

专题: 华南师范大学建校暨物理学科建立 90 周年

相对论重离子碰撞中光子-光子相互作用的碰撞参数依赖性*

杨帅^{1)†} 唐泽波^{2)‡} 杨驰^{3)††} 查王妹^{2)‡‡}

1) (华南师范大学量子物质研究院, 原子亚原子结构与量子调控教育部重点实验室, 广州 510006)

2) (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)

3) (山东大学前沿交叉科学青岛研究院, 粒子物理与粒子辐照教育部重点实验室, 青岛 266237)

(2023 年 6 月 6 日收到; 2023 年 8 月 11 日收到修改稿)

在相对论重离子碰撞中, 接近光速的重离子产生的超强电磁场, 由于洛伦兹收缩效应可等效为线性极化的准实光子, 进而诱发光子-光子相互作用产生正负轻子对. 相对论重离子对撞机 RHIC 和大型强子对撞机 LHC 上的国际合作实验在非超周边重离子碰撞中观测到相干光致产生过程, 发现正负轻子对的横动量分布相比于其在超周边碰撞发生显著的展宽, 为研究解禁闭物质——夸克胶子等离子体的电磁性质提供了新途径. 本文主要回顾相对论重离子碰撞中光子-光子相互作用对碰撞参数依赖的实验研究, 并讨论其在探测夸克胶子等离子体电磁性质方面的重要意义.

关键词: 相对论重离子碰撞, 夸克胶子等离子体, 光子-光子相互作用, 前向中子标定, 双轻子**PACS:** 12.38.Mh, 25.75.Cj**DOI:** 10.7498/aps.72.20230948

1 引言

量子色动力学的一个基本特征是夸克禁闭, 即构成物质的基本单元——夸克与胶子在通常情况下被束缚在色中性的强子中. 然而, 格点量子色动力学预言, 在极端高温高密的环境下, 夸克与胶子将摆脱束缚, 形成一种由“自由”夸克与胶子组成的新物质形态——夸克胶子等离子体 (quark gluon plasma, QGP). 相对论重离子碰撞的一个主要物理目标就是产生 QGP 并研究其性质. 此外, 接近光速运动的原子核激发出超强电磁场, 由于洛伦兹

收缩效应, 该电磁场被压缩到垂直于原子核运动方向的平面上, 电场和磁场相互垂直且大小相等, 与光子的电磁场十分相似. 费米^[1]在 1924 年首先提出用准实光子通量表征该电磁场. 随后, Williams^[2]和 Weizsäcker^[3]分别独立地拓展了费米的观点, 即等效光子近似模型 (equivalent photon approximation, EPA), 其强度正比于原子核所带电荷的平方. 因此, 当两个原子核之间的碰撞参数 (b) 大于两倍原子核半径 (R_A) 时 (原子核之间没有物理接触), 即超周边碰撞 (ultra-peripheral collision, UPC), 它们依然可以通过光致产生 (光子-光子相互作用、光子-原子核相互作用) 发生反应^[4–8], 如图 1 所示.

* 国家自然科学基金 (批准号: 11890713, 12005220, 12075139, 12175223, 12275091) 和广东省基础与应用基础研究基金自然科学基金 (批准号: 2020B0301030008, 2023A1515010416) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: syang@scnu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: zbtang@ustc.edu.cn

†† 通信作者. E-mail: chiyang@sdu.edu.cn

‡‡ 通信作者. E-mail: first@ustc.edu.cn

光子-光子相互作用可以产生正反粒子对或者双光子, 可用来研究量子真空结构以及寻找超出标准模型物理[9–17]. 光子-原子核相互作用产生的矢量介子和喷注等, 对核内胶子在动量空间和位置空间的分布敏感, 可用来研究原子核内胶子的结构[18–29].

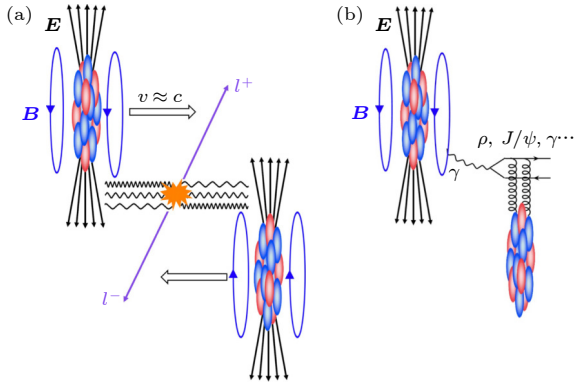


图 1 超周边重离子碰撞中光子-光子相互作用 (a) 和光子-原子核相互作用 (b) 示意图

Fig. 1. Schematic plot of photon-photon (a) and photon-nuclear (b) interactions in ultra-peripheral heavy-ion collisions.

相对论重离子激发光子的一个显著特征是其动量一般沿着束流运动方向, 其横动量 (p_T) 通常小于 $30 \text{ MeV}/c$ [5–7]. 因此, 相对论重离子碰撞中相干 (领头阶) 光子-光子相互作用产生的正负轻子对 ($\gamma\gamma \rightarrow l^+l^-$) 和相干光子-原子核相互作用产生的矢量介子集中在极低横动量区间 ($p_T < 150 \text{ MeV}/c$), 其末态的正负轻子对在与束流方向垂直的横平面上背靠背分布. 长期以来人们认为当碰撞参数小于两倍原子核半径时, 原子核破碎, 无法满足相干条件. 因此, 相干光致产生过程只能在超周边碰撞中进行研究. 然而, ALICE[30], ATLAS[31,32] 和 STAR[33,34] 国际合作组在非超周边重离子碰撞 (non-UPC, $b < 2R_A$) 中观测到极低横动量的 J/ψ 和正负轻子对产额的反常增强. 进一步研究表明, 非超周边重离子碰撞中极低横动量 J/ψ 和正负轻子对产额的反常增强来自相干光致产生, 这极大地挑战原有相干光致产生的物理图像. 与此同时, 非超周边重离子碰撞中可以产生解禁闭的热密物质 QGP, 因此, 相干光致产生过程可能为研究 QGP 性质提供了新途径.

