0254-6124/2025/45(1)-0029-27 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LI Lin, WANG Bin, ZHOU Xiaoji, CHEN Xuzong, LI Tang, LIU Liang. Research on Ultracold Atom Physics in Microgravity (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(1): 29–55. CSTR:32142.14.cjss.2024–0174. DOI:10.11728/cjss2025.01.2024–0174

微重力环境下超冷原子物理研究*

李 琳[1] 汪 斌[1] 周小计[2]
陈徐宗[2] 李 唐[1] 刘 亮[1]

1(中国科学院上海光学精密机械研究所空天激光技术与系统部 上海 201800)

2(北京大学电子学院 北京 100871)

摘 要 中国空间站的发展和建成为微重力环境下超冷原子物理的研究及其应用提供了必要的实验条件. 2022 年 10 月 31 日, 中国科学院上海光学精密机械研究所联合北京大学研制的中国空间站超冷原子物理实验柜 (简称超冷柜) 搭载梦天实验舱进入中国空间站. 超冷柜的主要目标是在中国空间站建成以^{87}Rb 玻色–爱因斯坦凝聚 (Bose-Einstein Condensate, BEC) 为工作物质的超冷原子物理实验平台, 基于微重力环境优势利用两级交叉光束冷却 (Two-Stage Crossed Beams Cooling, TSCBC) 的实验方案获得皮–开尔文 (picoKelvin, pK) 量级的超冷原子, 在微重力环境下通过调控以及观察极低温超冷原子以发现新奇的物理现象. 本文介绍了 BEC 的实现和深度冷却实验方案, 以及微重力环境下超冷原子物理研究与应用领域所取得的一系列进展; 详细介绍了超冷柜的设计方案以及地面验证实验. 到目前为止, 超冷柜按照预期持续开展微重力环境下的超冷原子物理研究, 在轨连续运行时间超过 2 年, 取得了初步的实验结果, 实现了超冷柜作为微重力环境下超冷原子物理实验平台的主要目标.

关键词 玻色–爱因斯坦凝聚, 超冷原子, 中国空间站, 微重力环境

中图分类号 O4-33

Research on Ultracold Atom Physics in Microgravity

LI Lin[1] WANG Bin[1] ZHOU Xiaoji[2]
CHEN Xuzong[2] LI Tang[1] LIU Liang[1]

1(*Aerospace Laser Technology and System Department*, *Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shanghai* 201800)

2(*School of Electronics*, *Peking University*, *Beijing* 100871)

Abstract The China Space Station (CSS) provides an ideal experimental platform for researching and applying ultracold atoms in microgravity. On 31 October 2022, the Cold Atom Physics Research Rack (CAPR) was launched to the CSS together with the Mengtian lab module, designed by the Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics of the Chinese Academy of Sciences (SIOM) and Peking University. The main goal of the CAPR is to build an ultracold atomic physics experiment platform using ^{87}Rb Bose

* 中国载人航天工程空间应用系统项目资助

2024-11-28 收到原稿, 2025-01-17 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Einstein Condensate (BEC) in the CSS. In microgravity, ultracold atoms can be cooled to picokelvin (pK) *via* Two-Stage Crossed Beams Cooling (TSCBC), which is three orders of magnitude lower than on earth and can inspire the novel physical phenomena. The preparation of the BEC and the deep cooling are introduced in this paper, as well as a series of advancements in ultracold atoms in microgravity. The CAPR is an experimental platform that relies on evaporative cooling in a crossed optical dipole trap. Furthermore, the CAPR's design scheme and ground verification experiment are also introduced. So far, the CAPR has continued to conduct research on ultracold atoms in microgravity, with more than two years of uninterrupted operation in orbit. Up to now, preliminary experimental results have been achieved, realizing the primary purpose of the CAPR.

Key words Bose-Einstein condensate, Ultracold atom, China Space Station (CSS), Microgravity

0 引言

玻色–爱因斯坦凝聚, 由玻色和爱因斯坦于 1924 年[1,2] 提出, 该统计指出当达到非常低的有限温度时, 大量的原子会占据在体系的基态, 能够观察到明显的凝聚现象. 当原子的相空间密度足够高, 原子之间的物质波波长大于原子之间的平均距离时, 原子团会发生相变. 直到 1995 年, 人类首次基于^{87}Rb 碱金属原子实现了 BEC[3], 这是量子力学领域一个重要的里程碑, 改变了人类对于微观世界的认知和观察方式, 这一突破也使得 Cornell, Ketterle 和 Wieman 三位科学家获得了 2001 年诺贝尔物理学奖.

每一次新的物理现象的发现都得益于实验技术的革新, 制冷技术使得低温极限在实验上的一次次突破催生了很多新奇的物理现象, 除了 BEC, 还有超导、超流、费米简并气体等. 超低温物质的探索和制备一直是不断追求的目标, 这对于探索和观察量子力学统治的微观世界具有重要意义. 到目前为止, 主要的深度冷却实验方案包括脉冲冲击冷却、两级交叉光束冷却以及梯度场补偿等方案[4–6] .

