arXiv:2611.30238v1 [physics.ins-det] 23 Nov 2026

利用直线加速器驱动的缓冲气体阱结合碳化硅再慢化器实现 8.9×10^9 正电子的高速率积累

P Adrich[1],I Belosevic[2],M Chung[3], P Clad´e[4], P Comini[2], P Crivelli[5], P Debu[2],A Douillet[4,6], S Geffroy[7],S Guellati-Khelifa[4], P Guichard[8], P-A Hervieux[8], L Hilico[4,6],P Indelicato[4],S Jonsell[9],J-P Karr[4,6], B Kim[10], S Kim[11], E-S Kim[12], N Kuroda[13],B Lee[11†] , L Liszkay[2,*] , D Lunney[7], G Manfredi[8], B Mansouli´e[2], V Martimort[14],M Matusiak[1],S Niang[2],V Nesvizhevsky[15], F Nez[4], K Park[11], N Paul[4], E Perez[16],P P´erez[2,17],C Regenfus[5],C Roumegou[7], J-Y Rouss´e[2], Y Sacquin[2], F Schmidt-Kaler[18],K Szymczyk[1], T A Tanaka[13‡] , B Tuchming[2], B Vallage[2], D P vander Werf[17], D Won[11],S Wronka[1] 和P Yzombard[4] （GBAR合作组）

[1] 国家核研究中心（NCBJ），Andrzeja Soltana 街 7 号，05-400 奥特沃克，希维尔克，波兰[2] IRFU，法国原子能和替代能源委员会，巴黎-萨克雷大学，F-91191 吉夫叙尔伊维特，法国[3] 浦项科技大学（POSTECH），浦项，庆尚北道，Chungam-Ro77 Hyoja-Dong，Nam-Gu，浦项，Kyungbuk，37673，韩国[4] 卡斯特勒-布罗斯实验室，索邦大学，法国国家科学研究中心，巴黎文理研究大学高等师范学院，法兰西公学院，皮埃尔和玛丽·居里校区，Jussieu 广场 4 号，F-75005 巴黎，法国[5] 粒子物理与天体物理研究所，苏黎世联邦理工学院，8093 苏黎世，瑞士[6] 埃夫里-瓦尔德埃松大学，巴黎-萨克雷大学，Boulevard François Mitterand，F-91000 埃夫里，法国[7] 巴黎-萨克雷大学，法国国家科学研究中心/IN2P3，IJCLab，奥赛，法国[8] 斯特拉斯堡大学，法国国家科学研究中心，斯特拉斯堡材料物理与化学研究所，UMR 7504，F-67000 斯特拉斯堡，法国[9] 物理系，斯德哥尔摩大学，SE-10691 斯德哥尔摩，瑞典[10] 地下物理中心，基础科学研究院，Yuseong-daero 1689-gil 70 号，Yuseong-gu，大田 34047，韩国[11] 物理与天文学系，首尔国立大学，Gwanak-Ro 1 号，Gwanak-gu，首尔 08826，韩国[12] 加速器科学系，高丽大学世宗校区，世宗路 2511 号，0019 世宗，韩国[13] 物理研究所，东京大学，Komaba 3-8-1，Meguro，东京 153-8902，日本[14] 量子材料与现象实验室，巴黎西岱大学，法国国家科学研究中心 UMR 7162，75013 巴黎，法国[15] 马克斯·冯·劳厄-保罗·朗之万研究所（ILL），Martyrs 大道 71 号，F-38042 格勒诺布尔，法国[16] CERN，Esplanade des Particules 1，1217 梅兰，瑞士

[17] 斯旺西大学理工学院物理系，斯旺西 SA2 8PP，英国[18] QUANTUM，约翰内斯·古腾堡大学物理研究所，德国美因茨 D-55128

* 如需联系作者，请联系以下人员。

电子邮箱： laszlo.liszkay@cea.fr

关键词： 正电子束、带电粒子阱、电子直线加速器、半导体再慢化器、反氢

摘要

我们报告了在不到35分钟的时间内，在一台连接至GBAR基于电子直线加速器的正电子源的彭宁–马尔姆伯格阱中积累$(8.9 \pm 0.9) \times 10^9$ 正电子。据我们所知，这一数量是此前报道的最大俘获正电子数的两倍以上，且平均积累率达到 4.5×10^6 e^+/s，为此前的18倍。积累的正电子云旨在形成高密度正电子素靶，通过与CERN AD/ELENA设施提供的反质子进行电荷交换，产生千电子伏反氢束。该系统结合了低能电子直线加速器、经碳化硅再慢化器增强的改进型Surko型缓冲气体阱，以及作为正电子累积器运行的高场彭宁–马尔姆伯格阱。时间分辨的湮灭测量揭示了俘获与冷却动力学；与此同时，对一氧化碳$_2$ 和六氟化硫$_6$ 的比较表明，使用六氟化硫$_6$时，俘获信号在较低气体压力下便达到饱和。测量结果表明，

基于碳化硅再慢化器的俘获方案使俘获效率提高了一倍以上，与原始配置相比，正电子积累率提高了三倍以上。

†现地址：QUANTUM，约翰内斯·古腾堡美因茨大学物理研究所，D-55128 美因茨，德国
‡现地址：日本计量标准综合中心（NMIJ），日本产业技术综合研究所（AIST），日本茨城筑波市梅园1-1-1，邮编305-8568