近年来, 相对论重离子碰撞中相干光致产生过程在实验测量[30–36] 和理论计算[37–45] 方面都取得了重要进展, 本文主要介绍相对论重离子碰撞中光

子-光子相互作用对碰撞参数依赖的研究进展, 及其在探测 QGP 电磁性质方面的影响.

2 非超周边重离子碰撞中光子-光子相互作用的研究进展

相对论重离子对撞机 (RHIC) 上的 STAR 实验[33] 和大型强子对撞机上的 ATLAS 实验[31,32] 分别在 200 GeV 金核-金核、 193 GeV 铀核-铀核和 5.02 TeV 铅核-铅核非超周边碰撞中不同碰撞中心度下测量了正负轻子对的产生.

图 2 为 STAR 在 60%–80% 金核-金核和铀核-铀核碰撞中心度下测量的不同质量区间 (0.4 – 0.76 , 0.76 – 1.2 和 1.2 – $2.6 \text{ GeV}/c^2$) 的正负电子对的横动量 (p_T) 分布, 并将实验测量结果与预期源自强子衰变的正负电子对的贡献 (hadronic cocktail) 进行比较. 其中, 强子衰变的贡献来源于 π^0 , η , η' , ω , ϕ , J/ψ , ψ' , $c\bar{c}$, $b\bar{b}$ 和 Drell-Yan 的衰变. 当正负电子对的 $p_T < 0.15 \text{ GeV}/c$ 时, 正负电子对的产额相对于已知强子衰变的贡献出现显著增强, 而强子衰变贡献在 $p_T > 0.15 \text{ GeV}/c$ 时可以很好地描述实验数据.

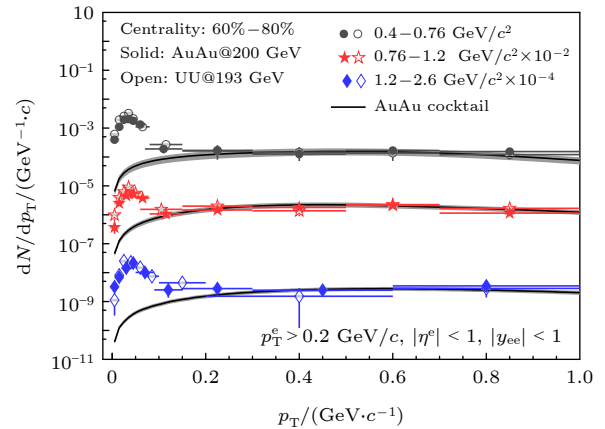


图 2 60%–80% 金核-金核和铀核-铀核碰撞中心度事例中不同质量区间正负电子对的横动量分布[33]

Fig. 2. The e^+e^- pair p_T distributions for different mass regions in 60%–80% Au + Au and U + U collisions compared to cocktails[33].

为探索正负电子对在 $p_T < 0.15 \text{ GeV}/c$ 反常增强的物理原因, STAR 扣除了源自强子衰变的正负电子对贡献, 在 60%–80% 和 40%–60% 金核-金核和铀核-铀核碰撞中心度下测量了正负电子对的不变质量增强谱, 如图 3(a) 和图 3(b) 所示. 图 3(c)

给出了正负电子对在上述 3 个质量区间的增强产额随碰撞中心度的变化. 可以明显看到增强产额没有明显的碰撞中心度依赖, 而源自强子衰变的贡献则有强烈的碰撞中心度依赖. 这个现象说明正负电子对在极低横动量区间的反常增强不太可能来自于强子相互作用的贡献. STAR 合作组进一步将正负电子对的质量增强谱与包含热密物质中 ρ 介子展宽与 QGP 热辐射贡献的理论计算^[46], 和相干光子-光子、光子-原子核相互作用的理论计算^[47,48] 进行比较, 如图 3(a) 和图 3(b) 所示. 可以看出, 极低横动量正负电子对的反常增强亦不能被热密物质中 ρ 介子展宽与 QGP 热辐射和光子-原子核相互作用的贡献所解释, 但是能被光子-光子相互作用的贡献所描述.

ATLAS 合作组亦在 5.02 TeV 非超周边铅核-铅核碰撞中观测到了 $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ 过程^[31,32]. ATLAS 在测量中要求每个缪子的横动量大于 4 GeV/c, 而相干光致产生的缪子对的横动量通常小于 150 MeV/c. 受限于动量分辨的影响, ATLAS 利用正负缪子对的非共面参数 α (acoplanarity) 而不是横动量去研究相干光子-光子相互作用. 非

共面参数 α 的定义为

$$\alpha = 1 - \frac{|\phi^+ - \phi^-|}{\pi},$$

其中, ϕ^\pm 为正负缪子在横平面上的方位角. 相干光致过程产生正负缪子对的 α 越小 (在横平面上的背靠背关联越强), 其横动量越小; α 越大 (在横平面上的背靠背关联越弱), 其横动量越大.

