

· 研究进展 ·

# 反质子相互作用的测量和研究进展

马余刚\* 张正桥

(中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800)

[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,我们 STAR 探测器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-反质子之间的库伦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。同时为电荷共轭-空间反射-时间反演(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

DOI:10.16262/j.cnki.1000-8217.2017.02.003

普遍认为,在我们的物质世界中存在着一种“镜像的世界”,它的个别性质和现实世界正好相反,其他性质则完全相同。从物理学的角度来说,这种“镜像世界”就是反物质。1928年,英国物理学家狄拉克根据相对论方程和量子电动力学方程,推测世界上存在反物质:构成它们的基本粒子与物质的基本粒子质量相同,但电荷相反。这个大胆猜想首先从安德森观测到正电子而得到实验的明确证实。狄拉克因创立有效的、新形式的原子理论,包括正确预测了反物质而获得1933年诺贝尔物理学奖,安德森因为正电子的观测而获得了1936年的诺贝尔物理学奖。1955年,塞格雷和张伯伦等在美国伯克利的回旋加速器上发现了反质子,获得了1959年的诺贝尔物理学奖。如今,构成物质的各种基本粒子的反粒子,几乎都被找到。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。另一方面,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,迄今科学家还没有从反物质之间相互作用的层次对CPT守恒进行检验。

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

收稿日期:2016-04-20;修回日期:2016-05-28

\* 通信作者,Email: ygma@sinap.ac.cn

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。打个比方,如果(反)物质原子核是大厦的话,那么其构成单元(核子或反核子)就是砖瓦,而大厦要形成稳固就必须依靠钢筋水泥——而这就是(反)核子之间的作用力。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。

另外,正反物质之间的碰撞会产生湮没过程,即两者都不复存在,从而释放巨大的能量,并释放多种具有杀伤力的射线,因此“反物质武器”引起了军事界兴趣,也成为科幻小说中一种比核弹更可怕的武器。如果人类未来能对这种能量予以控制,就可能制造出推进力更强、重量更轻的航天发动机。因此,反物质也被视为一种潜在的新能源。目前,反物质研究还处在纯基础研究阶段,但未来,人类有可能将反物质用作能源和武器,使其发挥巨大的应用价值。

鉴于以上反物质研究的重要性,国际上的研究竞争激烈,其主要焦点集中在自然界和实验室寻找更重的反物质原子核以及合成可控的反氢原子并研究其属性等重大科学问题。一方面,科学家希望从宇宙射线中捕获反物质信号,如丁肇中领导的国际空间站上的阿尔法磁谱仪 AMS-II 实验,试图从宇宙射线中的极端高能正电子的产额中寻找暗物质的蛛丝马迹;另一方面,核物理学家可以借助先进的加速器技术,通过原子核对撞机在实验室制造反物质,如美国布鲁克海汶国家实验室(BNL)的相对论重离子对撞机(RHIC)和欧洲核子中心的大型强子对撞机(LHC)。反物质研究在过去十余年取得了巨大的成功,这其中包括 CERN 在实验室捕捉到反氢原子<sup>[1-3]</sup>,BNL-STAR 合作组首次观测到的反超氦核和反氦 4<sup>[4-8]</sup>、以及 AMS-II 新数据观测到正电子通量“反常”增加<sup>[9-10]</sup>、以及位于 CERN 的 LHC-ALICE 实验关于反物质轻核质量的精确测量<sup>[11]</sup>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?这些先驱性的研究将对理解反物质的构成与性质起到关键性的作用。同时,有可能对 CPT 对称性做出更严格的检验。

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 RHIC 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,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。这对人类了解物质世界尤其是反物质世界具有重大的科学意义。

