

# 奇异反超核和反物质\*

马余刚<sup>†</sup> 陈金辉

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2015-01-11收到

<sup>†</sup> email: ygma@sinap.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20150504

## Review on anti-hypernucleus and anti-matter measurement

MA Yu-Gang<sup>†</sup> CHEN Jin-Hui

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

**摘要** 文章简要回顾了反物质研究历史,重点阐述了过去几年反物质研究领域的新结果,包括美国布鲁克海汶国家实验室的相对论重离子对撞机(RHIC)上观测到的首个反物质反超核信号和迄今为止最重的反物质原子核——反氦4。同时,还介绍了欧洲核子中心(CERN)反氢原子捕捉的新结果以及宇宙空间站上 $\alpha$ 磁谱仪(AMS)二期的新进展等,并讨论了这些进展对认识物质结构的启示。

**关键词** 对称性,反物质超核,反氦4原子核,反氢原子,正电子反常增加

**Abstract** We briefly review the history of research on antimatter, focusing on new results from the past few years, namely, the observation of the first antimatter hypernucleus and the heaviest antimatter nucleus so far, anti-helium-4, in the Relativistic Heavy Ion Collider at Brookhaven National Laboratory. In addition, we present new results on antihydrogen atom capture from the European Organization for Nuclear Research (CERN), and describe the progress of the Alpha Magnetic Spectrometer phase-II experiment on the space station. Finally, the implications of these developments for understanding the structure of matter are discussed.

**Keywords** symmetry, anti-hypertriton, anti-helium-4, anti-hydrogen, excess of positrons

## 1 引言

对称性是物质世界的基本规律,它普遍存在于自然界和日常生活中。例如,展翅高飞的雄鹰的左右对称性,海星的五重对称性,太阳的转动对称性等等。对称性可以包括时间、空间等多个方面。任何破缺行为都可能蕴藏着新物理。对称性和对称破缺是世界统一性和多样性的根源。常态世界中的物质反物质的不对称现象仍然是一个

开放课题,引起科学家的极大关注。1956年李政道和杨振宁先驱性地发现,在微观物质世界中,左右镜像(宇称)对称性在弱相互作用时会遭到破坏,从而使科学家意识到一些基本规律在一定条件下会出现破缺。紧接着,1964年克罗宁、菲奇及其合作者在实验上发现了CP(正粒子—反粒子、左右镜像反演的联合对称性)破坏,再次引起了物理学界的震惊。它不仅意味着时间反演在微观世界中也可能是不对称的,而且对宇宙学和大统一理论有直接影响。

从CP对称性原理出发,物质数量等于反物质数量,但是在人类生存的世界里,充满了普通

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号:2014CB845400)、国家自然科学基金(批准号:11421505,11035009,11220101005,11275250,11322547)资助项目

物质，而反物质却不知道在哪里？这暗示着 CP 对称性在宇宙大爆炸过程中破缺。因此寻找反物质并研究其与物质的相互作用是科学家非常关心的重大问题。在这个过程中，有的实验装置跑到天上，有的钻入深地，计划从宇宙射线中捕获反物质信号；也有的科学家借助先进的现代加速器技术，通过大型原子核碰撞机在实验室制造反物质。反物质的研究在过去几十年取得了巨大的成就，这其中包括欧洲核子中心(CERN)在实验室捕捉到反氢原子<sup>[1-4]</sup>，美国布鲁克海汶国家实验室 BNL-RHIC 观察到反超氦核和反氦 4<sup>[5, 6]</sup>、国际空间站上的  $\alpha$  磁谱仪 AMS-II 新数据证实了正电子通量“反常”增加等现象<sup>[7]</sup>。本文回顾了反超核和反物质研究的历史，并结合作者的研究工作实际，介绍了该领域近年来取得的重要新进展。