图 4 为 ATLAS 在 5.02 TeV 铅核-铅核碰撞中不同碰撞中心度下相干光致产生的正负缪子对的 α 分布, 每个中心度下的 α 分布在其测量范围内进行了归一化处理. 可以明显地看到正负缪子对的 α 分布具有极强的碰撞中心度依赖 (>80% 为超周边和极度偏心碰撞, 0—10% 为极度对心碰撞). 随着重离子间的碰撞参数减小 (越对心), α 分布变得越来越宽. STAR 也观测到了类似现象, 相比于超周边碰撞, 非超周边重离子碰撞中相干光致产生正负电子对的 $\sqrt{\langle p_T^2 \rangle}$ 亦发生了展宽. 由于非超周边重离子碰撞中会产生 QGP, STAR 和 ATLAS 认为相干光致产生正负轻子对横动量 (或者 α) 的展宽可能来自于轻子与 QGP 发生的电磁相互作用. 其中, STAR 认为相干光致产生正负电子对

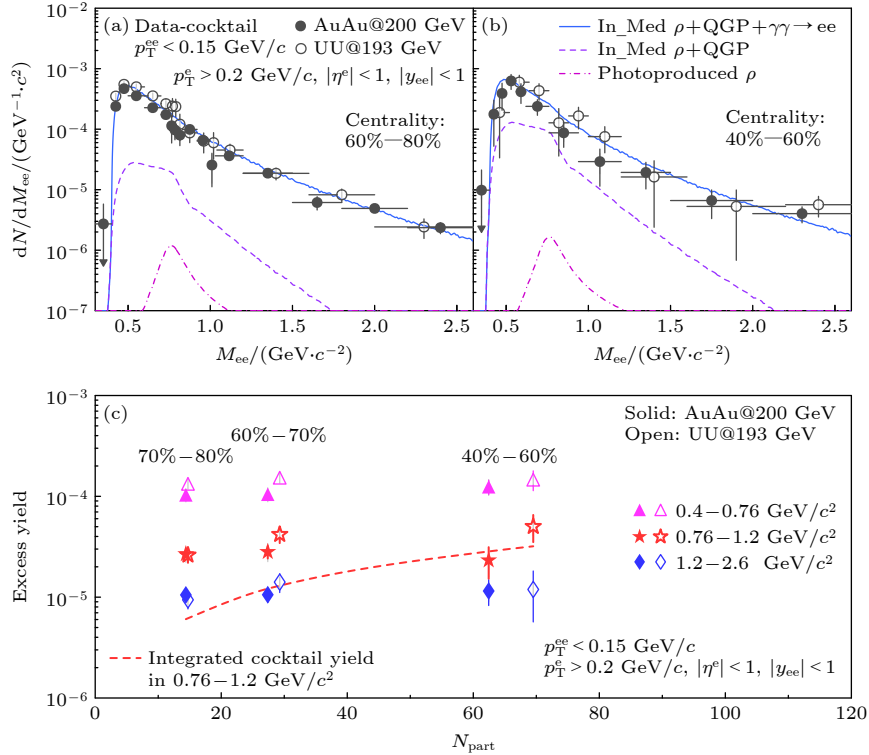


图 3 60%—80% (a) 和 40%—60% (b) 金核-金核和铀核-铀核碰撞中心度事例中低横动量 ($p_T < 0.15$ GeV/c) 正负电子对的不变量质量增强谱; (c) 金核-金核和铀核-铀核碰撞中不同质量区间增强产额对碰撞中心度的依赖^[33]

Fig. 3. The low- p_T ($p_T < 0.15$ GeV/c) e^+e^- excess mass spectra in 60%—80% (a) and 40%—60% (b) Au + Au and U + U collisions; (c) centrality dependence of integrated excess yields in three different mass regions in Au + Au and U + U collisions^[33].

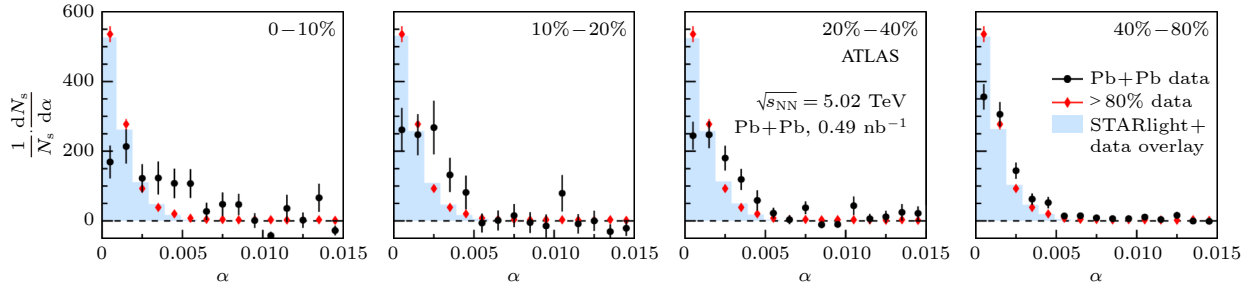


图 4 铅核-铅核碰撞中不同中心度下光子-光子相互作用产生正负缪子对的 α 分布, 每个分布在其测量范围内进行归一处理^[31]
Fig. 4. The centrality dependence of α distributions from $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ in Pb + Pb collisions. The α distributions are normalized to unity over their measured ranges^[31].

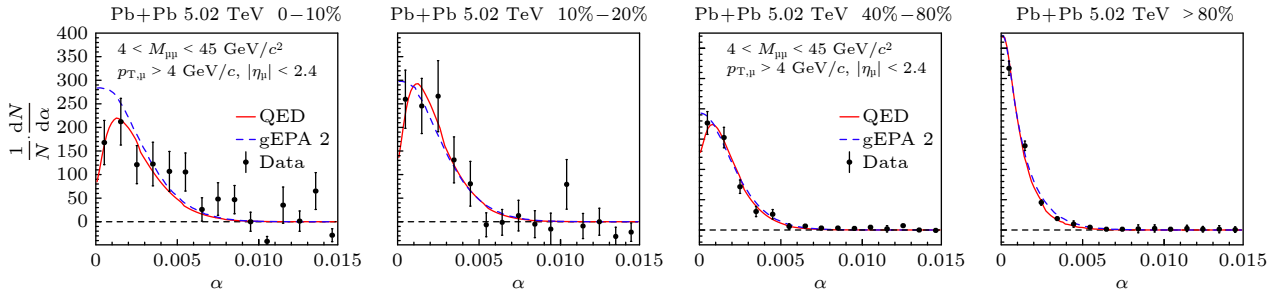


图 5 gEPA 和 QED 方法计算的 5.02 TeV 铅核-铅核碰撞中不同中心度下源自光子-光子相互作用的正负缪子对的 α 分布^[37]
Fig. 5. The α distributions calculated by gEPA and QED approaches for $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ in Pb + Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV for different centrality classes^[37].

