低横动量 J/ψ 的核修正因子与对撞中心度的依赖关系. 图左侧 N_{part} 较小, 对应擦边对撞; 图右侧 N_{part} 较大, 对应中心对撞. 图中红色星形点为 STAR 合作组的实验数据, 而空心圆点为 PHENIX 合作组的测量结果^[17]. STAR 实验数据与 PHENIX 实验数据符合, 但是具有更好的实验精度. 图中方形点为 LHC 能区 ALICE 的实验数据. 在擦边对撞中, RHIC 能区与 LHC 能区具有相似的核修正因子, 而在中心对撞中, LHC 能区核修正因子明显大于 RHIC 能区. 输运模型可以系统地描述两个能区低横动量 J/ψ 核修正因子的中心度依赖.

STAR 合作组还测量了 RHIC 第一期束流能量扫描中的 J/ψ 核修正因子, 并与 SPS 能区及 LHC 能区结果进行了比较, 研究了 J/ψ 核修正因子的能量依赖^[18]. 图 3(a) 为 17.2–2760 GeV 范围内 0–20% 中心度相对论重离子碰撞中 J/ψ 核修正因子的能量依赖. 低横动量 J/ψ 核修正因子从 SPS 到 RHIC 能区没有明显的能量依赖, 而从 RHIC 到 LHC 则有明显的上升趋势. 这是冷核物质效应、QGP 熔解效应和重味夸克重组合效应共同作用的效果. 在 SPS 能区冷核物质影响较大, 在 RHIC 能区 QGP 熔解效应影响较大, 而在 LHC 能区重组合效应影响较大.

图 1 显示在 RHIC 能区, J/ψ 的冷核物质效应在高横动量区不明显. 而对于重味夸克重组合效应, 由于重味夸克的产额随着横动量的增加下降很快, 而重味夸克重组合几率与重味夸克的产额的平方成正比, 因此, 重组合产生的重味夸克偶素的产额随着横动量的增加急剧下降, 在高横动量区其贡献可以忽略. 因此, 高横动量 J/ψ 是 QGP 熔解效应的干净探针. 图 3(b) 为 STAR 和 CMS 合作组分别测量的中间快度区高横动量 J/ψ 的核修正因子与中心度的依赖关系. 在中心对撞中, 两个能区都观测到了明显的 J/ψ 产额压低. 这明显指向重味夸克偶素的 QGP 熔解效应. 结果显示 LHC 能区高横动量 J/ψ 的核修正因子明显小于 RHIC 能区, 这一能量依赖与低横动量区截然相反. 这一能量依赖也与 QGP 熔解效应的温度依赖期望符合. 但冷核物质效应如核部分

图 3 (网络版彩图) 对心相对论碰撞中中间快度区 J/ψ 核修正因子的对撞量依赖及其与理论计算的比较. (a) 低横动量; (b) 高横动量. 图来自文献[10,18]

Figure 3 (Color online) J/ψ nuclear modification factor as a function of collision energies in central heavy-ion collisions. (a) Low transverse momentum; (b) high transverse momentum. The figure is taken from refs. [10,18].

子分布函数 n_{PDF} 可能对这一能量依赖也有贡献. 这需要对 LHC 能区高横动量 J/ψ 的冷核物质效应进行更深入的研究.

3 相对论重离子碰撞中 Υ 产生

底夸克偶素 Υ 也是夸克-胶子等离子体的重要探针. 这是由于实验上易于观测的底夸克偶素 Υ 有 3 个态 $\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(2S)$ 和 $\Upsilon(3S)$. 它们的束缚能差异较大, 所以它们的熔解温度也不尽相同[19]. 束缚能越小就越容易在 QGP 中熔解, 这一现象称之为“顺次熔解(Sequential Melting)”. 由此, 我们可以通过测量重离子碰撞中底夸克偶素 Υ 各态的产额压低情况推断形成 QGP 的温度.

然而, 在研究底夸克偶素在重离子碰撞中的压低时, 我们仍然需要考虑其他效应带来的影响. 重离子碰撞中的产生机制包括直接产生(Direct)、由激发态底夸克偶素衰变产生(Feed Down)和重组产生. 直接产生指的是对撞初始过程通过部分子硬散射产生的 $b\bar{b}$ 夸克对直接结合, 并辐射出软胶子产生色中性底夸克偶素的过程. 衰变产生指的是对撞产生的 $b\bar{b}$ 夸克对形成质量较大的底夸克偶素, 再衰变为质量更小的 Υ 态的过程. 重组产生指重离子碰撞初始硬散射过程产生的 $b(\bar{b})$ 夸克或者是底夸克偶素在 QGP 中离解产生未束缚的 $b(\bar{b})$ 夸克相遇并重新结合产生重夸克偶素的过程. 离解和重组产生都属于热介质效应(Hot Medium Ef-

fect). 参考文献[20–22]表明由于底夸克的反应截面小, 平均每次对心核-核碰撞产生的 $b\bar{b}$ 远小于 1 对, 且 b 夸克在 QGP 介质中很难达到热化, 在 RHIC 能量下重组过程对 Υ 产额的贡献可以忽略.