微重力环境下, 超冷原子的制备、调控和探测不再受到重力的限制, 可以通过持续降低束缚势阱获得温度更低、密度更加稀薄的超冷原子, 可以构建新奇拓扑结构的势阱来研究新奇的物理现象, 可以在更长的时间尺度上来操控和探测超冷原子, 这对于量子精密测量、量子传感、多体物理以及量子力学的发展具有重要意义.

微重力环境下超冷原子物理的实验研究可以追溯到 1989 年, Steven 研究小组首次在实验上证实了原子喷泉这一想法的可行性[7], 研究基于喷泉实验技术所获得的更长的积分时间使得钠原子基态超精细能级劈裂的线宽仅有 2 Hz, 其分辨率达到了 ±10 mHz. 原子在微重力环境中不会在重力方向上快速掉落出与电磁场相互作用区域, 使得超冷原子与电磁场相互作用的时间可以长达百秒量级, 这一实验结果极大地促进了星载原子钟以及空间原子钟的发展[8–13].

相比于地面重力环境, 微重力环境同样为研究超冷原子及其应用提供了天然优势[14–22]. 首先, 在微重力环境下, 原子自由演化的时间不会受到重力的干扰, 原子操控和探测的时间可以从毫秒量级延长至秒量级, 这将极大地提高以超冷原子干涉实现的量子传感器的精度, 还会使毫米量级的宏观物质波的制备、操控和探测成为可能. 其次, 在微重力环境下不需要补偿重力就可以通过持续降低阱深和阱频率来获得温度更低、更加稀薄的超冷原子气体, 这对于突破极限低温以及观察超冷原子之间的动力学演化具有重要意义. 此外, 重力势在微重力环境下导致的弱束缚势阱的形变微乎其微, 可以实现地面环境无法实现的原子云拓扑结构, 基于此研究原子之间的相互作用将进一步加深人们对量子系综和多体相互作用的理解.

近 20 年来, 微重力环境下的超冷原子研究成为各个国家的超冷原子物理实验室争相抢占的科学前沿高地[23]. 到目前为止, 用于微重力环境超冷原子物理研究的平台主要包括落塔 (Drop Tower)、抛物线飞机 (Parabolic Flight)、探空火箭 (Sounding Rocket)、爱因斯坦电梯 (Einstein Elevator)、天宫二号 (Tiangong-2)、国际空间站 (International Space Station) 和中国空间站 (China Space Station). 基于这些微重力实验平台, 超冷原子物理研究及其应用取得

了一系列重要研究进展.

微重力环境下的超冷原子物理研究引起了极大关注. 一方面, 微重力环境下超冷原子物理研究具有天然优势; 另一方面, 中国空间站的建成为研究微重力环境下的超冷原子物理研究及其应用提供了理想的实验平台. 中国科学院上海光学精密机械研究所 (以下简称上海光机所) 联合北京大学研制超冷原子物理实验柜, 其主要目标是在中国空间站建成以^{87}Rb 玻色–爱因斯坦凝聚为工作物质的超冷原子物理实验平台, 基于微重力环境优势利用两级交叉光束冷却的实验方案获得 pK 量级的超冷原子, 在微重力环境下通过调控以及观察极低温超冷原子以观察新奇的物理现象, 开展前沿的基础物理研究, 推动量子精密测量以及量子传感的应用研究. 本文详细分析了超冷柜的设计方案以及地面验证实验. 2022 年 10 月 31 日, 超冷柜搭载梦天实验舱进入空间站. 到目前为止, 超冷柜在轨连续运行时间超过 2 年. 在轨运行期间, 在微重力环境下利用超冷柜开展了磁光阱、光学黏团、光阱蒸发冷却制备 BEC、深度冷却等实验, 且已经取得了初步的实验结果.

1　玻色–爱因斯坦凝聚以及深度冷却实验方案

1.1　玻色–爱因斯坦凝聚的实现

1970 年至今, 激光冷却原子实验技术的应用和发展极大地推动了基于超冷原子的量子精密测量、量子模拟的发展, 进一步加深了人类对于量子力学的理解. 激光冷却技术快速发展的一个重要成果是于 1995 年在实验上首次实现玻色–爱因斯坦凝聚. 到目前为止, 制备 BEC 的实验方案主要有三种: 第一种, 射频蒸发冷却实验方案; 第二种, 交叉光阱蒸发冷却实验方案; 第三种, 直接激光冷却实验方案. 用于 BEC 实现和调控的真空腔体主要为钛腔或者石英腔. 用于为超冷原子提供所需磁场的线圈主要分为两类: 一类是绕在真空腔体外围的线圈, 另一类是将线圈刻到原子芯片基板表面并内置于真空腔体中.