的横动量展宽可能是因为电子在 QGP 残余磁场 (magnetic field trapped in QGP) 中运动发生偏转所导致^[33]. ATLAS 认为光致产生正负缪子对的非共面参数 α 的展宽可能是因为缪子在穿过 QGP 时与里面的部分子发生库仑散射所导致^[31]. 因此, 非超周边碰撞中相干光致产生正负轻子对可能为探测 QGP 的电磁性质提供一种新途径.

需要特别指出的是, STAR 和 ATLAS 在测量相干光致产生正负轻子对的横动量或者 α 展宽时, 都假定相干光致产生正负轻子对的横动量没有碰撞参数的依赖性. 与此同时, 人们采用的传统等效光子近似的方法^[2,3], 在计算光子运动学分布的时候对整个空间 (横向距离) 进行积分, 亦会丢失光子横动量与碰撞参数关系的信息. 近年来, 人们进行了一系列的新探索, 如利用广义等效光子近似方法 (generalized equivalent photon approximation, gEPA)^[37]、基于量子色动力学因子化方案^[39–42]或原子核波包假设下的 QED^[43,44] 计算 $\gamma\gamma \rightarrow l^+l^-$ 截面等, 以研究光子横动量对碰撞参数的依赖. 文献^[37]使用 QED 和 gEPA 方法计算了 5.02 TeV 铅核-铅核碰撞中 $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ 在不同碰撞中心度下正负缪子对的 α 分布, 计算结果与 ATLAS 实验数

据的对比展示在图 5 中. 可以清楚地看到, QED 和 gEPA 方法的计算结果可以系统地描述实验测量结果. QED 和 gEPA 的计算结果表明, STAR 和 ATLAS 观测到的相干光致过程产生正负轻子对的横动量或非共面参数 α 在非超周边碰撞中的展宽主要来自于 $\gamma\gamma \rightarrow l^+l^-$ 对碰撞参数的依赖, 而不是轻子与末态 QGP 的电磁相互作用.

上述实验测量和理论计算对非超周边碰撞中相干光致产生正负轻子对横动量或者 α 分布展宽的不同解释在领域内引起了讨论. 为了研究初态和末态 QGP 效应在非超周边重离子碰撞中相干光致产生正负轻子对横动量或者非共面参数 α 展宽的贡献, 人们需要利用控制变量法在实验测量中分离初态和末态效应. 例如, 在超周边碰撞中研究相干光致产生正负轻子对的碰撞参数依赖性. 因此, 用实验手段控制超周边碰撞的碰撞参数范围必不可少.

3 超周边重离子碰撞中光子-光子相互作用的研究进展

铅核 ($Z_{\text{Pb}} = 82$) 和金核 ($Z_{\text{Au}} = 79$) 带电荷比较多, $Z\alpha_{\text{em}} \approx 0.6$, 其产生的光子通量足够大. 因

此, 在一次超周边碰撞中, 除了发生相干光致 $\gamma\gamma \rightarrow l^+l^-$ 过程, 参与碰撞的原子核还可能会吸收低能光子 (金核和铅核吸收光子能量约为 14 MeV), 进而被激发到巨偶极共振或者更高激发态^[49]. 处于激发态的原子核随后会发射一个或者多个中子. 中子几乎保持束流的能量和运动方向. 原子核激发的概率与碰撞参数的平方成反比 ($P_{\text{excite}} \propto 1/b^2$), 即碰撞参数越小, 发射中子的概率越大, 数目越多. 因此利用前向中子多重数可以控制超周边重离子碰撞的碰撞参数范围. 图 6 是 STARlight^[50] 计算的 5.02 TeV 铅核-铅核碰撞中 3 种前向中子多重数 0n0n, 0nYn, YnYn ($Y \geq 1$) 对应的碰撞参数范围^[8,50], 可以明显得出 $\langle b_{YnYn} \rangle < \langle b_{0nYn} \rangle < \langle b_{0n0n} \rangle$. 其中, 0n0n 代表超周边碰撞中的两个原子核都不发射中子; 0nYn 代表有一个原子核至少发射一个中子; YnYn 代表两个原子核都至少发射一个中子.

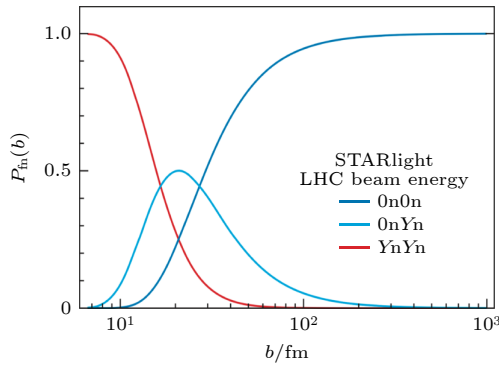


图 6 0n0n, 0nYn, YnYn, (其中 $Y \geq 1$) 对应的碰撞参数范围^[8]

Fig. 6. The impact parameter dependence of the 0n0n, Yn0n, YnYn ($Y \geq 1$) neutron emission scenarios from the STARlight model^[8].