## 1 相对论重离子对撞机 RHIC 以及 STAR 探测器介绍

相对论重离子对撞机 RHIC(Relativistic Heavy Ion Collider)<sup>[13]</sup>位于纽约长岛布鲁克海汶国家实验室。RHIC 是当前国际上核物理研究的大科学装置,其利用两束接近于光速的金核对撞来模拟宇宙大爆炸,对撞能量高达 200 GeV,产生了类似于宇宙大爆炸之后初期的物质形态。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(由夸克-胶子组成的等离子体新物质形态),它具有极高的温度,大约是太阳中心温度的 250,000 倍。这种新物质形态迅速冷却后,会产生大量的粒子与反粒子,因此提供了人们寻找反物质并研究其性质的极佳场所。STAR (Solenoidal Tracker at RHIC)探测器<sup>[14]</sup>位于 RHIC 环形对撞机的 6 点钟位置,它是由不同探测子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。来自十几个国家近 50 家单位的 600 多名科学家与研究生,围绕 STAR 探测器和相关的物理分析构成了一个大型 STAR 国际合作组。中国单位包括中国科学院上海应用物理研究所、中国科学技术大学、清华大学、华中师范大学、中国科学院近代物理研究所和山东大学等。其中上海应物所研究组主要关注的研究是夸克胶子等离子体中的奇异夸克物理和寻找反物质原子核以及研究其相关性质等。上海应物所研究组

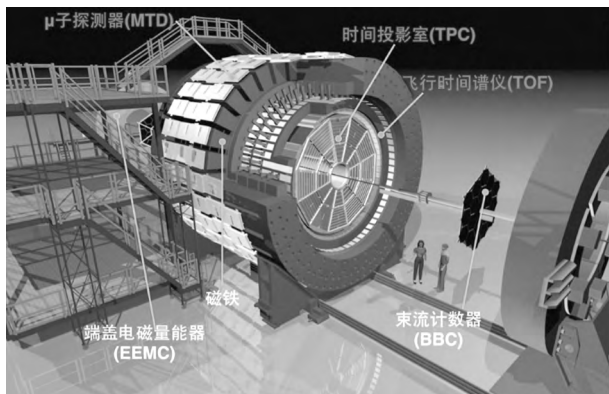


图 1 STAR 探测器结构示意图

在几个重要的反物质研究成果中均起到了核心作用<sup>[4-8]</sup>。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<sup>[15]</sup>则能够精确地测量粒子的质量(图 1)。

ToF 探测系统是由中美 STAR 合作组合作完成的,探测器硬件和相应的物理部分得到了国家自然科学基金委、国家科技部、中国科学院的联合资助。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 4 032 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。在 TOF 研制成功后,美方 BNL 副所长、物理部主任和 STAR 发言人三人联名高度评价与中国的 TOF 合作,认为该合作“构成了将会对中国和世界核科学产生几十年的影响的科学遗产。为项目的成功而开展的中美间的紧密合作现在已经作为以后中美联合科学投资的典范”。

## 2 反质子间相互作用参数的首次测量

相对论重离子对撞机(RHIC)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初期的物质形态。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,它具

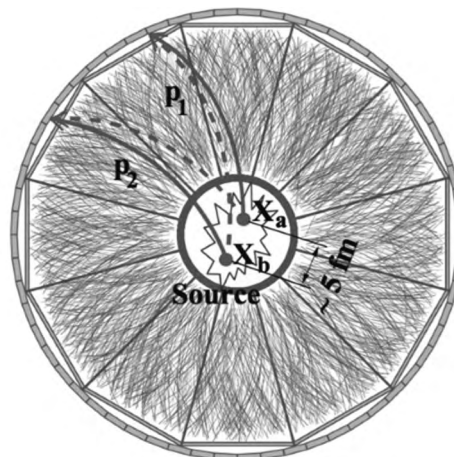


图 2 STAR 探测器内探测到的两个反质子-反质子关联示意图

有大约是太阳中心 250,000 倍的极端高温。然后夸克-胶子等离子体迅速冷却产生了大约等量的质子与反质子。在近 5 亿次金-金核对撞产生了约 50 亿个反质子,这为研究反质子间的相互作用提供了极佳的机会。同时利用 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(图 2)。

