

文章编号: 1007-4627(2017) 03-0296-06

反质子间相互作用的研究

张正桥^{1,2}, 马余刚^{1,†}

(1. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 随着对反物质研究的深入, 人们需要迫切知道反质子之间的相互作用力是怎样的, 是否与质子之间的作用是对称的。对这个作用力的测量, 有助于我们理解反物质原子核的形成机制以及对物质-反物质对称性的理解。为此, STAR 合作组利用相对论重离子加速器中金核-金核碰撞中产生的丰富的反质子, 通过反质子-反质子动量关联函数的测量, 并扣除了通过其他粒子衰变过来的次级反质子与其他反粒子关联的污染, 精确地构建了反质子-反质子关联函数。然后, 结合量子多粒子关联理论, 定量提取出反质子-反质子的有效力程和散射长度这两个基本作用参数。研究表明, 在实验精度内, 反质子间的相互作用与正质子保持一致。反质子-反质子之间的强相互作用存在着吸引, 它们可以克服由于同号(负电荷)的反质子-反质子之间的库仑排斥而结合成反物质原子核。这项研究首次实现了对反物质间相互作用力的测量, 为进一步研究反原子核的形成和属性奠定了基础。同时为 CPT 对称性的检验提供了一种新的方式, 对人类深刻认识物质世界的构成及其运动规律具有重要意义。

关键词: 反质子; 关联函数; 有效力程; 散射长度; CPT 对称性

中图分类号: O571.53 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.03.296

1 引言

物理学界普遍认为, 在宇宙大爆炸初期, 物质与反物质几乎是对称产生的, 例如出现一个夸克(构成物质的一种基本粒子), 就会有一个反夸克诞生。但令人不解的是, 在我们已观测到的宇宙中, 几乎全部是物质, 反物质极其稀少。是什么原因造成了在宇宙演化过程中, 正反两大类物质在数量上出现“对称性破缺”, 至今仍是宇宙最大谜题之一。反物质研究在过去十余年取得了巨大的成功, 这其中包括欧洲核子中心(CERN)在实验室捕捉到反氢原子^[1-3], BNL-STAR 合作组首次观测到的反超氦核和反氦4^[4-9]、以及 AMS-II 新数据观测到正电子通量“反常”增加^[10, 11]、以及位于 CERN 的 LHC-ALICE 实验关于反物质轻核质量的精确测量^[12]等。然而这些研究还没有涉足对反物质相互作用的认识, 迄今还没有理解反物质是如何把反核子“粘合”在一起的、反粒子之间是如何相互作用的, 它们与正粒子作用究竟有否差别? 物理定律通常对粒子和反粒子一视同仁。更准确地讲, 如果粒子用反粒子替换, 右手征用左手征替换, 以及所有粒子的速度都反向, 则

物理定律不变。这被称作“电荷共轭-空间反射-时间反演(CPT)”定理, 并且它是任何合理的理论中都应该成立的基本假设的一个推论。至今, 物理理论和迄今所有的实验都表明, 在 CPT 联合变换下物理规律总是不变的, 即 CPT 是守恒的。然而, 目前其他科学实验还没有从反物质之间相互作用的层次对 CPT 守恒进行检验, 而我们的实验提供了反质子间相互作用的测量, 从反物质相互作用的角度提供 CPT 守恒的检验^[13]。相互作用是决定物质的结构和变化过程的基本因素, 因此在物质科学研究中具有基础性的地位。近代物理学已确认了各种物质之间的基本的相互作用可归结为 4 种: 引力相互作用、电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用。核子(包括质子和中子)间的核力是一种强相互作用, 它抵抗了质子之间的强大的电磁力, 维系了原子核的稳定。而迄今为止, 反核子之间的相互作用还没有得到测量过, 因此这是物理学的一项重大课题。另外, 对强相互作用本质的了解长期以来也是物理学中的难题。有效力程 d_0 和散射长度 f_0 是描述强相互作用的两个基本参数。散射长度 f_0 与散射截面 σ 相关, 在低能核子散射中, 两者满足如下关系: $\sigma = 4\pi f_0^2$ 。有效力程 d_0 是描

收稿日期: 2016-12-25; 修改日期: 2017-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11035009, 11220101005, 11421505); 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划)(2014CB845400)