1 引言

低能反物质实验通过检验CPT对称性，对粒子物理学标准模型进行高灵敏度测试，同时也为验证反物质的引力相互作用提供手段 [1]。CERN的反质子减速器和超低能反质子设施（AD/ELENA）在全球独一无二，可提供减速至100 keV的反质子束，并设有多个开展或筹备基本对称性精密测试的实验 [2]。ALPHA [3], ASACUSA [4], AEgIS [5], 和GBAR [6] 实验在AD/ELENA大厅中制备并研究反氢——由反质子和正电子构成的束缚态。在这些实验中，除GBAR外，制备反氢所需的低能正电子均通过成熟的慢化和积累技术从放射性^{22}钠-22源中获取；这项技术由Surko等人首创。 [7]。

GBAR 实验旨在通过测量反氢在地球引力场中的自由落体加速度，检验弱等效原理 [6]。ALPHA-g合作组近期的测量结果 [8] 表明，反氢的引力行为与普通物质相符，并排除了纯排斥性的引力相互作用，尽管实验不确定度仍然相对较大。在第一阶段，GBAR 旨在无电磁场环境中测定反氢的引力加速度，相对精度约为 1%；在后续阶段，预计将实现显著更高的精度。为实现这一目标，GBAR 计划制备反氢离子，并在光脱附和自由落体测量之前对其进行共振冷却。这些离子计划通过与高密度正电子素（Ps）云进行连续两次电荷交换反应来制备：

$$\bar{\mathrm{p}} + \mathrm{Ps} \rightarrow \overline{\mathrm{H}} + \mathrm{e}^{-}, \tag{1}$$

$$\overline{\mathrm{H}} + \mathrm{Ps} \rightarrow \overline{\mathrm{H}}^{+} + \mathrm{e}^{-}. \tag{2}$$

这里，$\bar{\mathrm{p}}$ 表示反质子，$\overline{\mathrm{H}}$ 表示反氢。GBAR 已成功验证了第一步反应生成 $\overline{\mathrm{H}}$ 的过程 [9]。通过这两步反应生成 $\overline{\mathrm{H}}^{+}$需要较高的正电子素密度，因此所需正电子数量远超传统 ^{22}Na 源实际能够提供的数量。为克服这一限制，GBAR合作组开发了一种基于低能（9 MeV）电子直线加速器[10]的高通量正电子源。在该装置的第一版中，正电子源产生的正电子经过慢化，在 Surko型缓冲气体阱中冷却，随后以 1.3×10^{6} e^{+}/s 的速率累积到彭宁–马尔姆伯格阱中，在 18 分钟内达到 14 亿个 [11]。本文所述装置是 GBAR正电子束线的改进版本。

与文献 [11] 中所述系统相比，主要改进在于采用了集成碳化硅（SiC）再慢化器的改进型缓冲气体阱构型。我们首次在 GBAR正电子束线中于 2021 [12, 13] 展示了这一方案，自2023年起，该方案已用于生产装置。随后，Michishio 等人 [14]也报道了类似方法。在新方案中，传统的氮气捕获阶段被替换为在单晶碳化硅（SiC）晶片中进行再慢化后的注入。这一改进 [15],以及对粒子向高场阱传输过程的优化，使积累率提高了约3.5倍，从（1.3 ± 0.2）$\times 10^{6}$ e^{+}/s提高到（4.5 ± 0.5）$\times 10^{6}$ e^{+}/s。这些结果表明，与传统的 Surko方案 [11, 16]相比，基于碳化硅再慢化器的缓冲气体阱更适用于基于直线加速器的正电子源。其原因可能在于，直线加速器束流的能量分布不太适合通过与氮分子碰撞进行俘获，尽管目前的实验证据尚不足以得出确定结论。类似装置还具有提供高质量正电子束的潜力，其能量分布较窄、束径较小 [17, 18, 19]，可用于深度分辨正电子湮没谱学 [20],中的表面研究、利用正电子开展的研究 [21]以及对正电子-气体相互作用的高分辨率研究 [22]。

本文介绍了改进后的正电子积累方案，该方案实现了（8.9 ± 0.9）$\times 10^{9}$ 个正电子的积累，是此前发表的最高值的两倍 [23],，积累率也提高了约 18 倍。GBAR正电子束线见第2 节，其主要组件的运行情况及相关结果则在第3节讨论。

2 实验装置

GBAR 实验整体布局的示意图及其主要组成部分的简要说明，见参考文献 [9]中的图 1 。这里的图示意了正电子束线。

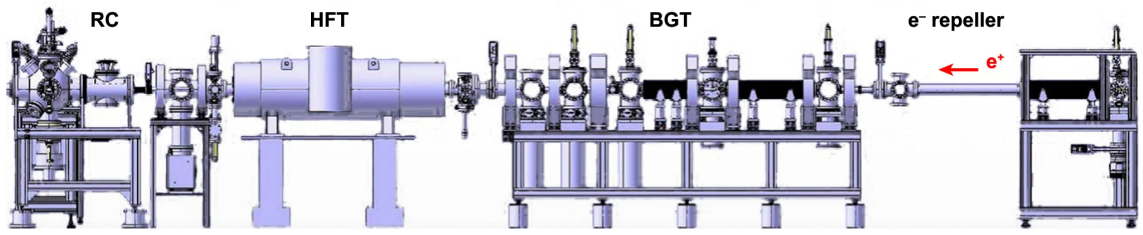


图1：GBAR 正电子输运线：正电子从直线加速器（右侧，未显示）到达，在缓冲气体阱（BGT）中冷却，在高场阱（HFT）中积累，然后送入反应室靶（RC）以产生正电子素。反质子束垂直于图面穿过反应室。