而对于冷核物质, RHIC 能区 Υ 被同行粒子离解的几率相比 J/ψ 小很多. 在强子化物质中, 最主要的成分是 π 介子和 ρ 介子. 参考文献[21]指出, 在介质温度为 150 MeV 的情况下, $\Upsilon(1S)$ 与 π 介子和 ρ 介子的反应截面 $\sigma_{\pi\Upsilon}$ 和 $\sigma_{\rho\Upsilon}$ 都只有 0.2 mb, 分别为 $\sigma_{\pi J/\psi}$ 和 $\sigma_{\rho J/\psi}$ 的 1/5 和 1/10. 因此在 RHIC 能量下同行粒子离解对 $\Upsilon(1S)$ 的贡献可以忽略. 在 RHIC 能区, 相对于 J/ψ , Υ 的重产生效应以及同行粒子离解带来的影响都比较小, 因此 Υ 被认为是更干净的 QGP 探针.

3.1 200 GeV 质子-金核对撞中 Υ 产额压低

通常认为在质子或轻核(如氘核)与重核碰撞中不产生夸克-胶子等离子体, 没有热介质效应. 所以我们可以测量质子(氘核)与重核对撞中 Υ 的核修正因子来分析冷核物质效应带来的影响.

图 4 显示了 200 GeV 质子-金核和氘核-金核碰撞中 $\Upsilon(1S+2S+3S)$ 核修正因子随快度的变化. 红色星形数据点和蓝色圆形数据点分别是 STAR 在质子-金核和氘核-金核碰撞中的测量结果, 绿色菱形是 PHENIX 在氘核-金核碰撞中的测量结果. 根据实验数据, $\Upsilon(1S+2S+3S)$ 核修正因子在不同快度区均小于 1, 表明了 RHIC

图 4 (网络版彩图) 200 GeV 质子(氘核)-金核碰撞 $\Upsilon(1S+2S+3S)$ 核修正因子随快度的变化. 图来自文献[10]

Figure 4 (Color online) $\Upsilon(1S+2S+3S) R_{AA}$ as a function of rapidity in p(d)+Au 200 GeV collisions. The figure is taken from ref. [10].

能区 $\Upsilon(1S+2S+3S)$ 产额压低依然受到一些冷核物质效应的影响.

图 4 中蓝色阴影区域是只考虑遮蔽效应的理论计算结果. 在冷核物质效应中, 除了遮蔽效应, 还存在着其他效应. 虚线就是另外考虑了部分子能量损失效应的理论计算结果. 通过对比我们可以发现, 实验数据更支持虚线的计算结果, 即认为存在部分子能量损失效应.

3.2 200 GeV 金核-金核碰撞中 Υ 的产额压低

通过 MTD 探测器, STAR 合作组可以在线触发双缪子事例以获得大统计量双缪子数据并通过双缪子衰变道重建 Υ 粒子. 图 5(a) 为 200 GeV 金核-金核碰撞中双缪子不变质量谱. 其中红色圆点为电荷相反的缪子对的不变质量谱. 由于缪子的韧致辐射比电子小得多, 通过双缪子道重建得到的 Υ 不变质量谱更接近高斯分布, 有利于分辨 Υ 的不同态. 图中蓝色圆点为电荷相同的缪子对不变质量谱, 用来描述电荷相反的缪子对不变质量谱中的随机组合本底. 除了随机组合本底, 还有来自底夸克和反底夸克半轻子衰变以及 Drell-Yan 过程造成的关联本底. 通过同时拟合电荷相同和电荷相反的双缪子不变质量谱来获得 $\Upsilon(1S)$ 和 $\Upsilon(2S+3S)$ 的产额, 进而计算他们的核修正因子.

图 5(b) 显示了 $\Upsilon(1S)$ 和 $\Upsilon(2S+3S)$ 核修正因子 R_{AA} 随着不同中心度的变化. 从图中可以看出, $\Upsilon(1S)$ 和 $\Upsilon(2S+3S)$ 核修正因子 R_{AA} 随着中心度增加而减小. 在中心碰撞中, 介质温度更高, 因而激发态的底夸克偶素如 $\Upsilon(2S+3S)$ 和 χ_b 等更容易在介质中熔解, 从而 $\Upsilon(1S)$ 和 $\Upsilon(2S+3S)$ 受到了明显的压低. 同时, 可以看出在最中心碰撞中, $\Upsilon(2S+3S)$ 受到的压低比 $\Upsilon(1S)$ 的更严重. 这一结果可以用“顺次压低”现象来解释. 这是因为与 $\Upsilon(1S)$ 相比, $\Upsilon(2S+3S)$ 的结合能更低, 所以在介质中更容易离解, 受到的压低更明显.

3.3 RHIC 能区与 LHC 能区 Υ 实验结果的比较

图 6(a) 和 (b) 分别显示了 $\Upsilon(1S)$ 和 $\Upsilon(2S+3S)$ 核修正因子在 RHIC 能区和 LHC 能区 [23] 的对比. 其中, 红色星形数据点为 STAR 测得的 200 GeV 金核-金核碰撞中的结果, 灰色菱形数据点为 CMS 测得的 2.76 TeV 铅核-铅核碰撞中的结果. 从图 6(a) 中可以看出在 RHIC 能区和 LHC 能区 $\Upsilon(1S)$ 受到的压低相似. 由于冷核物质效应的存在, 以及激发态的贡献, 直接产生的 $\Upsilon(1S)$ 在 RHIC 能区和 LHC 能区是否离解依然存在争议. 目前获得的各项实验数据尚不足以给出确定的答案. 从图 6(b) 可以看到在中心碰撞中 RHIC 能区和 LHC 能区 $\Upsilon(2S+3S)$ 核修正因子没有明显差异, 而在偏心碰撞中, LHC 能区 $\Upsilon(2S+3S)$ 核修正因子比 RHIC 能区的小, 意味着 $\Upsilon(2S+3S)$ 在 LHC 能区受到了更多的压低. LHC 能区碰撞能量较高, 产生的介质温度更高, 因而 $\Upsilon(2S+3S)$ 熔解得更彻底, 产额压低也就最明显. 值得一提的是, LHC 能区 $\Upsilon(3S)$ 的压低是目前实验观测到在相对论重离子碰撞中最强烈的重夸克偶素压低.