作者简介: 张正桥(1988-), 研究生, 江苏泰州人, 从事原子核与粒子物理研究, E-mail: zhangzhengqiao@sinap.ac.cn。

† 通信作者: 马余刚, E-mail: mayugang@sinap.ac.cn。

述核子之间作用力程的量, 它和散射长度 f_0 包含在散射相移中, $k \cot \delta_0 \approx 1/f_0 + \frac{1}{2} d_0 k^2$, 其中 δ_0 为 S 波的相移, k 为核子碰撞动量^[14]。通过测量反质子相互作用的有效力程和散射长度, 我们可以得到反质子间相互作用的信息。为了更进一步理解有效力程和散射长度, 我们以方势阱为例进行说明。图 1 展示了不同情形下, 阱势和波函数的关系。其中 V_0 表示阱势, r_0 代表波函数的半径部分, 在这 $r_0 = d_0$ 。对于示例 (a), $V_0 > 0$ 代表排斥势, 其他三个示例对应于吸引势。对于方势阱, 有效力程对应于势阱的宽度, a (或者 $-f_0$) 是在波函数半径一点的切线在 r 轴上的截距。如果两粒子要形成束缚态, 需要吸引势以及波函数的最大值位置在势阱的宽度内这两个条件。对于示例 (c), $a < 0$ 即 $f_0 > 0$, 虽然满足吸引势, 但是没法形成束缚态。示例 (d) 对应于一种我们称之为“零点能量共振”的特殊情形。总而言之, 两粒子要形成束缚态, 需满足吸引势以及 $a > 0$ (即 $f_0 < 0$) 的条件。

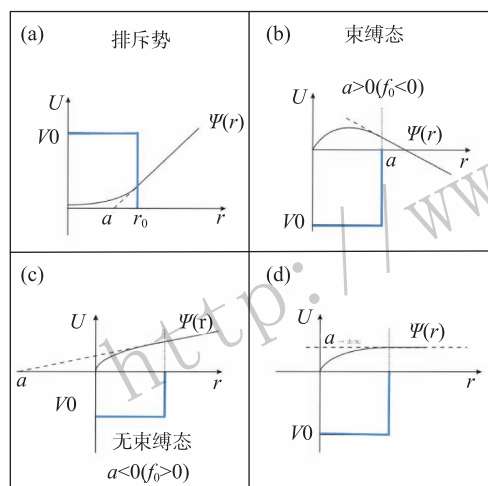


图 1 (在线彩图) 不同情形下, 阱势和波函数的关系

2 实验装置

在通常环境下, 反物质的产额极为稀少, 在此之前一直未有实验涉及反物质间相互作用力的定量测量。位于纽约长岛的相对论重离子对撞机 (Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC) 可以将金核加速到每核子 100 GeV 的高能量, 利用两束接近于光速的金核对撞来模拟宇宙大爆炸, 产生类似于宇宙大爆炸之后几个微秒时刻的物质形态。这种物质是由基本粒子, 即夸克、胶子组成的等离子体新物质形态, 又称为 QGP (quark-gluon plasma)^[15-17], 它具有大约是太阳中心 25 万倍的极端高温。然后, 夸克-胶子等离子体迅速冷却产生大约等量的质子与反质子, 这为研究反

质子间的相互作用提供了极佳的机会。这种相互作用力使得核子或者反核子能够相结合成原子核或者反物质原子核。研究最简单的反质子之间的相互作用力可为以后研究更为复杂的反物质原子核间的相互作用提供决定性的基础。此次研究课题的确立就是要研究反核子间相互作用, 从实验上首次尝试对反核子间相互作用进行测量。