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<sup>[16]</sup>。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<sup>[17]</sup>,此效应是研究反质子间相互作用的基础。实验上,我们根据如下公式:  $C(k_{pp}^*) = \frac{A(k_{pp}^*)}{B(k_{pp}^*)}$  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。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,

$$C_{\text{inclusive}}(k_{\bar{p}\bar{p}}^*) = 1 + x_{\bar{p}\bar{p}} [C_{\bar{p}\bar{p}}(k_{\bar{p}\bar{p}}^*; R_{\bar{p}\bar{p}}) - 1] + x_{\bar{p}\bar{A}} [\widetilde{C}_{\bar{p}\bar{A}}(k_{\bar{p}\bar{p}}^*; R_{\bar{p}\bar{A}}) - 1] + x_{\bar{A}\bar{A}} [\widetilde{C}_{\bar{A}\bar{A}}(k_{\bar{p}\bar{p}}^*; R_{\bar{A}\bar{A}}) - 1] \quad (1)$$

其中  $C_{\text{inclusive}}(k_{\bar{p}\bar{p}}^*)$  为实验中测量到的反质子之间的关联函数,  $[C_{\bar{p}\bar{p}}(k_{\bar{p}\bar{p}}^*; R_{\bar{p}\bar{p}}) - 1]$  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<sup>[18]</sup>来定量分析。

在这个 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  $\omega(k^*, r^*) = [\psi_{-k^*}^{S(+)}(r^*) + (-1)^S \psi_{k^*}^{S(+)}(r^*)]^2 / 2$  计算而得, 其中  $\psi_{-k^*}^{S(+)}(r^*)$  是在相同发射时间 ( $t=0$ ) 下 Beth-Salpeter 振幅, 它可以通过散射问题的外部解来算出,

$$\psi_{-k^*}^{S(+)}(r^*) = e^{i\theta_c} \sqrt{A_c(\eta)} \left[ e^{-ik^* r^*} F(-i\eta, 1, i\xi) + f_c(k^*) \frac{\widetilde{G}(\rho, \eta)}{r^*} \right]^{[18-19]}$$

其中  $\eta = (k^* a_c)^{-1}$ ,  $a_c = 57.5 \text{ fm}$  为两个反质子的波尔半径,  $\rho = k^* r^*$ ,  $\xi = k^* r^* + \rho$ ,  $A_c(\eta)$  为库伦渗透系数, 可由

$$A_c(\eta) = 2\pi\eta [\exp(2\pi\eta) - 1]^{-1}$$

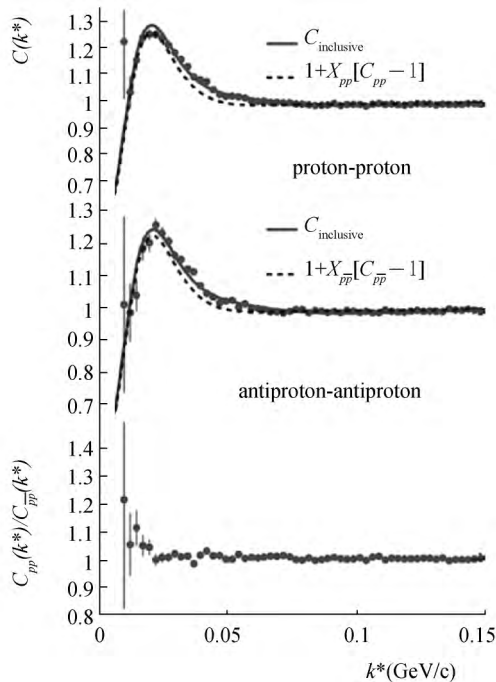


图3 质子-质子(上图),反质子-反质子(中图)关联函数以及它们的比值(下图)