3.4 与理论计算的比较

图 7(a) 和 (b) 将 RHIC 与 LHC 能区 $\Upsilon(1S)$ 和 $\Upsilon(2S+3S)$ 的测量结果与不同的理论模型进行了比较. Krouppa 等人 [24] 提出的模型采用基于格点量子色动力学结果的重夸克势. 夸克-胶子等离子体的初始温度设置为 RHIC 能区 200 GeV 金核-金核碰撞中约为 440 MeV, LHC 能区 2.76 TeV 铅核-铅核碰撞中则为 545 MeV. 同时 $\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(2S)$, $\Upsilon(3S)$ 各态的离解温度分别设为 600, 230 和 170 MeV. 而 Du 等人 [21] 提出的模型中利用热力学 T 矩阵来计算介质中重夸克偶素的结合能. 在该模型中, 200 GeV 金核-金核和 2.76 TeV 铅核-铅核中心碰撞产生

图 5 (网络版彩图)STAR 实验组利用 MTD 通过双缪子衰变道重建的 Υ 不变质量谱(a)以及 $\Upsilon(1S)$ 和 $\Upsilon(2S+3S)$ 核修正因子在金核-金核 200 GeV 随中心度的变化(b). 图来自文献[10]

Figure 5 (Color online) Invariant mass distribution of Υ candidates via di-muon channel at STAR thanks to the MTD detector (a); $\Upsilon(1S)$ and $\Upsilon(2S+3S)$ R_{AA} as a function of N_{part} in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV from STAR (b). The figure is taken from ref. [10].

图 6 (网络版彩图)STAR 200 GeV 金核-金核碰撞中 $\Upsilon(1S)$ (a) 和 $\Upsilon(2S+3S)$ (b) 核修正因子与中心度的依赖关系, 以及与 CMS 测得的 2.76 TeV 铅核-铅核碰撞中结果的比较. 图来自文献[10]

Figure 6 (Color online) Comparison of $\Upsilon(1S)$ (a) and $\Upsilon(2S+3S)$ (b) R_{AA} in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV from STAR and Pb+Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV from CMS. The figure is taken from ref. [10].

的 QGP 的初始温度分别为 310 和 555 MeV. $\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(2S)$ 和 $\Upsilon(3S)$ 的离解温度分别为 500, 240 和 190 MeV. Rapp 模型^[21]考虑了重产生和冷核物质效应, Rothkopf 模型^[24]不包含冷核物质效应和重产生效应. 在实验误差范围类, 两种模型理论计算都与实验结果相一致. 在现有的实验精度下, 尚不足以区分这两种模型, 并对 QGP 的温度进行精确限制.

3.5 小结

测量重夸克偶素在相对论重离子碰撞中的产额压低有利于我们理解碰撞形成的 QGP 的性质. 然后, 除了

由于 QGP 熔解造成的重夸克偶素离解, 还有重产生等热介质效应. 此外还需要考虑包括同行粒子离解效应的冷核物质效应. 对于底夸克偶素 $\Upsilon(1S)$ 来说, 在 RHIC 能区其重产生和同行粒子离解效应带来的影响比较小, 被认为是比 J/ψ 更干净的 QGP 探针. 实验上我们通过测量质子-金核和氦核-金核碰撞中底夸克偶素 Υ 的产额压低来研究冷核物质效应带来的影响. 实验数据倾向于在核部分子分布函数 nPDF 效应之外还存在部分子能量损失机制的影响. 在 200 GeV 金核-金核中心碰撞中我们观察到了明显的底夸克偶素 $\Upsilon(1S)$ 和 $\Upsilon(2S+3S)$ 压低, 并且 $\Upsilon(2S+3S)$ 压低比 $\Upsilon(1S)$ 更严重. 这表明

图 7 (网络版彩图)RHIC与LHC能区 $\Upsilon(1S)$ (a)和 $\Upsilon(2S+3S)$ (b)核修正因子中心度依赖关系与运输模型^[21,24]计算结果的比较. 图来自文献^[10]

Figure 7 (Color online) Comparison of $\Upsilon(1S)$ (a) and $\Upsilon(2S+3S)$ (b) nuclear modification factor measurements at RHIC and LHC energies with theoretical calculations from transport model ^[21,24]. The figure is taken from ref. ^[10].