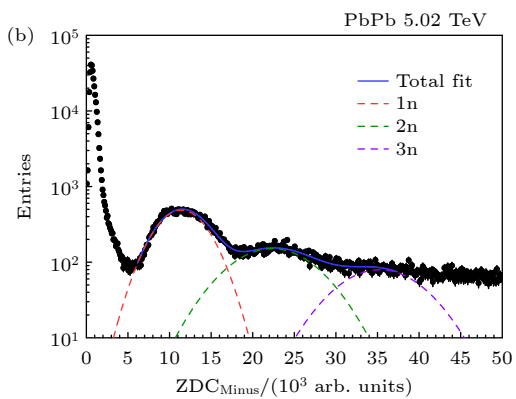
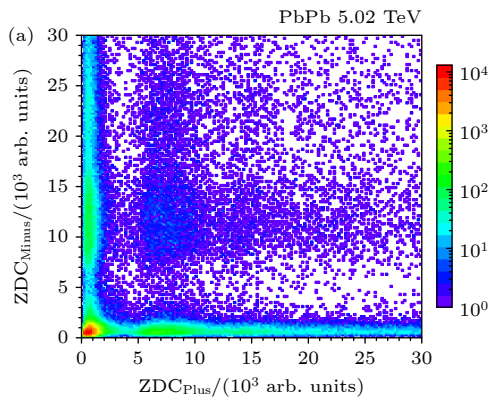


图 7 位于 CMS 两边零度角量能器的能量谱关联 (a) 和位于负快度方向零度角量能器的能量谱分布 (b)^[35]

Fig. 7. The left panel shows the correlation between energy distributions of the Minus and Plus ZDC detectors, while the right panel shows a multi-Gaussian function fit to the Minus ZDC energy distribution^[35].

CMS 合作组在 5.02 TeV 铅核-铅核超周边碰撞中测量了 $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ 正负缪子对的 α 分布对前向中子多重数的依赖. 前向中子由 CMS 的零度角量能器 (ZDC) 测量, CMS ZDC 对单个中子的能量分辨可达到 22%—26%, 同时探测效率接近 100%. 根据 ZDC 测量的能量分布, 如图 7 所示, CMS 将每边的中子数分成 3 类, 即 0n, 1n, Xn ($X \geq 2$). 随后 CMS 将超周边碰撞事例分配到 0n0n, 0n1n, 0nXn, 1n1n, 1nXn 和 XnXn 6 个前向中子多重数类别里面.

图 8 给出了 5.02 TeV 铅核-铅核超周边碰撞中 $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ 正负缪子对的 α 分布对前向中子多重数的依赖, 其中, 每个 α 分布在其测量范围内进行归一处理. 每个 α 分布都是由一个靠近零的核心 (core) 和一个长长的尾巴 (tail) 组成, 核心部分来自于领头阶光子-光子相互作用的贡献, 而尾巴部分来自于高阶光子-光子相互作用的贡献, 包括末态轻子光子辐射、非相干光子-光子相互作用 (至少一个光子来自于原子核内部的质子)、多光子相互作用等^[9]. 为了研究初态光子横动量对碰撞参数的依赖, CMS 利用经验公式 (1) 把领头阶和高阶光子-光子相互作用对 α 分布的贡献区分开来, 如图 8 所示. 随后, 利用对应的经验公式计算领头阶光致产生正负缪子对的 α 分布的平均值 ($\langle \alpha^{\text{core}} \rangle$).

$$\text{core} : c_1 e^{-\alpha/c_2 + c_3 \alpha^{0.25}},$$

$$\text{tail} : t_1 [1 + (t_2/t_3)\alpha]^{-t_3}. \quad (1)$$

图 9 给出了 5.02 TeV 铅核-铅核超周边碰撞中相干光致产生正负缪子对的 $\langle \alpha^{\text{core}} \rangle$ 对前向中子多重数的依赖, 人们可以清楚地看到 $\langle \alpha^{\text{core}} \rangle$ 随着前

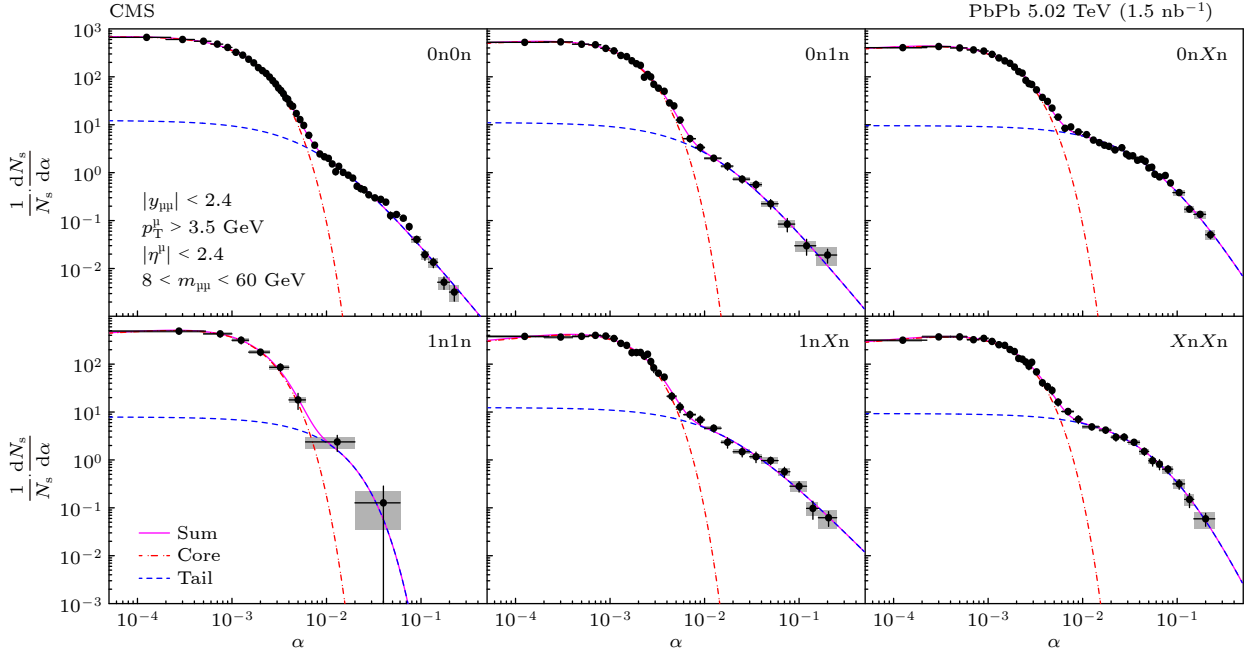

 图 8 5.02 TeV 铅核-铅核超周边碰撞中不同前向中子多重数下正负缪子对的 α 分布 [35]

Fig. 8. Neutron multiplicity dependence of α distributions from $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ in ultraperipheral Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. The α distributions are normalized to unity integral over their measured ranges [35].