给出,  $F$  为合流超几何函数,

$$\widetilde{G}(\rho, \eta) = \sqrt{A_c(\eta)} [G_0(\rho, \eta) + iF_0(\rho, \eta)]$$

是由常规的 ( $F_0$ ) 和奇异的 ( $G_0$ ) s-wave 构成。

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

是库伦相互作用重整化后的 s-wave 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。其中  $f_0$  为散射长度, 是低能情况下 s-wave 的散射振幅。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。通过分析碰撞中心度为 30%—80% 的金核-金核碰撞数据, 我们得到了如图 3 所示的动量关联函数, 其中的上图为质子-质子关联函数, 中图为反质子-反质子关联函数, 下图为两者之间的比值。从上图和中图看出, 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伦相互作用引起的。同时他们的关联函数在  $k^* \approx 0.02 \text{ GeV}/c$  有一个峰, 这是由相互吸引的 s-wave 相互作用引起的。下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的位于 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。同时, 我们通过公式 (1) 来拟合关联函数, 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

$$f_0 = 7.41 \pm 0.19(\text{stat.}) \pm 0.36(\text{sys.}) \text{ fm},$$

$$d_0 = 2.14 \pm 0.27(\text{stat.}) \pm 1.34(\text{sys.}) \text{ fm},$$

在误差范围内与测得的质子-质子基本作用参数是一致的<sup>[20]</sup>。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。

相关研究论文发表在 2015 年 11 月 19 日 *Nature* 上。 *Nature* 审稿人对该研究给予高度赞赏: “这是

首例反质子-反质子作用的直接测量。文章宣布了一个重要发现：反质子作用与质子作用等同。这个测量是对反物质作用力的重要原创性贡献。”“该工作对于理解强相互作用的 CPT 对称性具有重要作用”。论文发表后，受到国内外媒体、学术界、研究基金会的广泛关注，在学界产生了巨大反响。例如，吴岳良院士在 2015 年度“中国科学十大进展”发布会上点评“该实验结果首次给出了两个反质子之间强相互作用力的直接证据，为进一步研究反原子核的形成和属性奠定了基础”。张焕乔院士在 *National Science Review* 刊物以 Research Highlight 栏目点评这项工作<sup>[21]</sup>。

值得一提的是，在反物质的系统性研究上，中国 STAR 合作组，特别是上海应物所研究组分别对在 2010 年和 2011 年利用 STAR 数据先后发现的首个反物质超核(反超氦)和迄今观测到的最重的反物质原子核(反氦 4)做出了关键性贡献<sup>[4-8]</sup>。相关论文分别发表在当年度美国的 *Science*<sup>[4]</sup> 和英国的 *Nature*<sup>[5]</sup> 杂志上。前者入选了 2010 年度“中国科学十大进展”，后者以“2011 年中国科学家具有影响力的部分工作”入选 2012 年度科学出版社公开出版的《科学发展报告》。

在此次对反物质间作用力的首次测量过程中，上海应物所研究组在基于多年的反物质研究和在低能重离子物理上对于质子-质子关联的研究的积累，再次与美国布鲁克海文国家实验室等紧密合作，从研究思路的提出，数据的全程分析，论文的撰写和修改等各个方面，对此项成果做出了最关键性贡献。该成果被科技部评选为 2015 年度“中国科学十大进展”，入选《科技导报》组织的“2015 年中国重大科学进展”，入选《上海科技报》组织的“2015 年上海十大科技事件”等。

### 3 研究展望

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差别的发现都将预示着物理学新的突破。同时，由于正反物质会发生湮没，将质量完全转化为能量，因此对它的