$\Upsilon(2S+3S)$ 在中心碰撞中已经遭到离解, 并且由于其结合能较低, 相对 $\Upsilon(1S)$ 更容易在QGP中离解, 这也与“顺次熔解”符合. 然而实验结果尚不能给出直接产生 $\Upsilon(1S)$ 离解的证据. 与CMS 2.76 TeV铅核-铅核碰撞测量结果相比, 两个能区 $\Upsilon(1S)$ 的压低情况相似. 但在偏心碰撞中, CMS $\Upsilon(2S+3S)$ 受到的压低要比STAR金核-金核200 GeV中的更严重. 这可能是因为2.76 TeV铅核-铅核碰撞产生的QGP温度更高, $\Upsilon(2S+3S)$ 离解更彻底. 不同模型给出的计算结果与实验数据在误差范围内相符合, 但目前尚无法区分各种模型.

4 相对论重离子碰撞中极低横动量 J/ψ 产生

在相对论重离子碰撞中, 重离子核以接近光速运动, 由于洛伦兹收缩效应, 其激发的电磁场被高度压缩在垂直于运动方向的平面上, 与光子的电磁场十分类似. 费米1924年首先提出用准实光子的通量来替代电磁场, 描述这些相互作用. 从一个核发射的准实光子可以在极短的时间内涨落成夸克-反夸克对; 该夸克对可以与另外一个重离子核发生弹性散射, 产生矢量介子, 这就是重离子碰撞中的相干光致过程^[25]. 相干光致产生过程在重离子超外围碰撞中(Ultra-Peripheral Collisions, UPC)被仔细研究^[26-29]. 超外围碰撞是指碰撞参数(Impact Parameter, b)大于两个对撞核的半径之和的碰撞, 两个对撞核没有重叠区域, 从而排除强子-强子碰撞的干扰. 其中, 由于 J/ψ 拥有较大的质量, 其相

干光致产生过程可以被微扰量子色动力学(pQCD)很好地描述^[30]. 根据pQCD的计算结果, J/ψ 的相干光致产生截面与重离子核中的胶子分布函数直接相关. 因此 J/ψ 相干光致产生过程的测量可以帮助人们了解重核中低Bjorken- x 的胶子分布(在低 x 区域, 胶子分布函数有相当大的不确定度^[31]). 相干光致产生的 J/ψ 有一些显著的特征, 其中最重要的是相干(Coherence)和干涉(Interference). 相干指的是发射的准实光子与整个重离子核耦合作用, 根据测不准原理, 产物的横动量必须满足 $p_T \sim 1/R_A$ (R_A 为重离子的半径). 对于重核(金核、铅核)来说 $p_T \sim 30$ MeV/c, 因此导致产生的 J/ψ 的横动量非常低, 且其分布与核形状因子(Nuclear Form Factor)直接相关. 干涉特征的来源如下: 参与对撞的两个核, 哪个核作为光子发射核, 哪个核作为靶核, 在物理上是不可区分的, 因此总的振幅应为这两个不可分过程的振幅在相空间上相加; 由于产物 J/ψ 是矢量介子, 其宇称为 -1 , 导致这两个过程的振幅符号相反, 因此对于 p_T 趋近于0, J/ψ 的产额会被极大地压低.

传统观点认为: 在重离子碰撞实验中, J/ψ 的相干光致产生过程只存在于超外围碰撞中; 在非超外围碰撞中, 对撞核中有部分核子参与强相互作用, 从而导致重离子核破损(Break-Up), 无法满足相干条件. 然而最近ALICE合作组测量了2.76 TeV铅核-铅核非UPC碰撞中前向快速区 $2.5 < y < 4$ 极低横动量 $p_T < 0.3$ GeV/c J/ψ 的产额, 发现其在偏心碰撞(中心度: 50%–90%)中有显著的反常增强^[31]. 该异常增强不能被核子-核子强相互

作用产生加上其受到的冷核物质和热介质效应所解释, 表明在重离子对撞中极低横动量的J/ψ还有其他来源. 该反常增强的横动量区间与相干光致产生的横动量区间高度一致, 暗示着在非UPC对撞中可能依然存在J/ψ相干光致产生! 该增强是否源自相干光致产生? 如果来自相干光致产生, 这些破损的核是如何满足相干条件的; 是否会受到重叠区域激烈的相互作用的影响? 这些需要从实验和理论上进行深入探索.

4.1 STAR初步实验结果

ALICE在2.76 TeV铅核-铅核碰撞中观测到的J/ψ在极低横动量的异常增强是否在RHIC能区的重离子对撞中也存在? STAR合作组利用2010和2011年采集7.2亿200 GeV金核-金核最小无偏事例和2012年采集的2.7亿193 GeV铀核-铀核最小无偏事例测量了J/ψ在极低横动量的产额^[32]. 图8(a)显示的是STAR测量的J/ψ在200 GeV金核-金核和193 GeV铀核-铀核碰撞中的核修正因子. 从图中可以看出, 对于横动量大于0.2 GeV/c的J/ψ, 其核修正因子小于1, 表明产额有压低, 这是由QGP熔解效应、重组合效应和冷核物质效应共同作用的结果; 对于极低横动量(<0.1 GeV/c), 在偏心对撞(40%–80%)中J/ψ的产额有几十倍的反常增强, 不能被以上提到的各种效应所解释. 铀核-铀核碰撞中的结果中心值系统地高于金核-金核碰撞中的结

果, 但在误差范围内仍然一致.