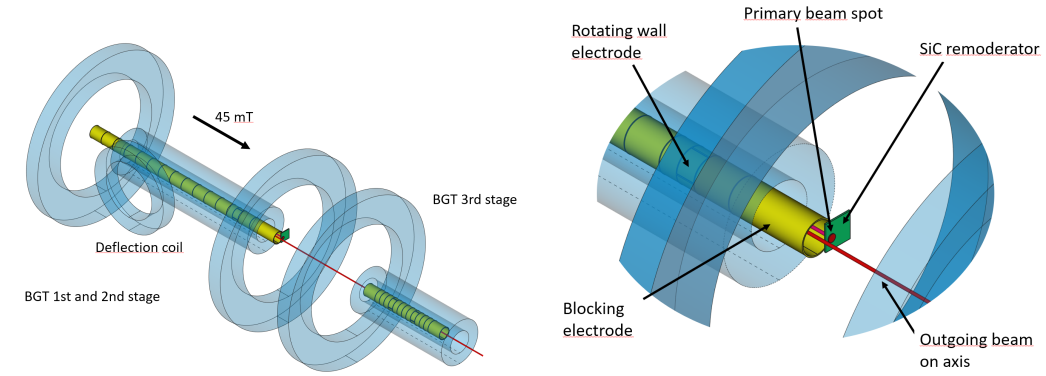


图2：（a）缓冲气体阱电极和线圈的示意图；（b）正电子再慢化器的放大图。（改编自参考文献 [15]。）

2.1 基于直线加速器的正电子源

正电子源采用紧凑型水冷直线加速器，电子能量为 9 MeV，峰值电流为 300 mA [10]。加速器以最高 300 Hz 的重复频率输出持续时间为 2.5 μs 的电子脉冲；日常运行时，频率限制为 200 Hz，以延长系统寿命。电子束轰击一块厚 1 mm 的水冷钨靶，韧致辐射光子在靶内及下游慢化体中产生电子-正电子对。

慢化体由约18层薄钨网组成（20 μm丝线厚度），在真空条件下，于独立腔室中通过焦耳加热在2400 ◦C以上的温度进行退火。发射出的正电子经引出，并利用带有中心孔径的接地引出电极加速至50–150 eV。在当前装置中施加随时间变化的聚束电势，使缓冲气体阱入口处的正电子脉冲宽度缩短至约1.5 μs。较短的正电子脉冲可减少返回再慢化器表面并湮灭的正电子比例。

正电子在 8 mT 轴向磁场的作用下，经由一条 7.5 m 长的束流线输运，穿过直线加速器的生物屏蔽，并经过两个 90° 弯道，以限制掩体外的辐射。来自靶区、与正电子一同输运的电子则由“电子排斥器”抑制；该装置是由位于掩体外的管状电极形成的 5 kV 静电势垒 [11]。

2.2 缓冲气体阱（*BGT*）

正电子被俘获在由缓冲气体阱的第一组电极构成的彭宁–马尔姆伯格阱中（图2（a））。此前在 [11] 中描述的电极组件已被重新设计，以优化其在基于碳化硅再慢化器的俘获方案中的运行。原先为氮缓冲气体俘获所需的内径较小的电极已被移除，并由直径较大的电极取代，同时加长了电极组的总长度。俘获段长 665 mm，由十一根长 50 mm 和一根长 105 mm 的电极组成，所有电极的内径均为 41 mm。其中一根电极分为四个方位扇区，通过施加相位偏移的正弦信号实现旋转壁压缩

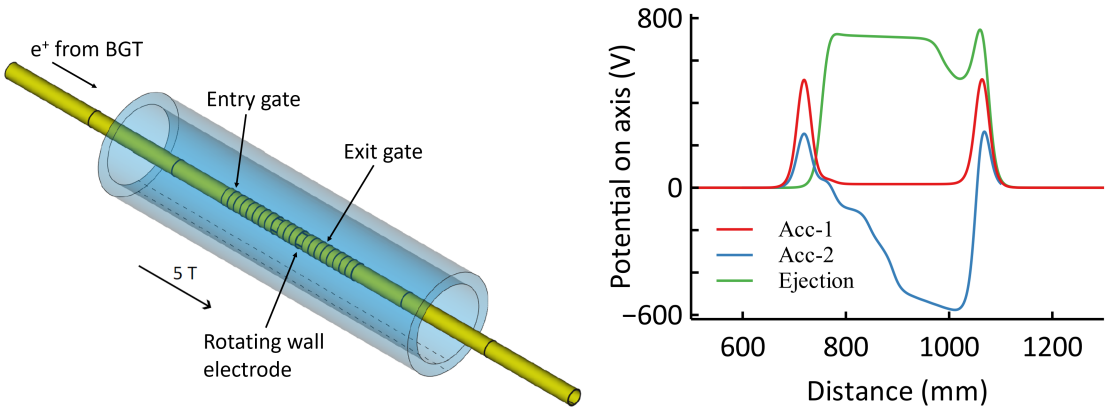


图3：（a）高场阱示意图。（b）积累 8.9×10^9 正电子过程中开始时（红色）和结束时（蓝色）的轴向势分布，以及射出前瞬间的轴向势分布（绿色）。

与直流偏置电容耦合。电极由快速高压放大器驱动，可提供最高达 ± 140 V [24] 的电势。阱的运行，包括俘获、冷却和射出，由基于 FPGA 的时序控制器控制，粒子提取则使用快速高压开关完成。二氧化碳用作冷却气体，并从电极堆的下游端注入，在上游形成约 4×10^{-6} mbar 的压力，在下游形成约1.6×10^{-4} mbar 的压力。