STAR (Solenoidal Tracker at RHIC) 探测器^[18]位于 RHIC 环形对撞机的 6 点钟位置, 它是由不同探测器系统构成的一个大型复合探测器, 具有中心快度区全方位角的接收度、具有优异的多径迹事件重建能力, 能够很好地鉴别各种正粒子与反粒子。STAR 探测器主要部件包括时间投影室 (TPC)、飞行时间谱仪 (TOF)、电磁量能器 (EMC)、重味径迹探测器 (HFT) 等, 如图 2 所示。STAR 的主探测器-时间投影室能够完美地捕捉到带电粒子的飞行径迹, 通过分析粒子的在投影室中每单位路径的电离能量损失, 可对粒子进行初步鉴别, 同时飞行时间谱仪^[19]则能够精确地测量粒子的质量。TOF 探测器的硬件部分由 STAR 中国组研制完成, 同时配套的电子学和集成由美方完成。STAR 中国合作组队伍从 2006 年开始研制基于多气隙电阻板的大型飞行时间探测器 (TOF) 的大批量模块, 于 2009 年底研制成功了由 4032 块多气隙电阻板室 (MRPC) 构成的 120 条 TOF 样条 (tray) 组成的桶型探测器, 成功安装于 STAR 探测器上, 覆盖在 TPC 外面。该探测器具有卓越的时间分辨能力, 极大地提高了 STAR 探测器的粒子鉴别能力, 并促进了高端物理成果的产出。由于 TOF 具有很高的粒子质量分辨能力, 在这次反质子相互作用的研究中对于提高反质子样本的纯度起到了重要的作用。

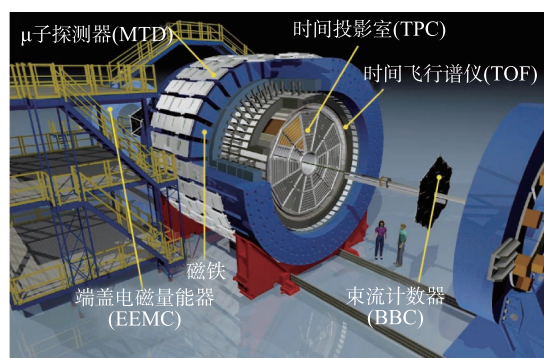


图 2 (在线彩图) STAR 探测器结构示意图

3 数据处理方法

利用 STAR 探测器中的时间投影室和飞行时间谱仪, 可以使探测到的反质子纯度达到 99% 以上。通过

利用金核-金核碰撞中产生的丰富的反质子,我们先测量了反质子-反质子动量关联函数,即测量反质子对间的相对动量的分布形式,或称为随后讲到的HBT关联函数。1956年在一个开创性的实验中,Hanbury-Brown和Twiss利用两个光子之间关联测量了星体的角径,在一个光子被一个探测器探测到的同时,第二个光子被另外一个探测器探测到的几率表现出对两个探测器横向距离的一种关联^[20]。后来在高能粒子碰撞和重离子碰撞实验中,人们测量了在动量空间中两个全同粒子的强度关联,这种从一个扩展源发出的全同粒子的时空或者动量的关联被称作HBT效应^[21],此效应是研究反质子间相互作用的基础。关联函数的方法在物理学领域具有广泛的应用^[22-30]。实验上,我们根据如下公式: $CF(k_{pp}^*) = \frac{A(k_{pp}^*)}{B(k_{pp}^*)}$ 来测量

关联函数,其中 $A(k_{pp}^*)$ 是两个来自同一对撞事例的反质子的动量差分布, $B(k_{pp}^*)$ 则是两个来自不同对撞事例的反质子的动量差分布。我们的实验数据来自2011年STAR实验金核碰撞200 GeV的数据,所有的数据都用到了TPC和TOF探测器。TPC提供了粒子的径迹信息,通过能损可对粒子种类进行鉴别,TOF则提供了粒子的质量信息。在数据分析过程中,为了选择更好的探测器接受度和除去束流和管道相互作用(Beam pipe)引起的背景,我们需要对碰撞事例进行挑选。我们要求事例的碰撞顶点 $|V_z(\text{TPC})| < 30 \text{ cm}$, $|V_r(\text{TPC})| < 2 \text{ cm}$ 并且 $|V_z(\text{TPC}) - V_z(\text{VPD})| < 3 \text{ cm}$, 其中 $V_z(\text{TPC})$ 和 $V_z(\text{VPD})$ 分别是TPC和pVpd(赝顶点探测器pseudo-Vertex Position Detector)重建出来的碰撞顶点在束流方向上的位置, $V_r(\text{TPC})$ 为TPC重建顶点到束流方向的最短距离。我们的数据选用碰撞中心度为30% ~ 80%的事例。同时对事例中的粒子,我们也要进行筛选,如表1中所示。 N_{HitsFit} 和 N_{HitsPoss} 分别为用来拟合径迹所用到的电