## 2 奇异反超核和反物质研究的历史回顾

反物质概念最早是在 1898 年由 A. Schuster 给 *Nature* 杂志“Letters to the Editor”栏目的一篇文章中提出来的，文章的题目是“Potential Matter—A Holiday Dream”，作者在文中大胆地提出反物质存在的可能性。后来，随着 20 世纪初量子理论的迅猛发展，极大地深化了人们对于物质的认识。1931 年，英国物理学家狄拉克在解释狄拉克方程负能解的问题时正式引出正电子概念，预言了正负电子对的湮灭和产生，使人们认识到反物质的存在<sup>[8]</sup>。1930 年，时年 28 岁的中国核物理学家赵忠尧在美国做博士论文期间，在实验上发现重核对于硬光子的吸收系数远大于 Klein—Nishima 公式，后来意识到这是因为反应中产生了正负电子对<sup>[9]</sup>。这可以说是第一个正电子观测的间接信号。紧接着，1932 年安德森在宇宙射线中发现了正电子，1959 年，塞格雷和张伯伦在伯克利的回旋加速器上发现了反质子。一系列的诺贝尔物理学奖工作使得反物质概念深入人心。那么，下一个反物质信号是什么呢？1965 年，丁肇中参加的研究小组在布鲁克海汶国家实验室的交互梯度质子同步加速器 BNL—AGS 上成功地观测到反氦核<sup>[10]</sup>。随后，1971 年苏联科学家在其国家

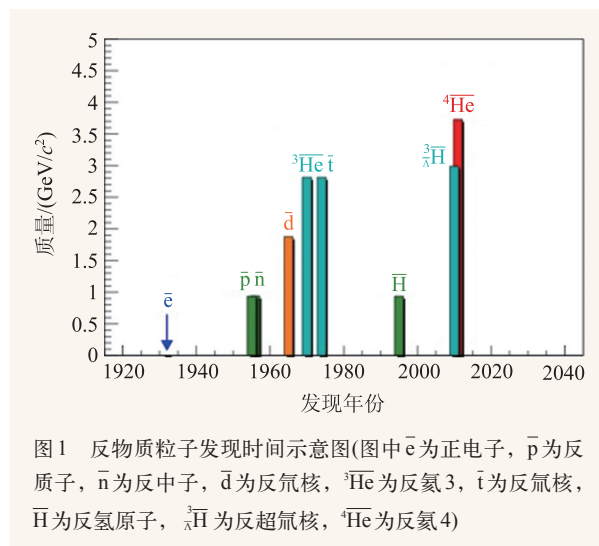


图 1 反物质粒子发现时间示意图(图中  $e^+$  为正电子,  $\bar{p}$  为反质子,  $\bar{n}$  为反中子,  $\bar{\alpha}$  为反氦核,  ${}^3\bar{\text{He}}$  为反氦 3,  $\bar{\text{He}}$  为反氦核,  $\bar{\text{H}}$  为反氢原子,  ${}^3\bar{\text{H}}$  为反超氦核,  ${}^4\bar{\text{He}}$  为反氦 4)

高能物理实验室测量到了质量数为 3 的反物质原子核信号<sup>[11]</sup>。值得指出的是，该实验室另一个重要成果是，1960 年王淦昌和合作者发现了反西格玛负超子 ( $\bar{\Sigma}^-$ )，类似的发现也在劳伦斯实验室独立实现<sup>[12, 13]</sup>。在反氦 3 的发现工作中，苏联科学家同时研究了反质子、反氦、反氦 3 的产生截面与质量数的关系，得出随着质量数的增加，反物质原子核的产生截面会相应地减少若干个数量级（这个产生截面与体系的温度有关）。所以，假设在相同的产生机制下，在他们的加速器上观测到下一个反物质原子核需要的事例统计量要比发现反氦 3 的事例统计量增加约 1 万倍，这也是为什么在随后的几十年都没有发现反氦 4 的主要原因。在反氦 4 发现之前，来自布鲁克海汶国家实验室的 RHIC—STAR 实验组在 2010 年发现了由反质子、反中子和反  $\Lambda$  粒子组成的反物质超氦核，这也是人们所观测到的首个反物质超核。反超氦核引入了第二代夸克成员：奇异夸克，反超氦核的发现把反奇异夸克引入到了反物质家庭中。图 1 为反物质粒子发现时间示意图。