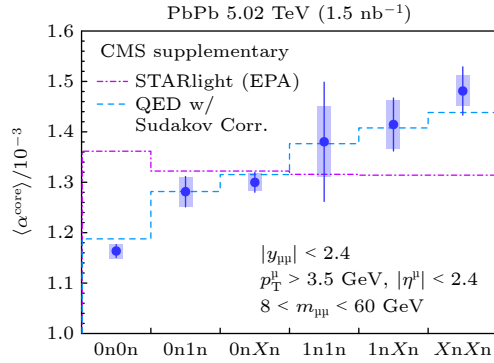

 图 9 5.02 TeV 铅核-铅核超周边碰撞中正负缪子对的 $\langle \alpha^{core} \rangle$ 对前向中子多重数的依赖 [35]

Fig. 9. Neutron multiplicity dependence of $\langle \alpha^{core} \rangle$ of $\mu^+\mu^-$ in ultra-peripheral Pb + Pb collisions [35].

向中子多重数的增加而变大. 此结果证明了光子的横动量随着碰撞参数的减小而变大, 因此, 相干光致产生的正负轻子对的横动量或者非共面参数 α 分布会随着碰撞参数的减小而发生展宽. 上述 CMS 的测量结果表明, 在非超周边重离子碰撞中利用相干光致产生的正负轻子对探测 QGP 电磁性质时, 需要考虑相干光致产生过程对碰撞参数的依赖. CMS 还将其 $\langle \alpha^{core} \rangle$ 的测量结果与 STARlight [50] 和领头阶 QED [51] 理论计算进行对比. 领头阶 QED 计算考虑了等效光子横动量对碰撞参数的依赖, 并修正了末态缪子辐射出低能光子带来的影响, 可

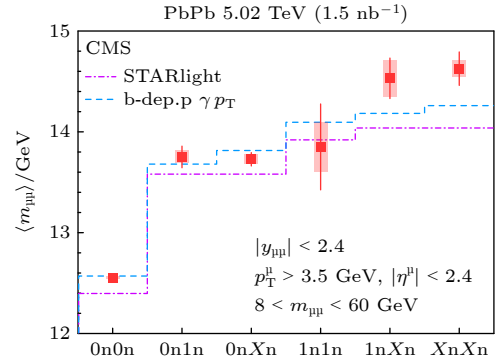

 图 10 5.02 TeV 铅核-铅核超周边碰撞中正负缪子对的 $\langle m_{\mu\mu} \rangle$ 对前向中子多重数的依赖 [35]

Fig. 10. Neutron multiplicity dependence of $\langle m_{\mu\mu} \rangle$ of $\mu^+\mu^-$ in ultra-peripheral Pb + Pb collisions [35].

以很好地描述 $\langle \alpha^{core} \rangle$ 对前向中子多重数的依赖. STARlight 采用传统的等效近似方法对相干光致产生过程进行计算, 不能描述 CMS 的实验测量结果, 因为传统的等效光子近似的方法缺失光子动量与碰撞参数之间的关联.

图 10 给出了 5.02 TeV 铅核-铅核超周边碰撞中光致产生正负缪子对的 $\langle m_{\mu\mu} \rangle$ 对前向中子多重数的依赖. 可以明显看到 $\langle \alpha^{core} \rangle$ 随着前向中子多重数的增加而变大, 且上升的趋势可以被 STARlight [50] 和领头阶 QED [51] 理论计算描述. 正负缪子对的不变质量主要受等效光子的能量影响,

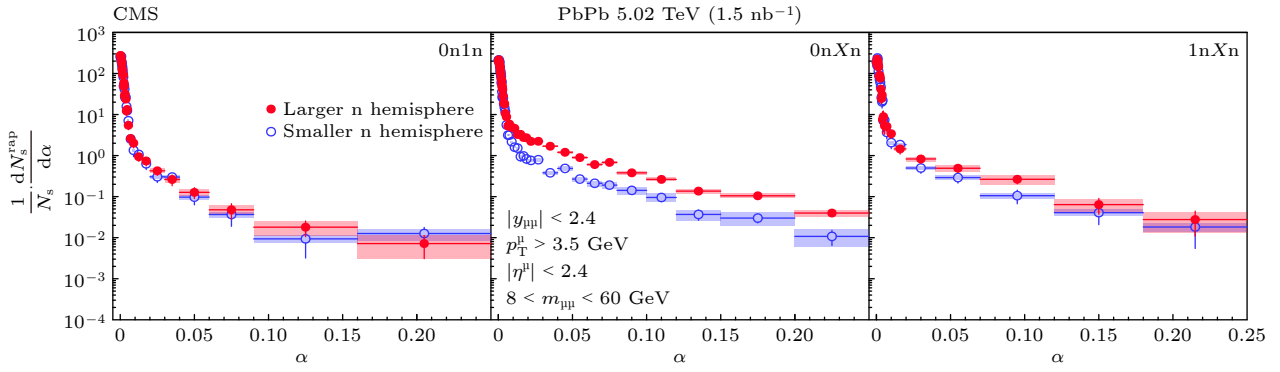


图 11 3 个具有不对称中子数的前向中子多重事例中光致产生的正负缪子对的 α 分布^[35]

Fig. 11. Acoplanarity distributions of $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ events for three different neutron multiplicity classes with asymmetric neutron numbers^[35].

因此, 该测量结果证明等效光子的能量随着碰撞参数的减小而增大.