入射正电子束受到位于第一级囚禁阶段上游的偏转线圈所产生的磁偶极场偏转，从而射向捕获区下游的偏轴再慢化器；该再慢化器是一块 20 mm×20mm 的碳化硅板，位于捕获区下游（见图2（a））。它以反射模式工作，以超过 50 % 的效率重新发射低能正电子 [25]。再慢化器由一片 n 型氮掺杂 4H-SiC (0001) 单晶晶圆构成，电阻率为 16–28 mΩ·cm，并安装在线性位移台上。它可移至束流轴上，阻挡从第二级射出的正电子，从而测量俘获效率；也可移至轴外，使粒子能够传输至后续囚禁阶段。其偏压由与电极所用类型相同的放大器提供，并通过电容耦合将快速势调制施加至高频任意波形发生器。

缓冲气体阱的第三囚禁阶段由两个长 49 mm、十二个长 18.4 mm、内径为 41 mm 的电极组成，其中一个电极分为四个扇区，用于旋转壁压缩。该区域的一氧化碳$_2$ 压力约为 4×10^{-7} mbar。水冷螺线管沿电极组提供 45 mT 的轴向磁场。

2.3 高场阱（*HFT*）

高场阱由理化学研究所开发 [26], ，其实现的电子密度高达 10^{10} cm^{-3} 。之后，该阱经过改造，用于俘获来自萨克雷低能电子直线加速器测试平台的正电子[27, 28]。高场阱是一种在超导螺线管产生的 5 T 磁场中运行的彭宁–马尔姆伯格阱。电极组（图3（a））位于阱内长 500 mm 区段的中心，该处的磁场均匀性优于 10^{-3} （在半径 2 mm 范围内）。中央区段由长 23 mm 的圆柱形电极组成，其中包括两个沿长度方向均分、并分为四个扇区以进行旋转壁激励的电极。电极内表面涂覆胶体石墨，以抑制斑块电势效应。

囚禁与传输电势最高可达 2 kV，由高压放大器（Ultravolt HVA 系列，配有截止频率为 160 Hz 的 RC 滤波器）提供；快速推挽开关（Behlke）则可在阱入口和出口实现快速电势切换。电极组件安装在直径为 100 mm 的磁体孔内，并通过闭循环低温制冷机冷却至 12 K。磁体孔内的真空压力无法直接测量，估计约为 10^{-10} mbar。磁体孔冷却的活性炭颗粒可增强对残余氢气的抽除。

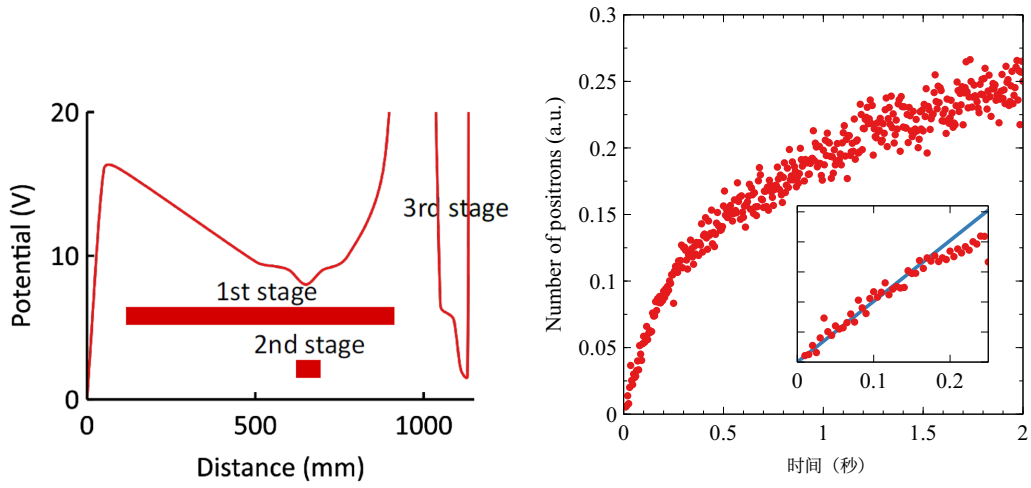


图 4：积累过程中缓冲气体阱轴线上的电势（a）以及缓冲气体阱第二级中正电子的积累情况（b）。插图显示了短期积累曲线，并根据 0.17 s 以内的数据点进行了线性拟合。（改编自文献 [15]。）