1995 年美国国家标准与技术实验室首次在磁阱中利用射频蒸发冷却的方式实现了玻色–爱因斯坦凝聚[3], 实验装置如图 1 所示[3]. 真空系统采用石英腔的方案, 所有的线圈和光学组件都安装在真空系统的外侧. 团队利用时间平均的轨道 (Time Orbiting Potential) 磁阱来构建三维紧密且呈现谐波形式的势阱, 并在磁阱中利用射频蒸发冷却的方式不断提高^{87}Rb 原子的相空间密度直到相变. 蒸发冷却过程中, 原子温度被冷却至 170 nK 时, 原子密度接近 2.5×10^{12} cm^{-3}, 原子开始相变, 原子团中心出现原子速度接近零的窄峰. 实验团队通过吸收成像技术观察到了量子气体独有的双模分布.

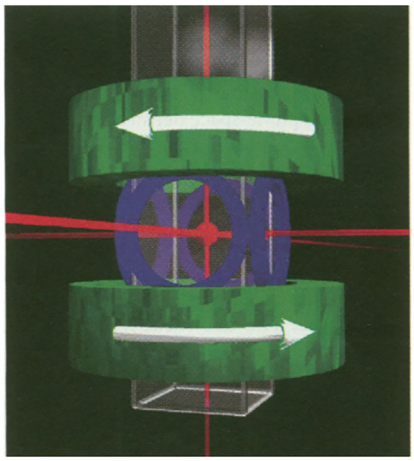

图 1　NIST 首次基于磁阱获得 BEC 的实验装置

Fig. 1　Apparatus of the NIST was the first to prepare Bose-Einstein condensation in the magnetic trap

2001 年 Chapman 等[24] 首次采用交叉光阱蒸发冷却的实验方案实现了^{87}Rb BEC, 交叉光阱蒸发冷却的实验方案如图 2 所示[24]. 相比于在磁阱中利用射频蒸发冷却的方案实现 BEC, 基于光阱蒸发冷却实现的 BEC 主要优势包括[25]: 第一, BEC 包含多个磁子能级上的原子, 可以同时研究多个自旋态的凝聚体特征; 第二, 更高的制备效率, 光阱的阱频率高达千赫兹, 可以在更短的时间内通过蒸发冷却实现 BEC; 第三, 更加简化的实验时序, 仅仅通过优化光阱蒸发冷却的路径就可以实现 BEC.

2001 年马普所利用微电子芯片实现的磁阱成功实现^{87}Rb BEC, 如图 3 所示[26], 这也是首次基于原子芯片实验装置成功制备 BEC. 原子芯片装置是将冷原子制备和调控过程中所需要的磁场全部依赖刻到芯片表面的导线产生. 相比于传统的磁阱, 原子芯片装置只需要很小的电流就可以在原子团中心产生大的磁场梯度和磁场强度, 而且光刻结构方案也使得复

杂构型的磁阱的实现更加容易. 该装置很大程度上降低了系统的功耗, 降低了实验装置的复杂性. 另外, Reichel 等[26–30] 通过优化制备 BEC 的位置可以将射频蒸发冷却制备 BEC 的时间缩短至 700 ms, 极大地缩减了蒸发冷却的时间, 降低了对于系统真空度的要求, 因此可以利用如图 3(a) 所示简化的真空系统来制备和研究 BEC.

蒸发冷却是实现 BEC 的主流实验方案, 但是蒸发冷却一般都伴随着较长的蒸发过程和大量的原子损失, 因此直接利用激光冷却提高原子的相空间密度制备 BEC 一直是重要的研究目标. 然而, 直接激光冷却过程中原子间距变短之后的光诱导损失, 以及原子团达到高的光学厚度之后的光子再吸收导致的加热都使得实验上直接利用激光冷却实现 BEC 成为挑战. 2018 年 Vuletié小组利用拉曼边带冷却的实验方案实现了 ^{87}Rb BEC[31], 如图 4 所示[31], 利用两路正交 1064 nm 激光构建二维光晶格, 利用 795 nm 激光作为冷却光, 在外加偏置磁场的环境中使得原子能够实现拉曼边带冷却. 将 2000 个原子装载到光晶格中通过拉曼边带冷却最终在 300 ms 内实现了 BEC, 凝聚体的原子数为 1400.