子簇个数和径迹可能包括的电子簇个数。 $N_{\text{HitsFit}} > 15$ 和 $N_{\text{HitsFit}}/N_{\text{HitsPoss}} > 0.52$ 用来排除TPC重构出来的比较短的径迹和分叉的径迹。赝快度 $|\eta| < 0.7$ 能够保证径迹在一个好的TPC接收范围内。 $n_{\text{Sigma Proton}}$ 表示测量到的径迹能损和理论值的偏离大小,用来进行粒子鉴别。 dca 是指在粒子径迹与碰撞顶点间的最小距离。

在(反)质子样本中,由于存在由其他粒子衰变产生的次级(反)质子,因此我们要获得原初(反)质子关联函数时必须剔除这种次级(反)质子关联的污染。在RHIC实验中,次级反质子的来源主要是通过反Lambda衰变产生的,因此我们在实验中测到的反质子之间的关联函数可由以下公式来描述,

$$C_{\text{inclusive}}(k_{pp}^*) = 1 + x_{p\bar{p}}[C_{p\bar{p}}(k_{pp}^*; R_{p\bar{p}}) - 1] + x_{p\bar{\Lambda}}[C_{p\bar{\Lambda}}(k_{pp}^*; R_{p\bar{\Lambda}}) - 1] + x_{\bar{\Lambda}\bar{\Lambda}}[C_{\bar{\Lambda}\bar{\Lambda}}(k_{pp}^*; R_{\bar{\Lambda}\bar{\Lambda}}) - 1], \quad (1)$$

其中 $C_{\text{inclusive}}(k_{pp}^*)$ 为实验中测量到的反质子之间的关联函数, $[C_{p\bar{p}}(k_{pp}^*; R_{p\bar{p}}) - 1]$ 为两个真正从碰撞中原初产生的反质子的关联函数,而这个函数可以用量子多粒子关联理论的Lednicky-Lyuboshitz(L-L)模型^[31]来定量分析。 $C_{p\bar{\Lambda}}(k_{pp}^*; R_{p\bar{\Lambda}})$ 通过L-L模型得到^[32], $C_{\bar{\Lambda}\bar{\Lambda}}(k_{pp}^*; R_{\bar{\Lambda}\bar{\Lambda}})$ 则是来自STAR的实验数据^[33]。 $x_{p\bar{p}}$, $x_{p\bar{\Lambda}}$, $x_{\bar{\Lambda}\bar{\Lambda}}$ 则分别是两个反质子都来自原初碰撞的比例,一个反质子来自原初碰撞另一个来自 $\bar{\Lambda}$ 衰变的比例,两个反质子都来自 $\bar{\Lambda}$ 衰变的比例,由THERMINATOR2模型^[34]得到。在L-L模型中,对于给定的S波散射参数,相应的由末态相互作用而产生的在关联函数中的权重可通过

$$w(\mathbf{k}^*, \mathbf{r}^*) = \frac{|\psi_{-\mathbf{k}^*}^{S(+)}((\mathbf{r}^*) + (-1)^S \psi_{\mathbf{k}^*}^{S(+)}(\mathbf{r}^*))|^2}{2}, \quad (2)$$

计算而得,其中 $\psi_{-\mathbf{k}^*}^{S(+)}(\mathbf{r}^*)$ 是在相同发射时间($t=0$)条件下Beth-Salpeter振幅,它可以通过散射问题的外部解来算出,

$$\psi_{-\mathbf{k}^*}^{S(+)}(\mathbf{r}^*) = e^{i\delta_c} \sqrt{A_c(\eta)} \left[e^{-i\mathbf{k}^* \cdot \mathbf{r}^*} F(-i\eta, 1, i\xi) + f_c(k^*) \frac{\tilde{G}(\rho, \eta)}{r^*} \right], \quad (3)$$

其中 $\eta = (k^* a_c)^{-1}$, $a_c = 57.5 \text{ fm}$ 为两个反质子的波尔半径, $\rho = \mathbf{k}^* \cdot \mathbf{r}^*$, $\xi = \mathbf{k}^* \cdot \mathbf{r}^* + \rho$, $A_c(\eta)$ 为库仑渗透系数,可由 $A_c(\eta) = 2\pi\eta[\exp(2\pi\eta) - 1]^{-1}$ 给出, F 为合流超几何函数, $\tilde{G}(\rho, \eta) = \sqrt{A_c(\eta)}[G_0(\rho, \eta) + iF_0(\rho, \eta)]$ 是由常规的(F_0)和奇异的(G_0)的S波构成。

$$f_c(k^*) = \left[\frac{1}{f_0} + \frac{1}{2} d_0 k^{*2} - \frac{2}{a_c} h(\eta) - i k^* A_c(\eta) \right]^{-1}, \quad (4)$$