## 3 奇异反超核和反物质研究的新进展

### 3.1 反超核实验测量

原子核由中子和质子组成，是研究核力的主要载体。后来由于宇宙学和天体物理的发展，人

们逐渐认识到超子在宇宙演化、中子星内核构成中的重要性<sup>[14]</sup>。在物质相互作用中，如果超子取代核子就形成了超核。目前，人们已经发现一些 $\Lambda$ 超核和 $\Sigma$ 超核。通过对超核的测量，人们能够用来研究超子—核子相互作用，以此作为研究核天体物理中奇特物质状态方程等的输入参数。最轻的超核由1个质子、1个中子和1个 $\Lambda$ 超子组成，称为超氦核。超核从上世纪60年代发现以来，取得了很大的进步，尤其是双 $\Lambda$ 超子的发现是实验室研究超子—超子相互作用的唯一途径<sup>[15]</sup>。从已有的实验数据可以看出，超氦核的寿命接近于自由 $\Lambda$ 粒子的寿命，约为200 ps，是不稳定核，所以目前实验上只能通过其末态衰变产物来寻找超核信号。2010年，RHIC—STAR实验组研究人员在其实验数据库中，通过反氦3和 $\pi^+$ 介子衰变道，观测到第一个反超核信号：反超氦核<sup>[5]</sup>。

RHIC是当前国际上核物理研究的大科学装置。自从2000年正式运行以来，在该装置上已经取得了一系列重要的科学成果，包括发现了一种可能存在于宇宙早期的夸克胶子等离子体流<sup>[16]</sup>。在RHIC装置运行的头几年，有4个大型探测器，它们分别是BRAHMS，PHENIX，PHOBOS和STAR探测器。这4个探测器的设计有各自的特点，一方面是基于物理上的相互补充，同时兼顾在一定程度上能相互印证。随着实验数据的大量累积以及高效的分析，在2006年，RHIC的4个实验组各自发表了对高能重离子碰撞产生的新物质形态的白皮书，概括了新物质形态——夸克胶子等离子体的实验证据和相关性质<sup>[16]</sup>。

STAR(Solenoidal Tracker at RHIC)探测器位于RHIC环形对撞机的6点钟位置。STAR是具有测量中心快度区域的全方位角接收度并由不同探测器系统构成的一个大型探测器复合装置，它具有多径迹事件重建能力，能够直接提供大动量范围(0.2—30 GeV/c)的带电粒子信息。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。合作组由近500位科学家和研究生组成，他们分别来自于美国、欧洲、亚洲、南美洲

等10余个国家的近50家单位。在合作组中，中国6家科研单位是其中的重要的组成力量，这些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。

STAR探测器主要部件包括时间投影室、硅顶点探测器、桶型飞行时间探测器、电磁量能器等。这些探测器子件都是STAR探测器的重要组成部分，它们就像身体的不同脏腑，既独立工作又协同合作，从而使得身体的运转保持生命力。STAR探测器通过不同探测器子件汇集信息，从而获取每一次原子核碰撞后的末态带电粒子的信息。

在发现反超氦核的工作中，以中国科学院上海应用物理研究所的STAR实验小组作为主要力量分析了约1亿次每核子对质心系下能量为200 GeV的金核打金核事例。在这些海量的事例样本中，STAR探测器收集到约2168个反氦3信号和5810个氦3信号(如图2(c), (d)所示)。从图2(c)和(d)可以看出，STAR探测器可以非常干净地鉴别反氦3和低动量区间的 $\pi$ 介子。将这些反氦3和同一个碰撞事件中的带正电的 $\pi$ 介子的能动量信息进行一一配对，可以得到其不变质量分布。对于反超氦信号，这个分布中超过99%的信息是噪声。STAR探测器可以精确地鉴别出反超核衰变的次级顶点，这样就可以去除大部分组合背景，提高信噪比。分析组人员通过严格的探测器接收度模拟，得到一些最优化的弱衰变拓扑几何筛选条件，其中包括在衰变点位置反氦3和带正电的 $\pi$ 介子径迹间的距离小于1 cm，反超氦核径迹和碰撞顶点的距离小于1 cm，其衰变长度大于2.4 cm， $\pi$ 介子径迹和碰撞顶点的距离大于0.8 cm等。经过这些筛选之后，得到了反氦3和带正电的 $\pi$ 介子的不变质量分布如图2(b)中的空心圆点所示。从图中可以看出，在不变质量为2.991 GeV/ $c^2$ 的信号区间有明显的增强。对于残留噪声背景的去，STAR实验组运用了旋转背景分析方法，详见图2(b)的黑色实线。从图中还可以看出，旋转背景方法可以很好地描述剩余的组合背景。为了提高统计