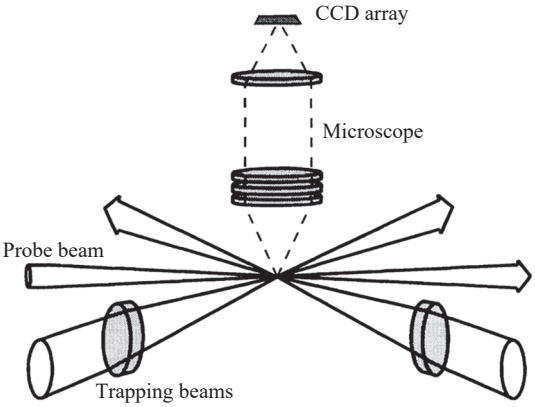

图 2 交叉光阱实验方案

Fig. 2 Schematic illustration of the crossed optical dipole trap

1.2 深度冷却方案

继 BEC 实现之后, 对于低温物质的探索从未停止. 1996 年 Ammann 和 Christensen 提出脉冲冲击冷却 (Delta Kick Cooling, DKC) 实验方案[4], 其冷却原理如图 5 所示[4]. 处于光阱或者磁阱中的原子经过预冷却后, 原子的动量分布呈现圆形, 如图 5(a) 所示; 经过一段时间的自由扩散, 动量越大的原子运动的距离越远, 动量越小的原子运动的距离越近, 因此原子的动量分布呈现图 5(b) 所示的椭圆形; 最终施加一个适当宽度的脉冲激光或者磁场, 使得外势场的冲量刚好抵消原子的动量, 因此原子的动量接近于零. 从动量空间来看, 原子全部落到动量为零的位置, 预期能够实现最佳冷却效果. DKC 通过损失原子的相空间密度可以实现 pK 量级的超冷原子, 不仅实验实现较为容易, 而且整个冷却过程持续时间为毫秒量级.