2.4 探测器

通过沿装置多个位置布置的碘化铯（CsI）闪烁探测器（耦合 PIN 光电二极管），监测湮没 γ 射线。通过独立测量正电子脉冲沉积到导电靶（即金属板或微通道板（MCP）探测器的前表面）上的电荷，对 CsI 探测器的响应进行校准。靶偏置为 $+100$ V，以抑制二次电子发射，否则这会使电荷测量失真。使用经校准的电荷灵敏前置放大器（FastComTec）测量每个正电子脉冲沉积的电荷，从而测得入射正电子的数量。随后将 CsI 探测器信号的幅度与测得的电荷相关联，以验证探测器响应的线性，并确定 CsI 信号与正电子数量之间的转换因子。

一个与快速光电倍增管耦合的塑料闪烁体置于距再慢化器约 500 mm 处，用于监测俘获和冷却过程中发生的正电子湮没。探测器信号由带宽为 500 MHz 的数字示波器（LeCroy）记录。对采集自 800 个直线加速器脉冲的波形进行分析，以确定连续 0.01 ms 时间段内检测到的湮灭事件数。由此可得正电子脉冲从直线加速器源到达后，湮灭率随时间的变化情况，进而得到俘获和冷却周期中正电子损失的时间变化。

使用配备荧光屏的微通道板探测器记录缓冲气体阱第二级下游及高场阱出口处的束流轮廓，并用CMOS相机成像。

3 实验结果与讨论

3.1 缓冲气体阱中的俘获与冷却

正电子撞击碳化硅再慢化器后，会沿反方向重新发射，其动能较低，由材料的正电子功函数 [25] 以及正电子脉冲到达时再慢化器与电极组末端之间施加的小电势差决定。为尽量减少正电子脉冲结束前经俘获势阱另一端反射后到达再慢化器的粒子数，需将再发射能量保持在较低水平。出于同样目的，通过向初级慢化器施加聚束电压来压缩正电子脉冲的时间宽度。在正电子脉冲之间，再慢化器偏置在较高电势，以防储存的粒子返回表面并湮灭。该电场不仅在慢化体处阻挡正电子，也在阱轴附近阻挡正电子，从而防止其在俘获序列第一级逃逸。

俘获后，正电子最初被限制在一个约 600 mm 长的势阱中，形成第一级囚禁阶段；在此期间，正电子与二氧化碳气体碰撞，迅速冷却。当它们的轴向能量降至约 1 eV 以下时，粒子便积累在一个

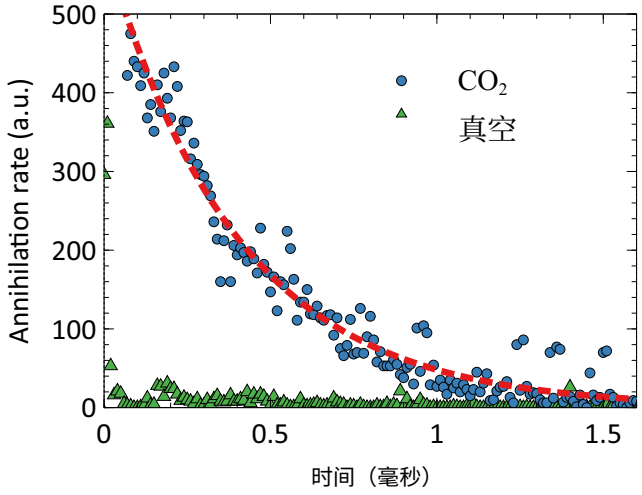


图5：使用快速闪烁探测器测得的缓冲气体阱前两个阶段的湮灭率，比较了有无二氧化碳缓冲气体的情况。低于 0.1 ms 的数值受到信号堆积的影响而失真。红色虚线表示衰减常数为 0.4 ms 的指数拟合。

同一阱中较短的下游区域，构成第二级。在该区域，持续施加频率为 0.5 MHz、幅度为 1.4 V 的旋转壁压缩pp；该区域紧邻出口势垒上游（图 4（a））。图 4（b）显示了第二级中积累的正电子数量随积累时间的变化。测量时，将收集到的粒子射出并送至再慢化器；本次实验中，再慢化器被移至阱轴线上。曲线显示，正电子积累可高效持续 300 ms 以上。

旋转壁驱动使正电子云位于陷阱轴线上，因此可将其转移至第三俘获级，而不会碰到位于离轴位置的再慢化器。Michishio 等人此前已使用带有中心孔径的再慢化器，证明了这种输运方式的可行性。 [14] 为提高缓冲气体阱前两个阶段的捕获效率，我们优化了关键运行参数，包括再慢化器的时序和波形、聚束电压、轴向捕获电势分布，以及注入的正电子脉冲数。

可利用快速探测器记录的湮灭信号，研究俘获和冷却过程中正电子损失随时间的变化（图 5）。在没有缓冲气体时，湮灭信号迅速降至接近零，这与未观察到可检测的正电子积累这一现象相符。有缓冲气体时，该信号反映了正电子在气体中或陷阱电极处湮没造成的损失，并在约 1.5 ms 内降至接近背景水平。这表明，存留下来的正电子在远短于直线加速器重复周期的时间尺度内积累于第二级。在更高直线加速器重复频率下进行的测量未发现可测量的损失，证实二氧化碳冷却足以在连续注入之间降低正电子能量，从而使其能够受限于第二级相对较浅的势阱。同时，正电子在该区域的寿命足够长，因此可在数百毫秒内积累而不会出现显著损失（见图4(b)）。选择二氧化碳作为冷却气体，是因为它不易燃且对环境无害。研究表明，甲烷提供的正电子冷却时间与二氧化碳相当 [14] ，因此预计它在当前系统中也能实现类似性能。我们还比较了使用 SF_6 （图 6）时的捕获和冷却效率，发现使用 SF_6时，俘获信号在较低气体压力下便达到饱和。这一现象与测得的 SF_6 正电子冷却时间不足甲烷和二氧化碳中冷却时间的三分之一这一事实相符 [29]。