效果，分析组采用了形式为  $f(x) \propto \exp[-(x/p_1)] - \exp[-(x/p_2)]$  的双指数函数来拟合剩余的组合背景分布，其中参数  $x = m - m(^3\text{He}) - m(\pi\text{介子})$ ， $m$  为质量参数， $p_1, p_2$  是拟合参数。这样，将信号区间的计数(见图 2(b)中的空心圆点)，减去双指数描述的组合背景，得到反超氦核的信号约为 70 个。STAR 实验组同时测量到明显的超氦核信号，这也是反超核得以发现的另一个有力证据。通过相同的分析方法对氦 3 和带负电的  $\pi$  介子进行分析，得到超氦核信号约为  $157^{15, 17}$ 。在 STAR 发现反超氦核之后，欧洲核子中心的大型强子对撞机上也实现了 2.76 TeV 的铅—铅对撞中反超氦核的测量<sup>[18]</sup>。

在相对论重离子对撞机上获得的反超核、超核新结果是反物质研究领域的新数据，它对于理解夸克胶子等离子体新物质也有帮助。由于超核是由超子与核子组合生成，它能表征局域超子—核子的关联强度。理论研究发现，这种关联强度在夸克物质系统中将随着碰撞能量增加逐渐增强，而在强子气体中，关联强度随着能量增加却是一个平坦行为(如图 3 所示，理论计算详见参考文献[19, 20])。在相对论重离子对撞的能量扫描实验中，测量超氦核、氦 3 产额随碰撞能量的变化曲线将可以给出系统自由度(夸克物质或者强子气体)的信息。我们小组已经在国际会议上报告其初步实验结果，但由于统计量的不足，我们期待后续的工作<sup>[21]</sup>。另一个重要的测量是超氦核的寿命参数<sup>[19]</sup>。目前，我们已经收集到的超氦核信号是迄今为止最大的数据样本，这将有助于回答历史上争论很久的寿命问题。寿命参数和结

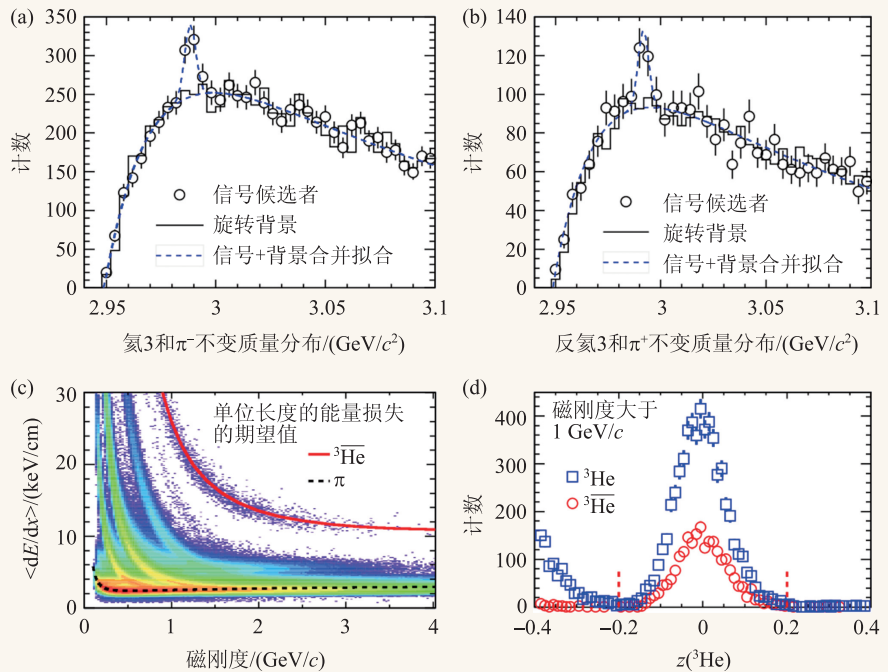


图 2 在上亿次实验事例中，通过( $^3\text{He}, \pi$ 介子)反应道重建超氦核的不变质量分布，其中(a)对应于超氦核的不变质量分布，(b)对应于反超氦核的不变质量分布；(c)时间投影探测器鉴别带电粒子优越的能力；(d)是(c)图时间投影探测器鉴别到的 $^3\text{He}$ 和反 $^3\text{He}$ 的一维投影图(图片引自文献[4])