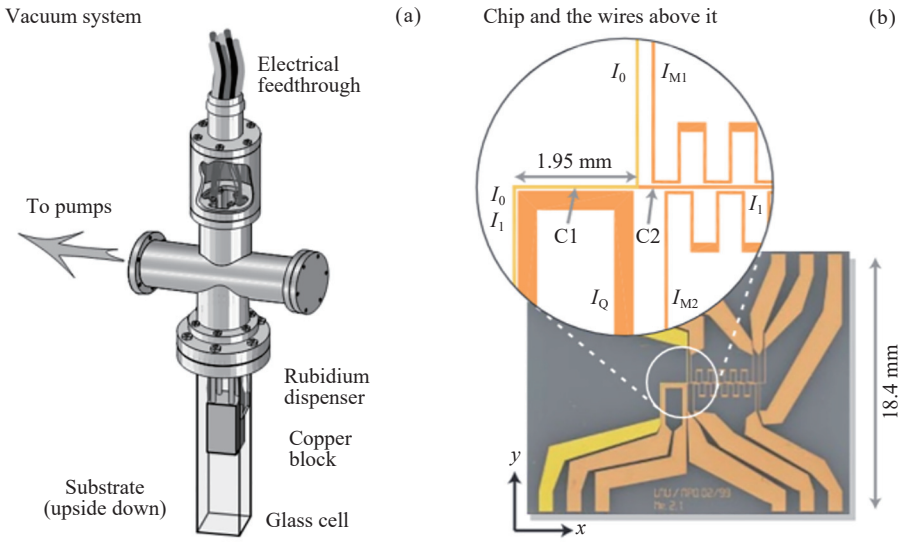

图 3 德国马普所实现 BEC 的原子芯片实验装置

Fig. 3 Atom chip setup of the Max-Planck Institute for preparing the BEC

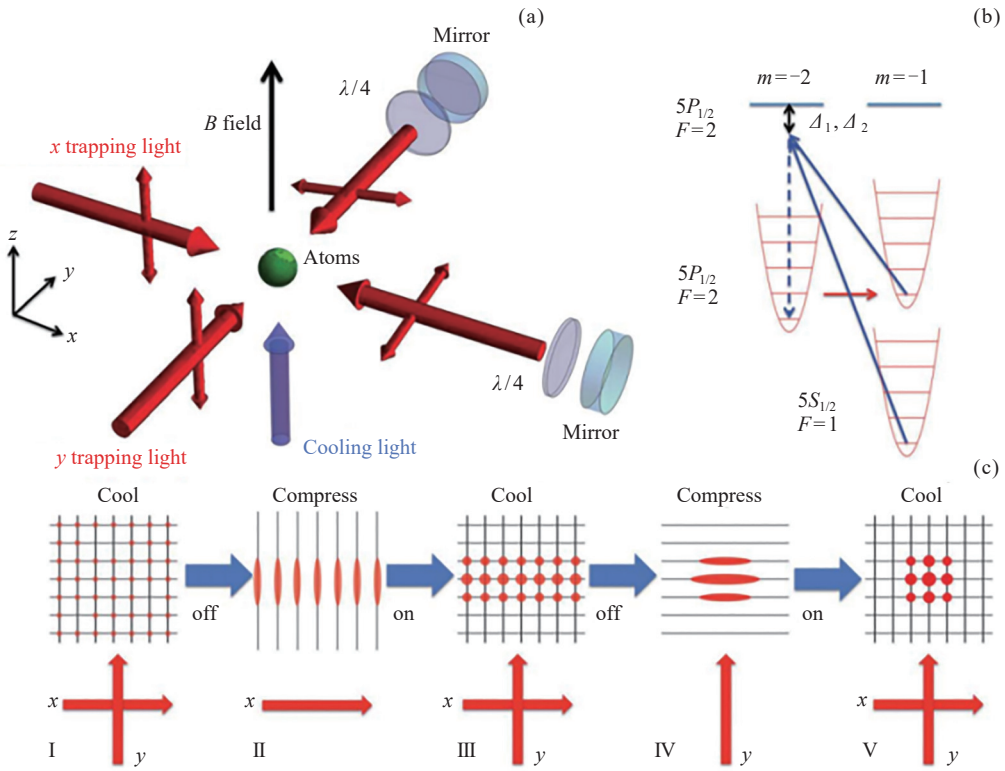

图 4　直接激光冷却制备 ^{87}Rb BEC 实验方案

Fig. 4　Experimental setup and procedure used to create the ^{87}Rb BEC by laser cooling

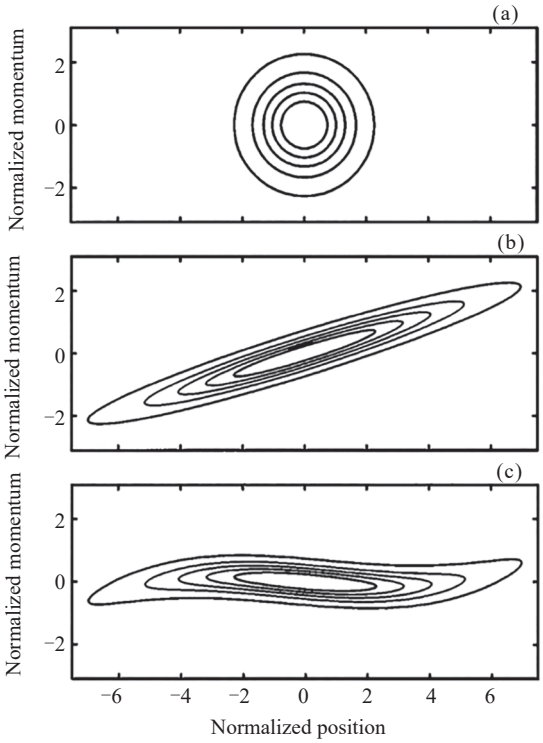

图 5　DKC 实验方案原理

Fig. 5　Schematic diagram of the Delta Kick Cooling (DKC)

2003 年 Ketterle 实验小组利用磁场来补偿重力, 抵消了重力势导致的势阱倾斜, 如图 6 所示[5]. 研究将阱频率降低至 $2\pi\times(1.12\pm0.08)$ Hz, 最终将 2500 个原子的温度冷却到 500 pK 以下, 获得了密度为 5×10^{10} cm^{-3} 的极稀薄超冷原子, 原子的寿命长达 80±5 s. 虽然实验上可以通过增加梯度场来进一步补偿重力, 但是实验上提供的梯度场在水平方向上存在的分量进一步限制了超冷原子温度的持续降低. 另外, 梯度场的噪声也会导致原子的加热或者激发. 这一实验结果极大地促进了微重力环境中超冷原子物理实验的发展.

利用直接蒸发冷却的方式制备极低温超冷原子所面临的一个问题是: 当原子的温度低于 nK 量级时, 单位时间内部的碰撞率会大大降低, 这将使得整个过程蒸发冷却需要更长的时间维持. 更长的蒸发冷却时间意味着更多的原子损失, 以至于整个有效蒸发冷却的过程不能正常持续. 2013 年北京大学陈徐宗团队提出两级交叉光束冷却的实验方案, 其原理如图 7 所示[6]. 实验过程中, 两个势阱深度的有序变化是有效冷却的关键. 两级交叉光束冷却实验方案的一般物理