为了探索该异常增强的来源, STAR进一步研究了该异常增强随对碰撞中心度的依赖性. 图8(b)显示的是STAR测量的J/ψ异常增强的产额(对 $p_T < 0.1$ GeV/c的产额进行积分并减去核子间相互作用的贡献)在200 GeV金核-金核和193 GeV铀核-铀核碰撞中随碰撞中心度的变化. 从图中可以发现, 该异常增强对碰撞中心度无显著依赖性, 再次表明该增强不源自重叠区域核子间的相互作用. 在图中, 来自核子间相互作用的贡献也被显示出来作为对比, 其对中心度有强烈的依赖性, 并在测量中心度范围内(30%–80%)远低于该反常增强. 如果该异常增强源自相干光致产生, 那么在铀核-铀核的测量结果就要高于金核-金核的测量结果, 因为铀核所携带的电荷数要大于金核, 从而导致其光子通量要高于金核的光子通量. 然而由于统计量的限制, STAR并未在误差范围内观察到显著的差异性.

在超外围碰撞中研究相干光致产生过程, 产额随四动量转移(t)的变化是关键性测量, 因为它能集中反映“相干”和“干涉”的特性. STAR测量了在偏心对撞(40%–80%)中该异常增强随四动量转移(t)的变化, 如图9(a)图所示. 该分布与UPC中测量到的相干光致产生的矢量介子的 t 分布高度类似, 可以经验性地被指数函数描述. 用指数函数拟合该分布, 可以得到指数分布斜率为 (199 ± 31) (GeV/c)², 与以金核为靶核得到的J/ψ

图 8 (网络版彩图) (a) 200 GeV金核-金核碰撞与193 GeV铀核-铀核碰撞中J/ψ核修正因子随J/ψ横动量的变化; (b) J/ψ异常增强产额在200 GeV金核-金核和193 GeV铀核-铀核碰撞中随碰撞中心度的变化. 数据点上的误差棒表征测量的统计误差, 方框表示系统误差. 图来自文献^[33]

Figure 8 (Color online) (a) the J/ψ nuclear modification factor R_{AA} as a function of p_T in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV and U+U collisions at $\sqrt{s_{NN}}=193$ GeV; (b) the J/ψ excess yield as a function of number of participate nucleons (N_{part}) in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV and U+U collisions at $\sqrt{s_{NN}}=193$ GeV. The error bars represent the statistical uncertainties, while the boxes represent the systematic uncertainties. The figure is taken from ref. ^[33].

相干光致预期计算结果 196 (GeV/c)^2 高度一致^[34]. 拟合区间选为 $0.002\text{--}0.015 \text{ (GeV/c)}^2$, 舍弃小于 0.002 的区间是为了避免干涉的影响, 而排除高 t 区间可以减少非相干产生和核子间强产生的影响. STAR在最低 t 的测量值明显低于指数拟合曲线, 这预示着可能的干涉效应造成的压低. 考虑了干涉效应的计算结果^[35]能够很好地描述该分布. 相干光致产生的“相干”和“干涉”两大特性在异常增强的 t 分布中均有反映.

以上STAR初步实验测量结果表明, 在偏心对撞极低横动量的 J/ψ 产生确实有异常增强; 该异常增强不是来自重叠区域的核子间相互作用, 与相干光致产生的特性高度一致, 强烈预示着在核-核碰上的情况下依然有相干光致产生过程的存在.

4.2 唯象模型计算

实验上在重离子偏心碰撞中观测到的 J/ψ 极低横动量反常增强是否源自相干光致产生? 这一问题回答还需要理论模型的定量计算. 相干光致产生过程的计算可以等效成一个经典过程和一个量子过程. 经典过程用以描述重离子核激发的光子通量; 量子过程用来描述光子和重离子核的作用截面. 目前正对超外围碰撞的计算很多, 方法也很成熟, 但是针对核-核碰撞的情况的计算非常少.

文献^[36]用等效光子近似来描述重离子核引起的光子通量^[37], 以电子质子对撞中的 γp 实验测量作为输

入, 采用Vector Meson Dominance (VMD)模型、光学原理和量子Glauber模型来描述光子与重离子核的作用截面. 对于重叠区域强相互作用对相干产生可能造成的影响, 文献分别从其对准实光子的发射和靶核的耦合来考虑, 认为它们要么耦合于整个核或者仅仅耦合于旁观核(Spectators), 产生了4种假设组合. 图9(b)显示的是 J/ψ 相干光致产生在非UPC 200 GeV金核-金核碰撞中的理论计算结果. 从图中可以发现, 在偏心对撞60%–80%中心度中, 4种假设条件下的计算结果差异很小, 并且都能很好地描述STAR实验测量结果. 这进一步表明在偏心对撞中观测到的极低横动量反常增强源自相干光致产生. 在半偏心碰撞(30%–60%)中, 4种假设条件下的计算结果有很大差异; 光子与靶核都耦合于整个核的计算结果显著高于STAR实验结果, 表明在重叠区域的核子间的相互作用对相干光致产生造成了干扰, 压低了相干光致产生. 光子与靶核都耦合于旁观核的计算又低估了实验观测结果, 那么在剩下的两种假设条件的计算结果, 哪一个更符合实际情况呢? 对于准实光子, 由于电磁场的推迟效应, 其发射时间要比核-核碰撞早大约 $R_A/(\gamma c)$, 其中 γ 为洛伦兹收缩因子. 因此, 准实光子的发射不受核-核碰撞的影响, 而STAR最近发表的双光子到电子对的实验结果^[38]与理论计算的比较^[39]也进一步证明了这一点. 因此, 较为合理的假设应为光子的发射耦合于整个核, 而靶核由于核子间强相互作用只耦合于旁观者区域. 然而旁