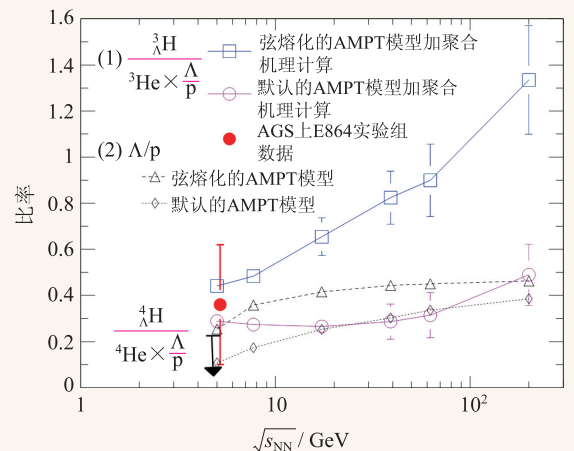


图 3 多相输运模型中的奇异性布居因子(即超氦核和氦 3 产额的比率)与每核子对质心系能量  $s_{NN}$  的关系曲线(图片引自文献[19]，图中  $\Lambda$  代表  $\Lambda$  超子， $p$  代表质子)

能紧密相关，不同的结果反映了超子和核子结合的紧密程度。例如，若超氦核寿命接近于自由  $\Lambda$  粒子的寿命，则其结构趋向于  $\Lambda$  粒子松散地漂浮在氦核外面；若寿命明显小于自由  $\Lambda$  粒子的寿命，则其结构趋向于超子与核子间有紧密的束缚<sup>[21]</sup>。

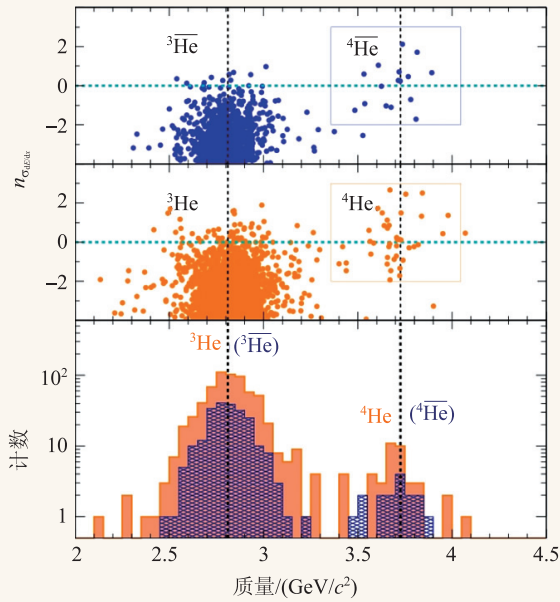


图4 上图和中间图是STAR时间投影室记录到的反氦3、反氦4及其正离子的能量损失信息。图中垂直虚线表示STAR飞行时间探测器测量到的质量参数，分别为2.81 GeV/c<sup>2</sup>和3.73 GeV/c<sup>2</sup>。把这些信息投影，得到下图所示结果。从图中可以看出，借助于时间投影室和飞行时间探测器，STAR实验组可以精确地鉴别反氦3和反氦4(图片引自文献[6])

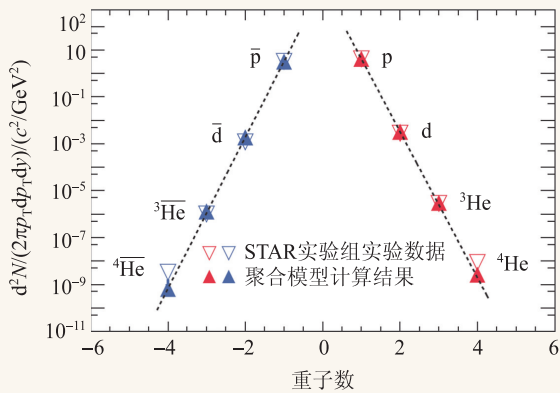


图5 STAR实验测得的(空心三角)和模型计算(实心三角)的正(反)轻核随着(反)重子数的变化关系。随着(反)核的(反)重子数每增加一个，其产额几乎按百万分之一的数量下降。图中的虚线代表指数拟合(图片引自文献[26])