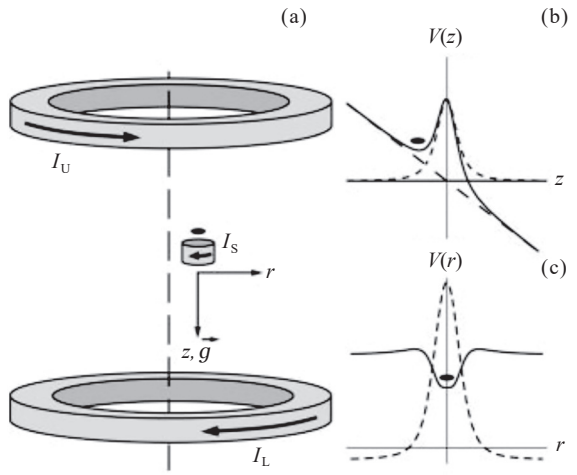

图 6 利用磁阱补偿重力的方案

Fig. 6 Schematic diagram of gravito-magnetic trap

过程主要分为三步. 第一步, 利用传统的交叉光阱来囚禁原子并在光阱里面做强迫蒸发冷却. 由于该光阱光束的束腰半径一般为几十微米, 该光阱在实验上被称为细腰光阱. 第二步, 绝热地引入第二级冷却过程. 当原子的温度降低至几十 nK 的时候, 实验上绝热地打开另外一对束腰尺寸更大的交叉光阱. 由于该光阱光束的束腰可以达到百微米量级或者毫米量级, 该光阱在实验上被称为粗腰光阱. 实验过程中, 绝热地打开粗腰光阱, 并将细腰光阱的功率逐渐降低至零, 细腰光阱中的原子将被绝热转移至粗腰光阱. 第三步, 逐步降低粗腰光阱的输出功率使得原子在阱中绝热释放. 通过蒙特卡罗模拟, 预期能够在微重力环境下实现温度接近 pK 量级的量子气体.

2 微重力环境下超冷原子物理研究进展

在真正的微重力环境中制备、探测和操控超冷原子一直是不断追求的目标. 近 20 年来, 伴随着高度集成的、高可靠性的、通用型的超冷原子物理实验系统和微重力环境模拟平台的发展, 微重力环境下超冷原子物理的研究和应用获得了极大的发展.

常规的冷原子操控、制备和探测过程都需要超高真空系统、激光系统、光学系统、磁场系统以及控制系统. 相比于地面实验室, 在微重力环境下开展冷原子实验对于冷原子实验系统的设计和实现提出了严苛的要求. 从科学目标层面分析, 分别在标准重力环境和微重力环境开展冷原子实验对于方案设计和地面实验验证提出了不同的要求. 从工程实现的角度出发, 冷原子实验系统的所有单机都需要满足载荷对于尺寸、重量和功耗的要求; 系统的所有单机都必须具备高可靠性, 能够承受系统在经受远距离运输以及发射过程中的冲击和振动. 另外, 在微重力环境下开展冷原子实验的真空系统需要经历长时间断电后能够迅速恢复超高真空环境.

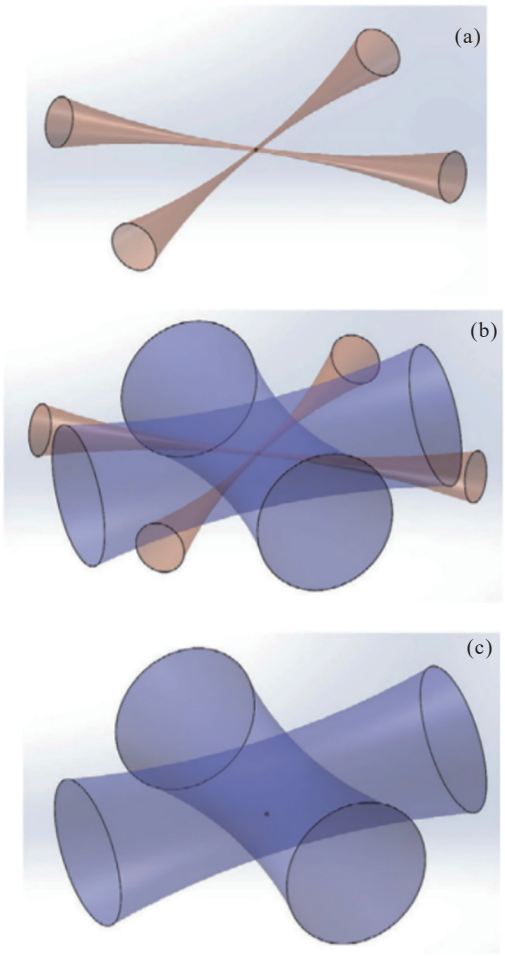

图 7 两级交叉光束冷却实验方案

Fig. 7 Two-stage crossed beams cooling

表 1 列举了国内外已经用于开展超冷原子研究及其应用的微重力环境实验平台, 以及中国发展的用于微重力科学研究的落塔实验装置. 1987 年德国不来梅大学就开始在地面筹建微重力环境模拟实验平台, 即落塔实验装置. 落塔高 146 m, 能够提供的自由下落的高度为 110 m, 要求载荷的重量不超过 300 kg, 载荷的体积不超过 1 m^3, 功耗不超过 625 W. 通过调节弹射器可以实现 4.7～9.4 s 的微重力时间, 实验过