图9 (网络版彩图)200 GeV金核-金核碰撞中 J/ψ 异常增强产额对四动量转移(t)和中心度(b)的依赖关系. 数据点上的误差棒表征测量的统计误差, 方框表示系统误差. 右图中不同格式的线条表征不同假设条件的计算结果. 图来自文献^[33]

Figure 9 (Color online) The J/ψ excess yield as a function of four momentum transfer (t) (a) and centrality (b) in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$. The error bars represent the statistical uncertainties, while the boxes represent the systematic uncertainties. The different lines in right panel represent the calculations with different scenarios. The figure is taken from ref. ^[33].

观核在碰撞后要碎裂, 它是如何保持相干的呢? 相较于 J/ψ 的产生时间尺度, 旁观核的碎裂是需要很长的时间. 因此, 在 J/ψ 的产生过程中, 可以近似认为旁观核的状态是不变的, 从而满足相干条件.

RHIC 已于 2018 年分别完成同重素钌 ($_{44}\text{Ru}^{96}$) 和锆 ($_{40}\text{Zr}^{96}$) 的 200 GeV 对撞实验的运行, 在运行期间 STAR 分别采集了 30 亿个钌核-钌核和锆核-锆核最小无偏对撞事例. 同重素钌核和锆核所携带的电荷数 (Z) 只有金核的 1/2 左右. 由于重离子核所激发的光子通量与电荷数的平方成正比 (Z^2), 钌核和锆核的光子通量要远低于金核, 如果在金核-金核碰撞中观测到的异常增强源自相干光致产生, 那么该反常增强在同重素钌核和锆核碰撞中的产额要远低于金核碰撞中的结果. 钌核和锆核所携带的电荷数也有 10% 左右的差距, 因此相干光致产生在钌核和锆核之前也有差异. 基于此, 文献 [40] 预言了 J/ψ 相干光致产生在钌核-钌核和锆核-锆核碰撞中的产额, 如图 10(a) 所示. 从图中可以看出, J/ψ 相干产生在钌核-钌核碰撞的产额是其在锆核-锆核碰撞的 1.2 倍; 在金核-金核碰撞的产额是同重素碰撞的大约 4 倍, 这些都是由于对撞核的差异造成的.

钌核和锆核的大小和形状因子与金核有很大差异, 它们碰撞时的碰撞参数也不同. 基于相干光致产生的假设, 产生的 J/ψ 的 t 分布也必然在不同的对撞系统中不一样. 图 10(b) 显示的是文献 [37] 计算得到的相干光致产生 J/ψ 在 200 GeV 金核-金核、钌核-钌核和锆核-锆核碰撞中的 t 分布. 相干产生的 J/ψ 的 t 分布形状在钌核和锆核中基本一致, 这是由于同重素钌核和锆核的

核密度分布非常类似. t 分布在钌核和锆核中比其在金核中更缓, 这是由于钌核和锆核比金核小. 根据 Galuber 模型的计算, 钌核-钌核和锆核-锆核碰撞的中心度被选为 47%–75%, 以保证其来自重叠区域的核子间的相互作用的贡献与其在中心度为 60%–80% 的金核-金核碰撞下贡献一致.

4.3 小结

J/ψ 的相干光致产生是重离子对撞中超外围碰撞物理最重要的物理课题之一, 它能够直接测量胶子在核中的分布, 这是未来建造的电子重离子对撞机主要物理目标之一. 传统观点认为, 当参与对撞的两个重离子核撞上的时候, 由于核的破损碎裂、相干条件无法满足, 相干光致产生无法发生. 然而 STAR 和 ALICE 在偏心对撞极低横动量的 J/ψ 的测量结果强烈暗示着相干光致产生在非超外围碰撞中存在的可能性. 理论模型计算结果进一步支持这一发现, 并表明该相干光致产生受到了重叠区域核子间相互作用的影响. RHIC 2018 年进行的同重素钌核和锆核碰撞, 是检测实验上观测到的反常增强是否源自相干光致产生的绝佳场所. 未来 J/ψ 的相干光致产生可能为夸克胶子等离子体提供一个新的强有力的探针.

5 讨论和结论

本文总结了 RHIC 能区近年来在相对论重离子碰撞中重味夸克偶素实验研究方面的进展. 得益于中美

图 10 (网络版彩图) 理论计算的 J/ψ 相干光致产额在黄金、钌钌和锆锆 200 GeV 对撞中对 N_{part} (a) 和四动量转移 t (b) 的依赖性. 图来自文献 [40]

Figure 10 (Color online) The calculated J/ψ coherent photoproduction as a function of N_{part} (a) and t (b) in Zr+Zr, Ru+Ru, and Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200 \text{ GeV}$. The figure is taken from ref. [40].