### 3.2 反氦4实验测量

2011年，STAR实验组在寻找到质量数等于3的反超氦核的基础上，通过其主探测器中的时间投影室(TPC)和中国STAR合作组研制的桶形飞行时间探测器(ToF)，在采集到的接近10亿次金—

金核对撞产生的约5千亿个带电粒子中找到了18个反氦4原子核<sup>[6, 22]</sup>，如图4所示(图中纵坐标 $n_{\sigma_{dE/dx}}$ 是 $dE/dx$ 的 $\sigma$ 分布)。反氦4核是由两个反质子和两个反中子组成的稳定束缚态，带有两个单位的负电荷，质量约为质子质量的4倍。RHIC对撞机在2009年进行了升级，其亮度提高了约一个数量级，采集的数据量大大增加。STAR实验组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，图4的上面两个图块记录了时间投影室收集到的反氦3、反氦4及其正粒子样本。而飞行时间探测器ToF能够精确地测量粒子的质量参数，如图4底部的一维图所示。这个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员会、国家科技部、中国科学院的联合资助，是由STAR中国组研制完成的。美国能源部资助ToF探测器的电子学和探测器模块的集成。整个ToF系统的研制是从2006年开始，2009完成后安装在STAR探测器上的，它覆盖在桶形的TPC之外。这个ToF的硬件系统是在STAR中国组成员单位——中国科学技术大学和清华大学的实验室联合完成的，它由4032块多气隙电阻板室(MRPC)构成的120条ToF样条组成，具备卓越的时间分辨能力，从而具有很高的粒子鉴别能力。MRPC是一种具有优良的时间分辨性能的气体探测器，它造价便宜，可方便地设计出不同大小和不同形状的读出单元，已经成为高能物理实验中建造飞行时间探测器的主流技术。由于ToF具有卓越的时间分辨能力，从而具有高的质量分辨，因此在这次反氦4的鉴别过程中发挥了关键作用。另一方面，该发现还得益于STAR合作组发展的“高阶触发”技术，使得能够在海量的实验数据中实时挑选出含有反物质氦4的碰撞事例。在这个发现中，STAR上海组直接承担了实验数据分析工作，为反氦4的发现作出了重要贡献<sup>[22-25]</sup>。STAR实验组同时测量了反氦4在原子对撞中的产生率(如图5所示)，测量结果和夸克组合模型所预测的非常接近(夸克组合模型计算详见文献[26])。在上万亿度的高温快速扩散且存活不足万亿分之一秒

的物质中，能实验捕捉到由12个反夸克组成的一个复杂的反物质原子核是一件非常了不起的事情。反氦4的发现记录了人类探索大自然奥秘的进程。

反氦4可能是未来很长一段时间内实验室所能探测到的最重的反物质原子核，因为下一个更重的稳定反物质原子核产生的可能性是反氦4的百万分之一(如图5所示)。以现在的加速器技术几乎不可能实现。由诺贝尔奖获得者丁肇中先生领导的 $\alpha$ 磁谱仪二期(AMS-II)已在2011年5月发射升空，并已安装在国际空间站上去寻找宇宙的反物质，而STAR的这次测量结果将为AMS-II提供一个定量的反物质原子核的背景估计值。

### 3.3 高空宇宙射线反物质研究进展

在实验室研究的同时，通过测量高空宇宙射线也是科学家寻找反物质的主战场。例如，以日本科学家为主的BESS实验组把超导谱仪升到南极高空，测量宇宙线中反物质原子核通量。然而他们的高精度数据至今还没有看到任何反氦核或者更重的反原子核信号<sup>[27, 28]</sup>。

2011年升空的 $\alpha$ 磁谱仪二期也在近期发布了其高精度实验数据，尽管他们也未能观测到任何反氦核或者更重的反原子核信号，但证实了正电子通量在10 GeV之后出现反常增加(见图6)，引起了科学家极大的兴趣，出现了各种各样的解释<sup>[7]</sup>。因为在大爆炸理论框架下，宇宙产生初期时候生成的反物质瞬间就和普通物质同时湮灭。那么，现在在宇宙射线中观测到的正电子通量的反常增加，应该是有新的物理来源。有的科学家甚至认为它们可能来自于宇宙中无处不在的暗物质反应。AMS后续的数据分析给出了更精确的测量结果。