可控利用也是人类的一个梦想。当然，目前由于反物质的产生需要巨大的能量输入，因此可控、高效地利用反物质之路还仍漫长。

致谢 本研究项目得到了国家自然科学基金重点项目(11035009)、国际(地区)合作与交流项目(11220101005)、创新群体项目(11421505)、国家重点基础研究发展计划(2014CB845400)等联合资助。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. Production of anti-hydrogen. *Physics Letters B*, 1996, 368(3): 251—258.
- [2] Blanford G, Christian DC, Gollwitzer K, et al. Observation of atomic antihydrogen. *Physical Review Letters*, 1998, 80(14): 3037.
- [3] Amoretti M, Amsler C, Bonomi G, et al. Production and detection of cold antihydrogen atoms. *Nature*, 2002, 419(6906): 456—459.
- [4] STAR Collaboration. Observation of an antimatter hypernucleus. *Science*, 2010, 328(5974): 58—62.
- [5] STAR Collaboration. Observation of the antimatter helium-4 nucleus. *Nature*, 2011, 473(7347): 353—356.
- [6] Ma Y G. Observation of antimatter nuclei at RHIC-STAR. *J Phys Conf Ser*, 2013, 420:012036.
- [7] 马余刚, 陈金辉. 相对论重离子对撞机上发现首个反物质超核. *中国基础科学*, 2011, 2: 20—21.
- [8] 马余刚. 科学发展报告 2012. 北京: 中国科学院, 2012: 108—112.
- [9] AMS Collaboration. First result from the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station: precision measurement of the positron fraction in primary cosmic rays of 0.5—350 GeV. *Physical Review Letters*, 2013, 110(14): 141102.
- [10] AMS Collaboration. High Statistics Measurement of the Positron Fraction in Primary Cosmic Rays of 0.5—500 GeV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station. *Physical Review Letters*, 2014, 113(22): 121101.
- [11] ALICE Collaboration. Precision measurement of the mass difference between light nuclei and anti-nuclei. *Nature Physics*, 2015, 11: 811.
- [12] STAR Collaboration. Measurement of interaction between antiprotons. *Nature*, 2015, 527(7578): 345—348.
- [13] Harrison M, Ludlam T, Ozaki S. RHIC project overview. *Nucl. Instrum. Methods Phys Res. A*, 2003, 499: 235.
- [14] STAR Collaboration. STAR detector overview. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 2003, 499: 624.
- [15] STAR Collaboration. Multigap RPCs in the STAR experiment at RHIC. *Nucl Instrum Methods Phys Res A*, 2012, 661:110.
- [16] Brown RH, Twiss RQ. Correlation between photons in two coherent beams of light. *Nature*, 1956, 177(4497): 27—29.
- [17] Pochodzalla J, et al. Two-particle correlations at small relative momenta for  $^{40}\text{Ar}$ -induced reactions on  $^{197}\text{Au}$  at  $E/A=60\text{MeV}$ . *Phys Rev C*, 1987, 35: 169587, 35.

- [18] Lednick R, Lyuboshitz VL. Influence of final-state interaction on correlations of two particles with nearly equal momenta. *Sov J Nucl Phys.* 1982, 35:7700—7705.
- [19] Landau LD, Lifshitz EM. *Kvantovaya Mekhanika: Nerelyativistskaya Teoriya* 3rd edn 585585n 5Nauka, 1974; Landau LD, Lifshitz EM. *Quantum Mechanics: Non-relativistic theory* 3rd edn (Pergamon, 2013).
- [20] Mathelitsch L, VerWest BJ. Effective range parameters in nucleon-nucleon scattering. *Phys Rev C*, 1984, 29: 739.
- [21] Zhang HQ. First measurement of strong interaction between antiprotons. *National Science Review*, 2016, 3:154—156.

## Measurement of interaction between antiprotons and related progress

Ma Yugang      Zhang Zhengqiao

(*Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*)

**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 with the abundant amount of antiprotons from the Au+Au collisions. After subtracting the residual correlation due to the secondary antiprotons that decayed from other particles, the pure 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 extracted. Scientists found that within error bars, 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. The strong interaction overcomes the tendency of the like (negatively) charged particles to repel one another, it allows the antiproton to bind to one another within the nuclei. 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. It 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