表 1 粒子筛选条件

筛选条件	范围
N_{HitsFit}	≥ 15
$N_{\text{HitsFit}}/N_{\text{HitsPoss}}$	> 0.52
p_T	$> 0.4 \text{ GeV}/c$
p_T	$< 2.0 \text{ GeV}/c$
Rapidity	< 0.7
$n_{\text{Sigma Proton}}$	< 1.5
Mass square	< 0.8
Mass square	< 1.0
Global dca	$< 2.0 \text{ cm}$

是库仑相互作用重整化后的 S 波散射幅度, 其中 $h(\eta) = \eta^2 \sum_{n=1}^{\infty} [n(n^2 + \eta^2)]^{-1} - C - \ln |\eta|$, $C = 0.5772$ 为欧拉常数。 f_0 为散射长度, 是低能情况下的 S 波散射振幅。散射长度是相互作用的一个基本参数, 它的符号直接决定了系统是否存在束缚态。若 $f_0 < 0$ 则可以存在束缚态, $f_0 > 0$ 则不存在束缚; d_0 则为有效力程, 其与势阱范围有关, 它也是描述强相互作用的重要参数。

4 实验结果及讨论

如图3展示了中心度为30% ~ 80%的金核-金核碰撞中, 在 $n_{\text{Sigma Proton}} < 2$ 的筛选条件下的动量关联函数。其中的(a)图为质子-质子关联函数, (b)图为反质子-反质子关联函数, (c)图为两者之间的比值。从(a)图和(b)图看出, 质子-质子与反质子-反质子的关联函数结构是非常相似的, 在相对动量($2k^*$)非常小时, 关联函数在1的下方, 这是由于质子对或者反质子对间库仑相互作用引起的。同时它们的关联函数在 $k^* \approx 0.02 \text{ GeV}^{-1}$ 有一个峰, 这是由相互吸引的相互作用引起的。(c)图显示的质子间关联函数与反质子间关联函数的比值很好地位于1周围也表明质子-质子与反质子-反质子相互作用是几乎相同的。我们通过