表 1　微重力环境实验平台

Table 1　Experiment platform for microgravity

实验平台	微重力时间	微重力环境下工作时段(特征)	微重力水平/g
落塔 (Germany)	4.7 ～9.4 s	每天3次	10^{-5}
抛物线飞机	22 s	每次飞行提供90个周期	10^{-2}
探空火箭	6 min	单次飞行	10^{-5}
爱因斯坦电梯	0.4 s	每天300次	5×10^{-3}
落塔 (China)	3.5 s	每天2～4次	10^{-5}
自由落体设施	2.2 s	每天15次	10^{-3}
电磁弹射微重力实验装置	4 s	不少于每天50次	10^{-6}
天宫二号	连续	2016年9月15日至2019年7月16日	10^{-4}
国际空间站	连续	2018年5月21日至今	10^{-6}
中国空间站	连续	2022年10月31日至今	10^{-6}

程中的微重力水平为 $10^{-5}g$. 遗憾的是, 该落塔实验装置每天能够开展的实验次数不超过 3 次. 抛物线飞机每个飞行周期能够提供长达 22 s 的微重力时间, 每次飞行周期达到 90 次以上, 因此每次飞行能够提供的微重力时间超过 30 min, 抛物线飞机提供的微重力水平约 $10^{-2}g$. 探空火箭每次飞行能够提供 6 min 的微重力时间, 微重力水平约 $10^{-5}g$. 爱因斯坦电梯在每次下落过程中提供的微重力时间为 400 ms, 实验周期为 13.5 s, 微重力水平约 $5\times10^{-3}g$. 爱因斯坦电梯最大的优势是每天能够开展 300 多次实验, 每天能够提供的微重力时间累计长达 2 min. 迄今为止, 为了满足日益增长的在微重力环境下开展科学研究的需求, 除了德国的落塔实验装置和法国的爱因斯坦电梯, 美国、日本、印度、澳大利亚、中国[32–36] 等多个国家都在争相建设类似于落塔的微重力环境实验装置. 到目前为止, 中国建成的落塔装置主要有三个. 中国科学院力学研究所国家微重力实验室的落塔装置, 每次下落过程中提供的微重力时间为 3.5 s, 实验过程中的微重力水平为 $10^{-5}g$, 每天可以下落 2～4 次. 清华大学搭建的自由落体设施, 每次下落过程中提供的微重力时间为 2.2 s, 实验过程中的微重力水平为 $10^{-3}g$, 每天可以开展的实验次数可以达到 15 次. 中国科学院空间应用工程与技术中心的电磁弹射装置, 每次下落过程中提供的微重力时间为 4 s, 实验过程中的微重力水平为 $10^{-6}g$, 每天能够开展的实验次数可以达到 50 次. 另外, 天宫二号、国际空间站以及中国空间站为微重力环境下的超冷原子物理研究及其应用提供了长期的微重力环境.

2.1　地面模拟微重力环境实验平台

到目前为止, 在地面模拟微重力环境用于开展冷原子实验的平台主要有落塔、抛物线飞机、爱因斯坦电梯等. 基于这些微重力环境模拟平台开展实验需要相对较低的经济成本、较低的工程研制难度以及较短的工程研制周期, 这些优势吸引了大量的研究投入其中并在微重力环境下的超冷原子物理研究和应用方面取得了很多重要的成果. 这些实验平台为在基于低轨道的空间实验室开展超冷原子实验提供了更多优化和调整的机会, 为在空间环境中开展实验提供了更多的经验和参考, 是基于空间环境开展超冷原子研究及其应用的探路者.

近 20 年来, 随着微重力实验平台以及集成化超冷原子物理实验系统的发展, 微重力环境下的超冷原子研究及其应用进入了一个快速发展阶段, 取得了一系列激动人心的进展. 基于地面模拟微重力环境实验平台, 超冷原子研究及其应用所取得的一系列进展总结如下.

2.1.1　落塔 (Drop Tower)

2010 年首次在落塔提供的微重力环境下实现了 ^{87}Rb 玻色–爱因斯坦凝聚[37]. 该研究使用集成化的原子芯片装置开展实验, 装置如图 8 所示[37], 物理实验系统直径为 82 cm, 高度 215 cm, 全部重量不超过 150 kg, 体积小于 1 m^3, 最大功耗 625 W. 该研究能够在微重力环境下开展实验的最长时间为 9.4 s, 因此 BEC 制备过程中的磁光阱阶段是在标准重力环境