虽然原则上可以将正电子从第二捕获阶段直接转移到高场阱（即绕过第三阶段），但在射出前，需要在冷却气体中对正电子云进行额外操控。由于此类操控所需的时间

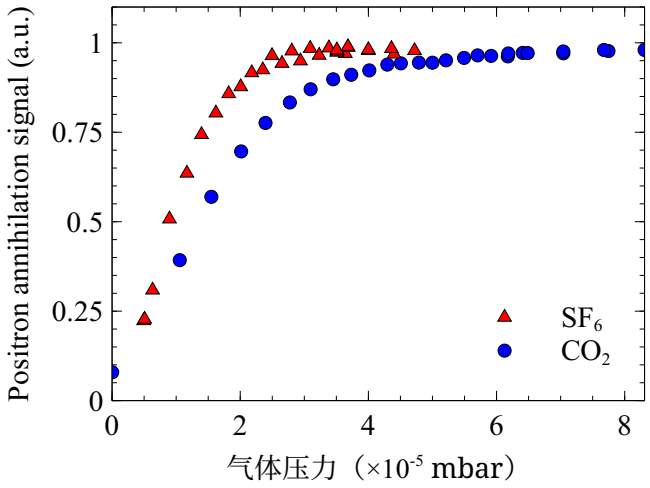


图6：采用二氧化碳和六氟化硫时，第二级结束时缓冲气体阱中的囚禁情况随气体压力的变化。将粒子射出至作为靶的再慢化器后，记录湮灭信号。计算时已考虑电离真空计的气体校正因子（一氧化碳$_2$ 和六氟化硫$_6$, 分别为1.42和2.50）。两条曲线已归一化至相同的积分湮灭信号。

超过了直线加速器重复周期，因此会降低累积占空比。出于这一原因，保留了原缓冲气体阱配置中的第三阶段。在此阶段，正电子在较低压强的气体环境中（约 4×10^{-7}mbar）进一步冷却，同时利用旋转壁驱动（4.5 MHz，10 V_{PP}）进行径向压缩。

在第三阶段准备正电子束团期间，前两个阶段同时进行积累，从而最大限度地减少云团操控造成的死时间。使用单个囚禁束团也简化了第三阶段的运行，并改善了对所生成正电子云的控制。经确定，最佳累积时长为125 ms，可兼顾储存效率和向高场阱的有效转移。通过比较单个直线加速器脉冲产生的湮灭信号与累积后射出的正电子脉冲产生的湮灭信号，得出前两个囚禁阶段的综合效率；测量时，碳化硅再慢化器移至束流轴上，并保持在−100 V电势。该效率约为27%；根据两个阶段之间抽气限制孔处的湮灭信号估算，第二级与第三级之间的输运效率约为85%。第三级的囚禁、压缩和射出均未出现可测量的损失。总体而言，与原始Surko阱配置相比，采用碳化硅再慢化器可使效率提高一倍以上 [11]，前提是使用基于直线加速器的正电子源。

3.2 高场阱中的堆叠

升高整个势阱后，正电子从缓冲气体阱的第三阶段引出，并以 43 eV 的动能传输约 2 m，进入高场阱的俘获势（如图所示。3(b)），由快速高压开关驱动的闸门电极短暂打开，以接收每个到达的正电子脉冲，随后关闭以防止粒子损失。位于闸门下游的第二个电极偏置为较低电势，以约束已储存在阱中的粒子。

在初始注入阶段，正电子仅通过辐射（回旋冷却）进行冷却；在 5 T 磁场中，其特征时间常数约为 160 ms。随着积累的进行，储存的冷等离子体会促进后续注入粒子的冷却。为应对不断增大的等离子体空间电荷势，并限制序列开始时注入相关加速，俘获势的深度逐步增加。在积累了足够数量的脉冲后，调节电极电压，使势阱底部升高至 500 V，并压缩等离子体。随后，通过将闸门电极快速切换至接地电势，释放正电子云，并利用脉冲式漂移管将其加速至 4 keV。高场阱的运行方式与文献 Ref. [11]，中所述的类似，但