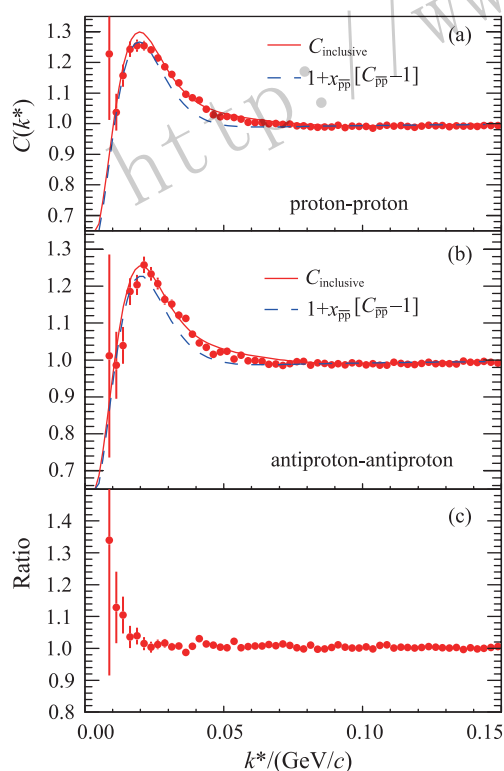


图3 (在线彩图) 质子-质子、反质子-反质子关联函数以及它们的比值

式(1)来拟合在表1的筛选条件下所得的关联函数, 测得了反质子-反质子的散射长度(f_0)和有效力程(d_0)这两个描述强相互作用的基本作用参数。其中 $f_0 = 7.41 \pm 0.19(\text{stat}) \pm 0.36(\text{sys}) \text{ fm}$; $d_0 = 2.14 \pm 0.27(\text{stat}) \pm 1.34(\text{sys}) \text{ fm}$, 表2列出了反质子-反质子以及其他核子间强相互作用的参数 f_0 和 d_0 [35, 36], 我们发现在误差范围内反质子-反质子的基本作用参数与质子-质子的是一致的[35]。此次测量的结果很好地解释了反核子为何能结合成更为复杂的反物质, 从而开启了人们对反物质形成的微观机制的理解。本次实验结果, 在目前的实验精度内, 反物质间的相互作用与正物质并没用差别。根据CPT对称理论, 物质和反物质除电荷外其他所有性质应该是一样的, 这项研究是对量子场论和对称原理的一个直接验证, 成为检测CPT对称性的又一种新的方式。该项研究也为超冷陷阱环境下的反物质离子的相互作用提供了定量的输入参数。

表2 核子-核子的散射长度和有效力程

	散射长度 f_0/fm	有效力程 d_0/fm
Proton-proton	7.82 ± 0.003	2.78 ± 0.006
Antiproton-antiproton	$7.41 \pm 0.19(\text{stat}) \pm 0.36(\text{sys})$	$2.14 \pm 0.27(\text{stat}) \pm 1.34(\text{sys})$
Proton-neutron (triplet)	-5.425 ± 0.018	1.711 ± 0.053
Proton-neutron (singlet)	23.721 ± 0.02	2.658 ± 0.062
Neutron-neutron	16.7 ± 0.38	2.78 ± 0.13

5 展望

未来通过更为精确的 $\bar{\Lambda} - \bar{\Lambda}$ 关联函数的测量, 可极大地减小反质子-反质子散射长度和有效力程测量的系统误差, 更好地与质子-质子的值进行对比。从最初预言反物质存在, 到反物质的发现, 以及现在对反物质性质的研究, 丰富并加深了人类对整个物质世界的理解。接下来反物质物理的一个重要的研究方向是研究反物质的各项性质, 从而寻找正物质和反物质不对称性的蛛丝马迹和物理起源。从反物质的多个角度研究CPT对称性是以后研究的一个重要的方向, 将为人类认识宇宙的演化提供重要的线索。未来任何正物质和反物质性质的差别的发现都将预示着物理学新的突破。

致谢 作者感谢RHIC-STAR合作组全体成员, 特别是BNL的唐爱洪研究员和其他中国合作组成员。

参考文献:

- [1] BAUR G, BOERO G, BRAUKSIEPE A, *et al.* Phys Lett B, 1996, **368**(3): 251.