此外, ATLAS 和 CMS 还在具有不对称中子数的前向中子多重数 (如 0nXn) 事例中研究了 $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ 正负缪子对的 α 分布对快度的依赖^[35,36]. 图 11 给出了 5.02 TeV 铅核-铅核超周边碰撞中光致产生正负缪子对在 0n1n, 0nXn, 1nXn 3 个前向中子多重数事例中对快度的依赖. ATLAS 和 CMS 在 0nXn 前向中子多重数事例中, 都观测到高阶光子-光子相互作用的贡献在靠近 Xn 比靠近 0n 的快度区间贡献大. 该实验结果说明除了末态轻子光子辐射 (不依赖中子发射) 这个高阶效应, 还应有与前向中子多重数关联的高阶光致产生过程的贡献, 例如非相干光致产生, 即至少有一个光子由原子核内的质子发射.

4 总结和展望

在非超周边重离子碰撞中观测到光子-光子相互作用, 为研究解禁闭物质 QGP 的电磁性质提供了一种新的途径. 通过超周边碰撞中相干光致过程对前向中子多重数依赖的实验测量以及相关理论计算的发展表明, 非超周边重离子碰撞中相干光致产生的正负轻子对横动量或者 α 分布的展宽主要来自于初态光子横动量对碰撞参数的依赖, 对 QGP 电磁性质的探测需要考虑此效应. 结合 RHIC 和 LHC 上实验在未来几年数据采集计划和理论计算的 QED 基准线, 通过精确测量相干光致产生正负轻子对的横动量或者 α 分布对碰撞中心度和事例平面依赖, 有望揭示末态轻子是否受到 QGP 电磁相互作用的影响. 图 12 给出了 STAR 基于 2023

至 2025 年采集的最小无偏金核-金核碰撞数据测量相干光致过程所能达到的实验精度^[38]. 综上, 关于相对论重离子碰撞中相干光致过程对碰撞参数依赖的研究有望推进强场 QED 的研究, 为超强电磁场 QCD 涌现现象的研究提供新的实验和理论支撑.

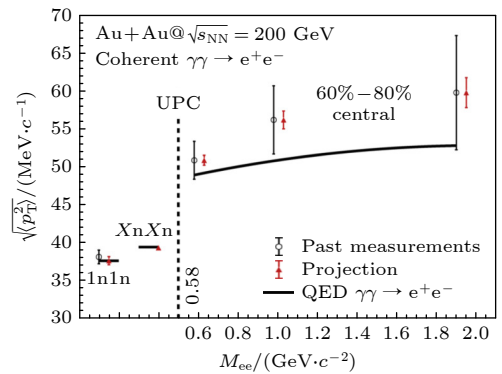


图 12 预计 STAR 于 2023 至 2025 年在 200 GeV 金核-金核偏心和超周边碰撞中测量 $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ 物理过程可达到的精度^[38]

Fig. 12. Projection for measurements of the $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ process in peripheral and ultra-peripheral Au + Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV^[38].

参考文献

- [1] Fermi E 1924 *Z. Phys.* **29** 315
- [2] Williams E J 1934 *Phys. Rev.* **45** 729
- [3] Weizsacker C F von 1934 *Z. Phys.* **88** 612
- [4] Bertulani C A, Baur G 1988 *Phys. Rep.* **163** 299
- [5] Baur G, Hencken K, Trautmann D, Sadovsky S, Kharlov Y 2002 *Phys. Rep.* **364** 359
- [6] Bertulani C A, Klein S R, Nystrand J 2005 *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **55** 271
- [7] Baltz A J, Baur G, d'Enterria D, Frankfurt L, Gelis F, Guzey V, Hencken K, Kharlov Y, Klasen M, Klein S R, Nikulin V, Nystrand J, Pshenichnov I A, Sadovsky S, Scapparone E,

- [8] Klein S R, Steinberg P 2020 *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **70** 323
- [9] Baur G, Hencken K, Trautmann D 2007 *Phys. Rep.* **453** 1
- [10] STAR Collaboration 2004 *Phys. Rev. C* **70** 031902
- [11] STAR Collaboration 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 052302
- [12] PHENIX Collaboration 2009 *Phys. Lett. B* **679** 321
- [13] ALICE Collaboration 2013 *Eur. Phys. J. C* **73** 2617
- [14] CMS Collaboration 2019 *Phys. Lett. B* **797** 134826
- [15] ATLAS Collaboration 2017 *Nat. Phys.* **13** 852
- [16] ATLAS Collaboration 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 052001
- [17] Bruce R, d'Enterria D, d'Roock A, Drewes M, Farrar G R, Giammanco A, Gould O, Hajer J, Harland-Lang L, Heisig J, Jowett J M, Kabana S, Krintiras G K, Korsmeier M, Lucente M, Milhano G, Mukherjee S, Niedziela J, Okorokov V A, Rajantie A, Schaumann M 2020 *J. Phys. G* **47** 060501
- [18] STAR Collaboration 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 272302
- [19] CMS Collaboration 2019 *Eur. Phys. J. C* **79** 277
- [20] CMS Collaboration 2023 arXiv: 2303.16984 [nucl-ex]
- [21] CMS Collaboration 2023 *Phys. Rev. Lett.* **131** 051901
- [22] STAR Collaboration 2017 *Phys. Rev. C* **96** 054904
- [23] STAR Collaboration 2023 *Sci. Adv.* **9** eabq3903
- [24] ALICE Collaboration 2013 *Phys. Lett. B* **718** 1273
- [25] ALICE Collaboration 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 232504
- [26] ALICE Collaboration 2019 *Phys. Lett. B* **798** 134926
- [27] ALICE Collaboration 2021 *Phys. Lett. B* **817** 136280
- [28] ALICE Collaboration 2023 arXiv: 2305.06169 [nucl-ex]
- [29] CMS Collaboration 2017 *Phys. Lett. B* **772** 489
- [30] ALICE Collaboration 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 222301
- [31] ATLAS Collaboration 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 212301
- [32] ATLAS Collaboration 2023 *Phys. Rev. C* **107** 054907
- [33] STAR Collaboration 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 132301
- [34] STAR Collaboration 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 132302
- [35] CMS Collaboration 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 122001
- [36] ATLAS Collaboration 2021 *Phys. Rev. C* **104** 024906
- [37] Zha W, Brandenburg J D, Tang Z, Xu Z 2020 *Phys. Lett. B* **800** 135089
- [38] Brandenburg J D, Zha W, Xu Z 2021 *Eur. Phys. J. A* **57** 299
- [39] Li C, Zhou J, Zhou Y 2019 *Phys. Lett. B* **795** 576
- [40] Li C, Zhou J, Zhou Y 2020 *Phys. Rev. D* **101** 034015
- [41] Klein S, Mueller A H, Xiao B, Yuan F 2020 *Phys. Rev. D* **102** 094013
- [42] Xiao B, Yuan F, Zhou J 2020 *Phys. Rev. Lett.* **125** 232301
- [43] Wang R, Pu S, Wang Q 2021 *Phys. Rev. D* **104** 056011
- [44] Wang R, Lin S, Pu S, Zhang Y, Wang Q 2022 *Phys. Rev. D* **106** 034025
- [45] PU S, Xiao B, Zhou J, Zhou Y 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 072503 (in Chinese) [浦实, 肖博文, 周剑, 周雅瑾 2023 物理学报 **72** 072503]
- [46] Rapp R 2013 *Adv. High Energy Phys.* **2013** 148253
- [47] Zha W, Ruan L, Tang Z, Xu Z, Yang S 2018 *Phys. Lett. B* **781** 182
- [48] Klein S R 2018 *Phys. Rev. C* **97** 054903
- [49] Berman B L, Fultz S C 1975 *Rev. Mod. Phys.* **47** 713
- [50] Klein S R, Nystrand J, Seger J, Gorbunov Y, Butterworth J 2017 *Comput. Phys. Commun.* **212** 258
- [51] Brandenburg J D, Li W, Ruan L, Tang Z, Xu Z, Yang S, Zha W 2020 arXiv: 2006.07365 [hep-ph]