### 3.4 反氢原子捕获和CPT对称性检验

除了反物质原子核，科学家也开始尝试反物质原子的系列研究。欧洲核子中心的研究人员于2010年在实验室成功地实现了反氢原子捕捉172  $\mu$ s(见图7)，一年之后，他们把这个记录刷新到

1000 s<sup>[1-4]</sup>。反氢原子的成功捕获是实验技术的一大突破，而在物理上，科学家非常感兴趣的是通过反氢原子谱学性质来验证CPT不变原理。在CPT的框架下，物质和反物质的性质是一样的。氢原子的量子属性和精细结构测量精度已经非常好，通过反氢原子能谱的测量并和已有的氢原子的结果比较，任何差异都预示着新物理。来自该

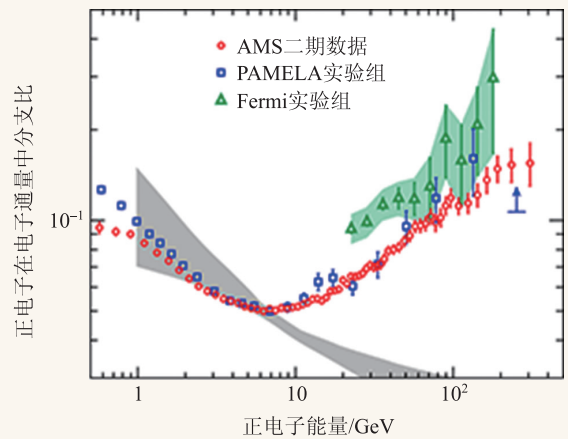


图6 实验上测量到的宇宙射线中正电子分数随着正电子能量的分布函数。从图中可以看出，10 GeV之后该分数呈单调增加趋势(图片引自文献[7])

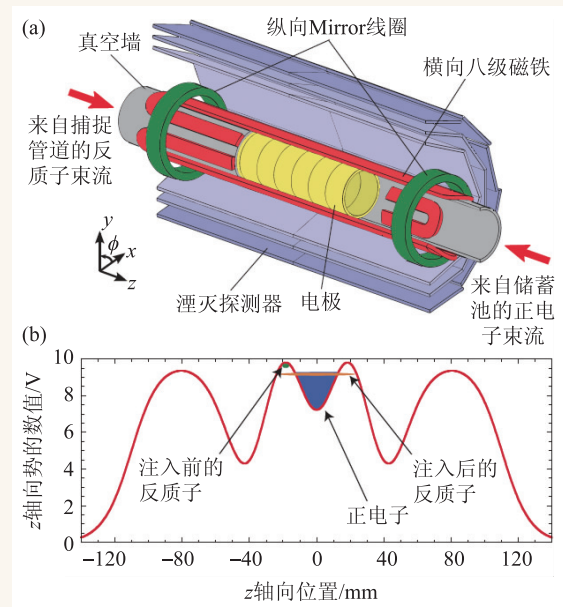


图7 (a)CERN-ALPHA实验组中心探测器结构示意图，它是反氢原子合成和捕捉的主要探测器元件图样，包括1T磁铁、模块化的反物质湮灭探测器、彭宁势阱电极等；(b)正电子—反质子混合势示意图，它是用于混合正电子和反质子的嵌套势阱。图中蓝色部分为混合区(图片引自文献[3])

实验室的最新结果体现在从实验上测量反轻原子的电荷和质量等参数,前者主要用于验证CPT不变原理,而后的出发点是验证等效原理。另外,对反氢原子的引力的精确测量也是检验基本物理学规律的重要实验。相应的结果请参阅文献[29—33]。

## 4 结束语与展望

反物质从概念提出到目前取得的系列进展,显示了这个领域巨大的潜力。一些先进的实验已经开始用反物质检验CPT原理的普适性和引力作用下的物质反物质的等效性原理等。在实际应用