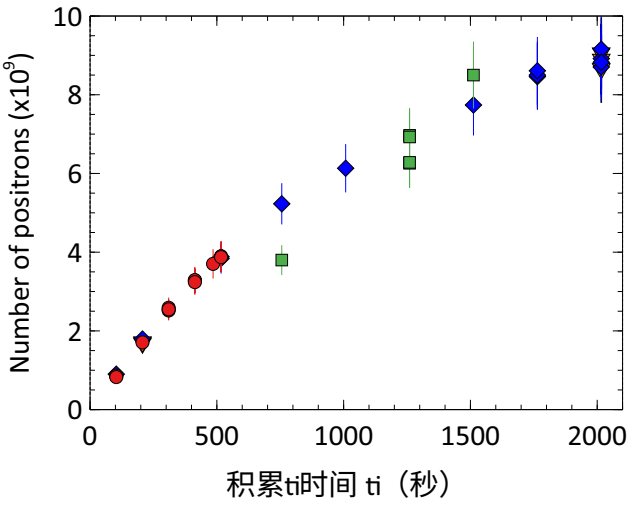


图7：高场阱中积累的正电子数量随时间的变化。不同符号表示在不同时间进行的各组测量。

电势和时序针对新的配置进行了优化。

3.3 创纪录的正电子积累
图中显示了正电子数量（根据装置周围经校准的闪烁体测得）随积累时间的变化。7。正电子绝对数量的不确定度主要来自碘化铯闪烁体相对于电荷灵敏前置放大器测量结果的校准，以及湮灭几何构型可能发生的变化。总系统不确定度估计为 10%。被捕获的正电子数量几乎线性增加，直至接近 4×10^9。此后，积累率有所下降，但粒子数量仍继续增加，直至 $8.9 \pm 0.9 \times 10^9$。最长积累时间为 2000 s 的测量在两个不同日期重复进行了七次，所得正电子数量的标准差为 0.15×10^9 。试图捕获更多正电子会导致几乎完全损失。用于收集最多正电子的势阱深度接近 600 V，估计正电子等离子体长度约为 300 mm。我们在约 35 分钟内积累了8.9×10^9 个正电子，这在数量和积累率方面均显著高于 ATRAP 报告的纪录值（4×10^9 在 4.5 小时内 [23]）。

与此前采用的传统 Surko型构型相比，加入碳化硅再慢化器显著提升了高场阱中的积累率。其积累率约为 GBAR正电子束线原始构型的 3.5 倍；原始构型在 1100 s 内积累了 1.4×10^9 个正电子 [11]。在 ELENA反质子提取与冷却周期（通常为 115 s）内，最多可积累 6×10^8个正电子，其中包括旋转壁压缩所需的时间；旋转壁压缩通常以 6 MHz 的频率和 7.6 V 的振幅进行pp。

4 总结
我们已在GBAR高场彭宁–马尔姆伯格阱中实现了$(8.9 \pm 0.9) \times 10^9$ 个正电子的积累，所用装置为基于直线加速器的正电子源，耦合配备可移动碳化硅再慢化器的缓冲气体阱。改进后的缓冲气体阱构型能够高效俘获并冷却脉冲正电子束，效率是此前Surko型构型的两倍以上。在标称运行条件下，单个ELENA周期内可积累超过$(6 \pm 0.6) \times 10^8$ 个正电子。延长积累序列后，可在不到35分钟内积累多达$(8.9 \pm 0.9) \times 10^9$ 个正电子，对应的平均积累率约为$(4.5 \pm 0.5) \times 10^6$ e^+/s。这一结果超过了此前报道的俘获正电子数上限 4×10^9 个正电子 [23], ；此前这一数量的积累耗时4.5小时。进一步改善这些正电子云的输运，将有助于提升正电子素产生，并支持未来合成反氢离子。所展示的俘获方案也可能适用于其他需要强脉冲低能正电子束的实验。

5 致谢

本研究作为一项由波兰教育与科学部长根据合同编号2022/WK/11共同资助的项目的一部分开展。本研究获得以下资助：JSPS KAKENHI A类科学研究资助金20H00150及促进联合国际研究A类20KK0305（日本）；SPHINX ANR-22-CE31-0019-01及ANTION ANR-14-CE33-0008（法国）；国家引力、相对论、天文学与计量学计划（PNGRAM）；法国国家科学研究中心物理研究所及原子核与粒子研究所（法国）；瑞士国家科学基金会（瑞士）资助项目197346、232699和216673，以及苏黎世联邦理工学院（瑞士）资助项目ETH-46 17-1；瑞典研究理事会（VR）资助项目2017-03822和2021-04005；以及韩国的以下资助：IBSR016-Y1、IBS-R016-D1、蔚山科学技术院UBSI研究基金（编号1.220116.01）、NRF-2016R1A5A1013277、NRF- RS-2022-00143178、NRF2021R1A2C3010989和NRF-2016R1A6A3A11932936。GBAR合作组是一个由法国国家科学研究中心支持的国际研究网络。

参考文献

[1] Charlton M, Eriksson S and Shore G M 2020 反氢与基础物理学（施普林格）（doi: 10.1007/978-3-030-51713-7）[2] Bartmann W, Belochitskii P, Breuker H, Butin F, Carli C, Eriksson T, Oelert W, Ostojic R, Pasinelli S and Tranquille G 2018 ELENA设施《Phil. Trans. R. Soc. A》376 20170266（doi: 10.1098/rsta.2017.0266）[3] Akbari R et al. 2025 ALPHA-2装置——助力囚禁反氢实验《核仪器与方法物理研究A辑》1072 170194（doi: 10.1016/j.nima.2024.170194）[4] Imao H et al. 2010 用于反氢合成的正电子积累与操控《物理学杂志：会议系列》225 012018（doi: 10.1088/1742-6596/225/1/012018）[5] Kellerbauer A et al. 2008 利用反氢束进行反物质引力测量的提议《核仪器与方法物理研究B辑》266 351–356（doi: 10.1016/j.nimb.2007.12.010）[6] P´erez P et al. 2015 GBAR反物质引力实验《超精细相互作用》233 21–27（doi: 10.1007/s10751-015-1154-8）[7] Surko C M, Leventhal M and Passner A 1989 实验室中的正电子等离子体《Phys. Rev. Lett.》62 901–904（doi: 10.1103/PhysRevLett.62.901）[8] Anderson E K et al. 2023 观测引力对反物质运动的影响《Nature》621 716–722（doi: 10.1038/s41586-023-06527-1）[9] Adrich P et al. 2023 通过正电子素云利用6 keV反质子产生反氢原子《Eur. Phys. J. C》83 1004（doi: 10.1140/epjc/s10052-023-12137-y）[10] Charlton M et al. 2021 用于GBAR 实验的9 MeV电子直线加速器正电子产生《核仪器与方法物理研究A辑》985 164657（doi: 10.1016/j.nima.2020.164657）[11] Blumer P et al. 2022 GBAR 实验中的正电子积累《Nucl. Instrum. Metho