SPECIAL TOPIC — The 90th Anniversary of South China Normal University and Physics Discipline

Impact parameter dependence of photon-photon interactions in relativistic heavy-ion collisions^{*}

Yang Shuai^{1)†} Tang Ze-Bo^{2)‡} Yang Chi^{3)††} Zha Wang-Mei^{2)‡‡}

1) (*Key Laboratory of Atomic and Subatomic Structure and Quantum Control (Ministry of Education),
Institute of Quantum Matter, South China Normal University, Guangzhou 510006, China*)

2) (*State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

3) (*Key Laboratory of Particle Physics and Particle Irradiation, Ministry of Education, Institute of Frontier and
Interdisciplinary Science, Shandong University, Qingdao 266237, China*)

(Received 6 June 2023; revised manuscript received 11 August 2023)

Abstract

The Lorentz-boosted electromagnetic fields surrounding relativistic heavy ions with large charges can be treated as a flux of linearly polarized quasireal photons, which can interact via the photon-photon scattering to produce lepton antilepton pairs. Those photon-photon interactions can happen even in heavy-ion collisions with hadronic overlap, making an opportunity to probe the electromagnetic properties of the produced deconfined quark-gluon plasma. In this paper, we review the recent experimental progress of the impact parameter dependent photon-photon interactions in heavy-ion collisions, and discuss their essential role in probing the possible electromagnetic properties of quark-gluon plasma produced in hadronic heavy-ion collisions.

Keywords: relativistic heavy-ion collisions, quark gluon plasma, photon-photon interactions, forward neutron tagging, dilepton

PACS: 12.38.Mh, 25.75.Cj

DOI: [10.7498/aps.72.20230948](https://doi.org/10.7498/aps.72.20230948)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11890713, 12005220, 12075139, 12175223, 12275091) and the Major Project of Basic and Applied Basic Research of Guangdong Province, China (Grant Nos. 2020B0301030008, 2023A1515010416).

[†] Corresponding author. E-mail: syang@snnu.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: zbtang@ustc.edu.cn

^{††} Corresponding author. E-mail: chiyang@sdu.edu.cn

^{‡‡} Corresponding author. E-mail: first@ustc.edu.cn

相对论重离子碰撞中光子-光子相互作用的碰撞参数依赖性

杨帅 唐泽波 杨驰 查王妹

Impact parameter dependence of photon-photon interactions in relativistic heavy-ion collisions

Yang Shuai Tang Ze-Bo Yang Chi Zha Wang-Mei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 201201 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230948

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230948>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

相对论强激光与近临界密度等离子体相互作用的质子成像

Proton imaging of relativistic laser-produced near-critical-density plasma

物理学报. 2019, 68(15): 155201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190610>

光子与相对论麦克斯韦分布电子散射的能谱角度谱研究

Photon spectrum and angle distribution for photon scattering with relativistic Maxwellian electrons

物理学报. 2019, 68(1): 015201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181796>

相对论多组态相互作用方法计算Mg⁺离子同位素位移

Calculation of isotope shift of Mg⁺ ion by using the relativistic multi-configuration interaction method

物理学报. 2018, 67(1): 013101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171817>

光子与相对论麦克斯韦分布电子散射截面的蒙特卡罗计算方法

Monte Carlo method for computing relativistic photon-Maxwellian electron scattering cross sections

物理学报. 2018, 67(21): 215201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180932>

微纳光子结构中光子和激子相互作用

Interactions between photons and excitons in micro-nano photonic structures

物理学报. 2019, 68(14): 144201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190269>

相对论皮秒激光在低密度等离子体中直接加速的电子束的横向分布特征研究

Transverse distribution of electron beam produced by relativistic picosecond laser in underdense plasma

物理学报. 2019, 68(19): 195203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191106>