方面,以现有的发展速度,我们不难想象,将来反物质的应用将不再局限于星际争霸等科幻小说中。反物质和物质在湮灭时会释放出巨大的能量,例如:1 g反物质存储的能量是90万亿焦耳,远远大于传统的汽油燃烧,比目前高效的核反应也要高出1千倍,将是未来宇宙飞船的理想动力燃料。当然,如何产生反物质是科学家必须解决的第一个问题,传统的实验室核—核反应效率低下,并不是一个有效和经济的途径。紧接的问题将是如何安全地储存反物质。总之,在反物质应用上,未来的路还很长很长。但对于基本物理对称性的检验,反物质的研究正逐渐发挥着重要的作用。

## 参考文献

- [1] Baur G *et al.* Phys. Lett. B, 1996, 368: 251
- [2] Blanford G *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 80: 3037
- [3] Amoretti M *et al.* Nature, 2002, 419: 456; Nature, 2010, 468: 673
- [4] Andresen G B *et al.* Nature Phys., 2011, 7: 558
- [5] Abelev B I *et al.* Science, 2010, 328: 58
- [6] Agakishiev H *et al.* Nature, 2011, 473: 353
- [7] Aguilar M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 141102; Phys. Rev. Lett., 2014, 113: 121101; Phys. Rev. Lett., 2014, 113: 121102
- [8] 郭奕玲, 沈慧君. 诺贝尔物理学奖一百年. 上海: 上海科学普及出版社, 2002. 8
- [9] Chao C Y. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 1930, 16: 431; Phys. Rev., 1930, 36: 1519
- [10] Dorfman D E, Eades J, Leerman L M *et al.* Phys. Rev. Lett., 1965, 14: 1003
- [11] Antipov M *et al.* Nucl. Phys., 1971, B31: 235
- [12] Van Gan-ghan, Van Tsu-dsen, Vekeler V I *et al.* Soviet Phys. JETP, 1960, 11: 1356
- [13] Button J, Enerhard P, Kalbfwisch G R *et al.* Phys. Rev. Lett., 1960, 4: 530
- [14] Lattimer J M, Prakash M. Science, 2004, 304: 536
- [15] Ahn J K, Ajimura S, Akikawa H *et al.* Phys. Rev. Lett., 2001, 87: 132504
- [16] Arsene I *et al.* Nucl. Phys. A, 2005, 757: 1; Back B B *et al.* Nucl. Phys. A, 2005, 757: 28; Adams J *et al.* Nucl. Phys. A, 2005, 757: 102; Adcox K *et al.* Nucl. Phys. A, 2005, 757: 184
- [17] Chen J H (for the STAR Collaboration). Nucl. Phys. A, 2010, 835: 117
- [18] Lea R (for the Alice Collaboration). Nucl. Phys. A, 2013, 914: 415
- [19] Zhang S *et al.* Phys. Lett. B, 2010, 684: 224
- [20] Andronic A *et al.* Phys. Lett. B, 2011, 697: 203
- [21] Zhu Y H (for the STAR Collaboration). Nucl. Phys. A, 2013, 904: 551; 中国科学院上海应用物理研究所博士论文, 2013
- [22] Xue L (for the STAR Collaboration). J. Phys. G., 2011, 38: 124072; 中国科学院上海应用物理研究所博士论文, 2012
- [23] Ma Y G, Chen J H, Xue L. Front. Phys., 2012, 7: 637
- [24] Ma Y G, Chen J H, Xue L *et al.* Nuclear Physics News, 2013, 23: 1, 10—14
- [25] Ma Y G. J. Phys.: Conf. Ser., 2013, 420: 012036; EPJ Web of Conferences, 2014, 66: 04020
- [26] Xue L, Ma Y G, Chen J H *et al.* Phys. Rev. C, 2012, 85: 064912
- [27] Fuke H, Maeno T, Abe K *et al.* Phys. Rev. Lett., 2005, 95: 081101
- [28] Abe K, Fuke H, Haino S. Phys. Rev. Lett., 2012, 108: 131301
- [29] Amole C, Ashkezari M D, Baquero-Ruiz M *et al.* Nature, 2012, 483: 439
- [30] The ALPHA Collaboration and Charman A E. Nature Commu., 2013, 4: 1785
- [31] Kuroda N, Ulmer S, Murtagh D J *et al.* Nature Commu., 2014, 5: 3089
- [32] Amole C, Ashkezari M D, Baquero-Ruiz M *et al.* Nature Commu., 2014, 5: 3955
- [33] Hamilton P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2014, 112: 121102