- [2] BLANFORD G, CHRISTIAN D C, GOLLWITZER K, *et al.* Phys Rev Lett, 1998, **80**(14): 3037.
- [3] AMORETTI M, AMSLER C, BONOMI G, *et al.* Nature, 2002, **419**(6906): 456.
- [4] STAR Collaboration. Science, 2010, **328**: 58.
- [5] STAR Collaboration. Nature, 2011, **473**: 353.
- [6] MA Yugang. J Phys Conf Ser, 2013, **420**: 012036.
- [7] MA Yugang, CHEN Jinhui. China Basic Science, 2011, **2**: 20. (in Chinese)
(马余刚, 陈金辉. 中国基础科学, 2011, **2**: 20.)
- [8] MA Yugang. Science Development Report[R]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2012: 108. (in Chinese)
(马余刚. 科学发展报告[R]. 北京: 中国科学院, 2012: 108.)
- [9] MA Yugang, CHEN Jinhui, XUE Liang. Front Phys, 2012, **7**: 637.
- [10] AMS Collaboration. Phys Rev Lett, 2013, **110**(14): 141102.
- [11] AMS Collaboration. Phys Rev Lett, 2014, **113**(22): 121101.
- [12] ALICE Collaboration. Nature Physics, 2015, **11**: 811.
- [13] STAR Collaboration. Nature, 2015, **527**: 345.
- [14] XU Zizong. Nuclear and Particle Physics Introduction[M]. Heifei: Press of University of Science and Technology of China, 2009: 280. (in Chinese)
(许咨宗. 核与粒子物理导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009: 280.)
- [15] ADAMS J, AGGARWAL M M, AHAMMED Z, *et al.* Nucl Phys A, 2005, **757**: 102.
- [16] PHENIX collaboration. Nucl Phys A, 2005, **757**: 184.
- [17] MA Yugang. Modern Physics, 2013, **25** (5): 27. (in Chinese)
(马余刚. 现代物理知识, 2013, **25**(5): 27.)
- [18] STAR Collaboration. Nucl Instr Meth A, 2003, **499**: 624.
- [19] LLOPE W J (for the STAR Collaboration). Nucl Instr Meth A, 2012, **661**: s110.
- [20] BROWN R H, TWISS R Q. Nature, 1956, **177**(4497): 27.
- [21] POCHODZALLA J, GELBKE C K, LYNCH W G, *et al.* Phys Rev C, 1987, **35**: 1695.
- [22] GYULASSY M. Phys Rev C, 1979, **20**: 2267.
- [23] BOAL D H, GELBKE C K, JENNINGS B K. Rev Mod Phys, 1990, **62**(3): 553.
- [24] LEDNICKY R. Phys Atomic Nuclei, 2004, **67**: 72.
- [25] LYNCH W G, CHITWOOD C B, TSANG M B, *et al.* Phys Rev Lett, 1983, **51**: 1850.
- [26] MA Yugang, WEI Yibin, SHEN Wenqing, *et al.* Phys Rev C, 2006, **73**: 014604.
- [27] MA Yugang, CAI Xiangzhou, CHEN Jingen, *et al.* Nucl Phys A, 2007, **790**: 299c.
- [28] LISA M A, PRATT S, SOLTZ R, *et al.* Ann Rev Nucl Part Sci, 2005, **55**: 357.
- [29] MA Yugang, FAND Deqing, SUN Xiaoyan, *et al.* Phys Lett B, 2015, **743**: 306.
- [30] FAND Deqing, MA Yugang, SUN Xiaoyan, *et al.* Phys Rev C, 2016, **94**(4): 044621.
- [31] LEDNICKY R, LYUBOSHITZ V L. Sov J Nucl Phys, 1982, **35**: 770.
- [32] STAR Collaboration. Phys Rev C, 2006, **74**: 064906.
- [33] STAR Collaboration. Phys Rev Lett, 2015, **114**: 022301.
- [34] CHOJNACKI M, KISIEL A, FLORKOWSKI W, *et al.* Comput Phys Commun, 2012, **183**: 746.
- [35] MATHELITSCH L, VERWEST B J. Phys Rev C, 1984, **29**: 739.
- [36] ŠLAUS I, AKAISHI Y, TANAKA H. Phys Rep, 1989, **173**: 257.

Study of Interaction Between Antiprotons

ZHANG Zhengqiao^{1,2,†}, MA Yugang¹

(1. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: With undergoing researches on antimatter physics, it is crucial to understand what the interaction between antiprotons is. Is it the same as the interaction between protons? This measurement will definitely help us to understand the formation mechanism of antimatter nuclei as well as the symmetry of matter and antimatter. In this context, our STAR collaboration measured the correlation function of antiproton-antiproton pairs from 200 GeV/c Au+Au collisions. After subtracting the residual correlation due to the secondary antiprotons that decayed from other particles, the primary antiproton-antiproton correlation function is extracted. By applying the quantum theory of multi-particle correlation, two key parameters that characterize the corresponding strong interaction: namely, the scattering length (f_0) and effective range (d_0) were obtained. Within error bars, it is found that the f_0 and d_0 for the antiproton-antiproton interaction are consistent with their antiparticle counterparts - the ones for the proton-proton interaction. Like the force that holds ordinary protons together within the nuclei of atoms, the force between antiprotons is attractive and strong, which overcomes the tendency of the like (negatively) charged particles to repel one another, and allows the antiprotons to bind to form antinucleus. The current measurement is for the first time to measure the interaction between antimatter, it offers a foundation to understanding the structure of more-complex antinuclei and their properties. Also our measurement offers a new way to test the CPT symmetry, which has an important impact for human beings to understand the law of motion in our world.

Key words: antiproton; correlation function; effective range; scattering length; CPT symmetry

Received date: 25 Dec. 2016; **Revised date:** 10 May 2017

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11035009, 11220101005, 11421505); National Basic Research Program of China(973 Program)(2014CB845400)

† **Corresponding author:** MA Yugang, E-mail: mayugang@sinap.ac.cn.