为主联合研制的缪子探测器, STAR 合作组系统测量了 200 GeV 质子-金核与金核-金核对撞中 J/ψ 和 Υ 粒子的产额压低. 高横动量 J/ψ 和 Υ 的实验明显指向 QGP 熔解效应. 而 RHIC 与 LHC 能区低横动量 J/ψ 的核修正因子结果比较表明 LHC 能区低横动量 J/ψ 产生受到显著的重味夸克重组组合效应的贡献. 包含了冷核物质效应、QGP 熔解效应和重味夸克重组组合效应的输运模型可以系统地描述 RHIC 和 LHC 测得的重味夸克偶素产额压低及其中心度、横动量依赖等. 这些数据为 QGP 的寻找提供了重要的证据, 但是受制于统计量, 目前的实

验数据还不足精确测量 QGP 的特性. 显著提升探测器的性能和采集的积分亮度是十分必要的, 也需要从实验和理论上寻找一些新的观测量.

STAR 合作组最近也开展了极低横动量 J/ψ 产生的实验研究. 通过实验研究及其与唯象理论的对比, 表明这一过程很有可能来自相干光致产生. 2018 年采集的钕核-钕核及铅核-铅核对撞数据将提供更有力的实验证据. 这一过程对研究 J/ψ 的熔解效应和相对论重离子碰撞中的磁场结构具有重要意义, 可能为夸克-胶子等离子体提供一个新的强有力的探针.

参考文献

- 1 Matsui T, Satz H. J/ψ suppression by quark-gluon plasma formation. *Phys Lett B*, 1986, 178: 416–422
- 2 Braun-Munzinger P, Stachel J. (Non)thermal aspects of charmonium production and a new look at J/ψ suppression. *Phys Lett B*, 2000, 490: 196–202
- 3 Brambilla N, Eidelman S, Heltsley B K, et al. Heavy quarkonium: Progress, puzzles, and opportunities. *Eur Phys J C*, 2011, 71: 1534, arXiv: 1010.5827
- 4 Yang C, Huang X J, Du C M, et al. Calibration and performance of the STAR Muon Telescope Detector using cosmic rays. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 2014, 762: 1–6, arXiv: 1402.1078
- 5 Adam J, et al. (ALICE Collaboration). Measurement of an excess in the yield of J/ψ at Very Low p_T in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 222301
- 6 Adare A, et al. (PHENIX Collaboration). Transverse-momentum dependence of the J/ψ nuclear modification in d+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV. *Phys Rev C*, 2013, 87: 034904, arXiv: 1204.0777
- 7 Lansberg J P, Shao H S. Towards an automated tool to evaluate the impact of the nuclear modification of the gluon density on quarkonium, D and B meson production in proton-nucleus collisions. *Eur Phys J C*, 2017, 77: 1, arXiv: 1610.05382
- 8 Shao H S. HELAC-Onia 2.0: An upgraded matrix-element and event generator for heavy quarkonium physics. *Comput Phys Commun*, 2016, 198: 238–259, arXiv: 1507.03435
- 9 Ferreira E G, Fleuret F, Lansberg J P, et al. Centrality, rapidity, and transverse-momentum dependence of gluon shadowing and antishadowing on J/ψ production in dAu collisions at $\sqrt{s}=200$ GeV. *Few-Body Syst*, 2012, 53: 27–36, arXiv: 1201.5574
- 10 Zha W, Mischke A, Kuijper P. Recent highlights from STAR. *EPJ Web Conf*, 2018, 171: 01004
- 11 Abelev B, et al. (ALICE Collaboration). Centrality, rapidity and transverse momentum dependence of J/ψ suppression in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV. *Phys Lett B*, 2014, 734: 314–327, arXiv: 1311.0214
- 12 Chatrchyan S, et al. (CMS Collaboration). Suppression of non-prompt J/ψ , prompt J/ψ , and $\Upsilon(1S)$ in PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV. *J High Energ Phys*, 2012, 2012(5): 63, arXiv: 1201.5069
- 13 Zhao X, Rapp R. Charmonium in medium: From correlators to experiment. *Phys Rev C*, 2010, 82: 064905, arXiv: 1008.5328
- 14 Liu Y P, Qu Z, Xu N, et al. J/ψ transverse momentum distribution in high energy nuclear collisions. *Phys Lett B*, 2009, 678: 72–76, arXiv: 0901.2757
- 15 Zhou K, Xu N, Xu Z, et al. Medium effects on charmonium production at ultrarelativistic energies available at the CERN Large Hadron Collider. *Phys Rev C*, 2014, 89: 054911, arXiv: 1401.5845
- 16 Zhao X, Rapp R. Medium modifications and production of charmonia at LHC. *Nucl Phys A*, 2011, 859: 114–125, arXiv: 1102.2194
- 17 Chatrchyan S, et al. (PHENIX Collaboration). J/ψ production versus centrality, transverse momentum, and rapidity in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV. *Phys Rev Lett*, 2007, 98: 232301
- 18 Adamczyk L, et al. (STAR Collaboration). Energy dependence of J/ψ production in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=39, 62.4$ and 200 GeV. *Phys Lett*