ds

物理学研究 ***A*1040** 167263（doi：10.1016/j.nima.2022.167263）[12] Liszkay L 2021 使用碳化硅再慢化器在基于直线加速器的正电子源中实现高效正电子俘获 第12.5届正电子与正电子素化学国际研讨会（在线）URL https://ppc12.5.umcs.pl/wp-content/uploads/2021/04/006_C_Liszkay_Abstract.pdf[13] BlumerP等。 2022年 AD-7/GBAR 状态报告，提交给2022年 CERN SPSC URL https://cds.cern.ch/record/2799214/files/SPSC-SR-302.pdf[14] Michishio K、Higaki H、Ishida A 和 Oshima N 2022 使用中心孔碳化硅再减速器实现高效正电子俘获与提取

on

配备中心孔碳化硅再减速器新物理学杂志**24** 123039（doi：10.1088/1367-2630/acacbc ）

a

[15] Liszkay L 等2025 GBAR 实验最新消息：正电子积累得到改善
带碳化硅再慢化器的缓冲气体阱《物理学杂志：会议系列》**3149** 012002（doi: 10.1088/1742-6596/3149/1/012002）

[16] Higaki H、Michishio K、Hashidate K、Ishida A 和 Oshima N 2020 在缓冲气体阱中积累基于直线加速器的低能正电子《应用物理快报》**13**066003（doi：10.35848/1882-0786/ab939f）
[17] Weber T R、Danielson J R 和 Surko C M 2008 产生精细聚焦粒子束

m

单组分等离子体*Phys. Plasmas* **15**012106 (doi: 10.1063/1.2817967)[18] Natisin M R, Danielson J R and Surko C M 2015 基于缓冲气体阱的正电子束的形成*Phys. Plasmas* **22** 033501 (doi: 10.1063/1.4913354)[19] Natisin M R, Danielson J R and Surko C M 2016 一种低温冷却的超高能量分辨率阱式正电子束 *Appl. Phys. Lett.* **108** 024102 (doi:10.1063/1.4939854)[20] Tuomisto F and Makkonen I 2013 利用正电子湮没进行半导体中的缺陷识别：实验与理论 《现代物理评论》**85** 1583–1631 (doi:10.1103/RevModPhys.85.1583)[21] Hugenschmidt C, L¨owe B, Mayer J, Piochacz C, Pikart P, Repper R, Stadlbauer M and Schreckenbach K 2008 前所未有强度的低能正电子束 *Nucl. Instrum.Methods Phys. Res. A***593** 616–618 (doi: 10.1016/j.nima.2008.05.038)

[22] Gribakin G F, Young J A and Surko C M 2010 正电子-分子相互作用：共振附着、湮没和束缚态《现代物理评论》**82** 2557–2607(doi:10.1103/RevModPhys.82.2557)

[23] Fitzakerley D W 等 2016 电子冷却积累 4×10^9 用于反氢原子制备和储存的正电子 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **49** 064001 (doi:10.1088/0953-4075/49/6/064001)

[24] NiangS 2021 ***GBAR*** 实验中正电子积累的优化及基于反物质的空间推进研究 巴黎-萨克雷大学博士论文´e 巴黎-萨克雷 URL`https://cds.cern.ch/record/2754035`

[25] Leite A M M, Debu P, P´erez P, Reymond J M, Sacquin Y, Vallage B 和 Liszkay L 2017 使用商用4H-SiC外延层实现高效正电子慢化 《物理学杂志：会议系列》**791**012005（doi: 10.1088/1742-6596/791/1/012005）

[26] Oshima N, Kojima T, Niigaki M, Mohri A, Komaki K, Iwai Y 和 Yamazaki Y 2003 面向超慢碰撞的冷态高电荷离子源开发 《核仪器与方法物理研究*B*辑》**205** 178–182 第11届高电荷离子物理国际会议（doi:10.1016/S0168-583X(02)01945-6）

[27] GrandemangeP2013 ***Pos´itron***束流的收集与积累，该束流由脉冲´式加速器产生，用于研究反´物´质引力´相互作用`博士论文，巴黎南大学´URL `https://theses.hal.science/tel-00936039`[28] Lunney D 等 2014 束流制备：研究静止反物质的引力行为（GBAR）《超精细相互作用》**229 1**（doi: 10.1007/s10751-014-1056-1）[29] Danielson J R, Dubin D H E, Greaves R G 和Surko C M 2015 利用正电子开展科学研究的等离子体与基于陷阱的技术 《现代物理评论》**87**247–306（doi:10.1103/RevModPhys.87.247）