- B, 2017, 771: 13–20, arXiv: [1607.07517](#)
- 19 Mócsy Á. Potential models for quarkonia. *Eur Phys J C*, 2009, 61: 705–710, arXiv: [0811.0337](#)
- 20 Emerick A, Zhao X, Rapp R. Bottomonia in the quark-gluon plasma and their production at RHIC and LHC. *Eur Phys J A*, 2012, 48: 72, arXiv: [1111.6537](#)
- 21 Du X, He M, Rapp R. Color screening and regeneration of bottomonia in high-energy heavy-ion collisions. *Phys Rev C*, 2017, 96: 054901, arXiv: [1706.08670](#)
- 22 Lin Z, Ko C M. Υ absorption in hadronic matter. *Phys Lett B*, 2001, 503: 104–112
- 23 Khachatryan V, et al. (CMS Collaboration). Suppression of $\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(2S)$, and $\Upsilon(3S)$ quarkonium states in PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV. *Phys Lett B*, 2017, 770: 357–379, arXiv: [1611.01510](#)
- 24 Krouppa B, Rothkopf A, Strickland M. Bottomonium suppression using a lattice QCD vetted potential. *Phys Rev D*, 2018, 97: 016017, arXiv: [1710.02319](#)
- 25 Bertulani C A, Klein S R, Nystrand J. Physics of ultra-peripheral nuclear collisions. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 2005, 55: 271–310
- 26 Afanasiev S, et al. (PHENIX Collaboration). Photoproduction of J/ψ and of high mass e^+e^- in ultra-peripheral Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV. *Phys Lett B*, 2009, 679: 321–329, arXiv: [0903.2041](#)
- 27 Abelev B, et al. (ALICE Collaboration). Coherent J/ψ photoproduction in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV. *Phys Lett B*, 2013, 718: 1273–1283, arXiv: [1209.3715](#)
- 28 Abelev B, et al. (ALICE Collaboration). Exclusive J/ψ photoproduction off protons in ultraperipheral p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 232504, arXiv: [1406.7819](#)
- 29 Frankfurt L, Koepf W, Strikman M. Diffractive heavy quarkonium photoproduction and electroproduction in QCD. *Phys Rev D*, 1998, 57: 512–526
- 30 Rebyakova V, Strikman M, Zhalov M. Coherent ρ and J/ψ photoproduction in ultraperipheral processes with electromagnetic dissociation of heavy ions at RHIC and LHC. *Phys Lett B*, 2012, 710: 647–653, arXiv: [1109.0737](#)
- 31 Eskola K J, Paukkunen H, Salgado C A. EPS09—A new generation of NLO and LO nuclear parton distribution functions. *J High Energy Phys*, 2009, 2009: 065, arXiv: [0902.4154](#)
- 32 Zha W. Excess of J/ψ yield at very low transverse momenta in Au+Au collisions at and U+U at with STAR. *J Phys-Conf Ser*, 2017, 779: 012039
- 33 Zha W. Excess of J/ψ yield at very low transverse momenta in Au+Au and U+U collisions measured by the STAR experiment. In: Proceedings of Science (INPC2016), 2016. 332
- 34 Klein S R, Nystrand J. Exclusive vector meson production in relativistic heavy ion collisions. *Phys Rev C*, 1999, 60: 014903
- 35 Klein S R, Nystrand J. Interference in exclusive vector meson production in heavy-ion collisions. *Phys Rev Lett*, 2000, 84: 2330–2333
- 36 Zha W, Klein S R, Ma R, et al. Coherent J/ψ photoproduction in hadronic heavy-ion collisions. *Phys Rev C*, 2018, 97: 044910, arXiv: [1705.01460](#)
- 37 Krauss F, Greiner M, Soff G. Photon and gluon induced processes in relativistic heavy-ion collisions. *Prog Particle Nucl Phys*, 1997, 39: 503–564
- 38 Adam J, et al. (STAR Collaboration). Low- p_T e^+e^- pair production in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV and U+U collisions at $\sqrt{s_{NN}}=193$ GeV at STAR. *Phys Rev Lett*, 2018, 121: 132301, arXiv: [1806.02295](#)
- 39 Zha W, Ruan L, Tang Z, et al. Coherent lepton pair production in hadronic heavy ion collisions. *Phys Lett B*, 2018, 781: 182–186, arXiv: [1804.01813](#)
- 40 Zha W, Ruan L, Tang Z, et al. Coherent photo-produced J/ψ and dielectron yields in isobaric collisions. *Phys Lett B*, 2019, 789: 238–242, arXiv: [1810.02064](#)

Recent progress of quarkonium measurements in heavy-ion collisions at RHIC energies from STAR

WANG PengFei^{1,2}, ZHA WangMei^{1,2*} & TANG ZeBo^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

² Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

One of the primary goals of relativistic heavy-ion collisions is searching for quark-gluon plasma and studying its properties. Among the probes of QGP, the suppression of heavy quarkonium, due to color screening, in heavy-ion collisions has been proposed as a direct signature of QGP formation. However, other effects, such as regeneration and cold nuclear matter effect, would also significantly modify the production of heavy quarkonium in heavy-ion collisions. Recently, the STAR collaboration has installed a new detector, the Muon Telescope Detector. It enables the STAR collaboration to measure quarkonium precisely via di-muon decay channel to constrain the motion of heavy quarkonium in QGP. In this article, the recent progress of quarkonium measurements in p+Au and Au+Au collisions at 200 GeV will be reviewed. Moreover, the measurement of very-low- p_T J/ψ , which is likely from coherent photoproduction in heavy-ion collisions, and its physics implication will be discussed.

quark gluon plasma, relativistic heavy-ion collisions, quarkonium, color screening, coherent photoproduction

PACS: 12.38.Mh, 25.20.Lj

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0056](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0056)