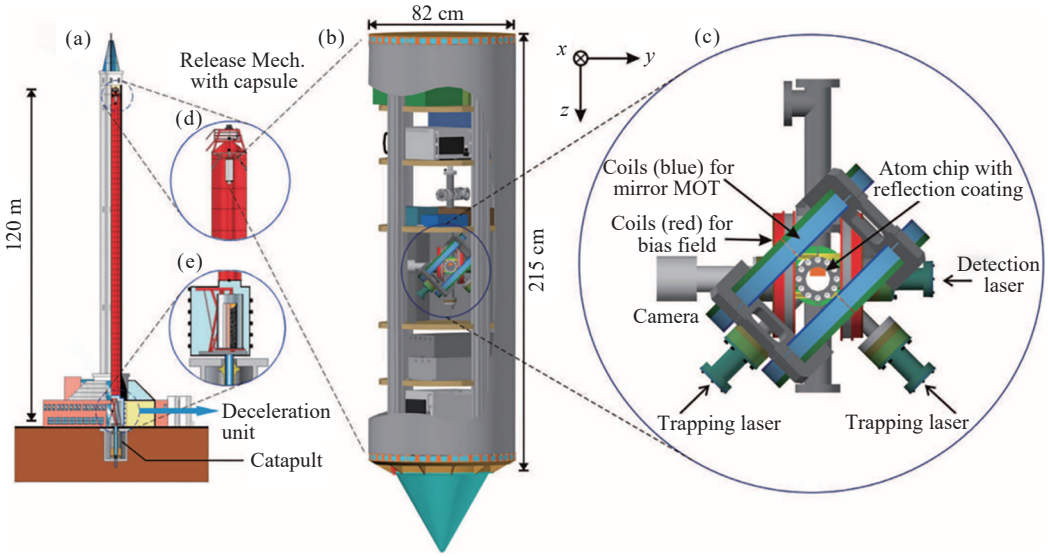

图 8 不来梅落塔 (ZARM drop tower) 以及 BEC 实验系统装置

Fig. 8 ZARM drop tower facility in Bremen and its apparatus for BEC

下完成的. 实验装置在自由落体 1 s 之后, 研究利用光学黏团进一步降低原子的温度并开始在磁阱对原子进行射频蒸发冷却并最终获得了位于 F=2, m_F=2 磁子能级上的 BEC, 原子数大于 10^4, 超冷原子的温度接近 9 nK. 该研究作为微重力环境下量子简并气体制备和操控的探路者, 首次基于集成化的超冷原子物理实验系统在微重力环境下观察到了 TOF 长达 1 s 的超冷原子信号, 实现了长度为 2 mm 的宏观物质波, 为微重力环境下量子简并气体的制备、探测、操控提供了宝贵的经验.

该实验结果发现 BEC 在自由演化的过程中, 短时间内的演化与理论相符, 但是在长时间演化的过程中, 处于 F=2, m_F=2 磁子能级上的 BEC 的膨胀将受到环境中不均匀微弱磁场的影响, 磁场梯度和曲率随时间的变化都将影响大时间尺度上 BEC 的膨胀. 研究发现, 一方面将原子转移到磁不敏态即 F=2, m_F=0 态, 将极大地降低背景剩余磁场对于实验结果的影响; 另一方面, 研究处于 F=2, m_F=2 磁子能级上的 BEC 长时间的自由演化可以作为一个灵敏度很高的弱场探测器.

2013 年研究在微重力环境下利用 BEC 演示了 Mach-Zehnder (M-Z) 干涉仪[38], 装置及原理图如图 9 所示[38]. 基于文献 [37] 研究在微重力环境下使用了 DKC 的冷却手段, 进一步将 ^{87}Rb BEC 的温度冷却到 1 nK, 降低了 BEC 的膨胀速度; 制备处于 F=2, m_F=0 磁子能级上的 BEC, 利用对于背景磁场不敏感的超冷原子开展干涉实验; 利用 Bragg 散射实现物质波的 M-Z 干涉仪, 即使超冷原子自由演化时间超过 0.5 s, 干涉仪的对比度依然高于 40%. 落塔提供的微重力演化时间长达 9.4 s, 理论预期该实验条件下原子干涉仪的短噪声限制分辨率将达到 5.5×10^{-12} m·s^{-2}. 与此同时, 研究发现两束 Bragg 光束功率的一致性以及激光相位的稳定性将进一步提高实验中干涉信号的对比度.

2020 年 Rasel 团队基于落塔提供的微重力环境尝试了光阱蒸发冷却制备 BEC 的实验[39], 但是保证光路指向的稳定性是一个巨大的挑战, 最终该团队在微重力环境中成功装载了大于 1×10^6 个冷原子至光阱中, 可惜并没有获得 BEC.

2.1.2 抛物线飞机 (Parabolic Flight)

抛物线飞机几乎是最早用于微重力环境下冷原子研究及其应用的微重力环境模拟实验平台. 1998 年 Salomon 小组首次基于抛物型飞机提供的 $10^{-2}g$ 的微重力环境开展了铯原子钟的研究工作, 获得了 7 Hz 的线宽, 并预言在更好的微重力环境下利用喷泉钟将获得优于 5×10^{-17} 的准确度[9]. 作为微重力环境下冷原子实验的早期工作, 为微重力环境下冷原子钟的发展奠定了重要的基础[40–44]. 2020 年, PHARAO 的飞行件已经在地面实验室完成了振动测试、热循环测试、电磁兼容测试, 且已经送往欧空局

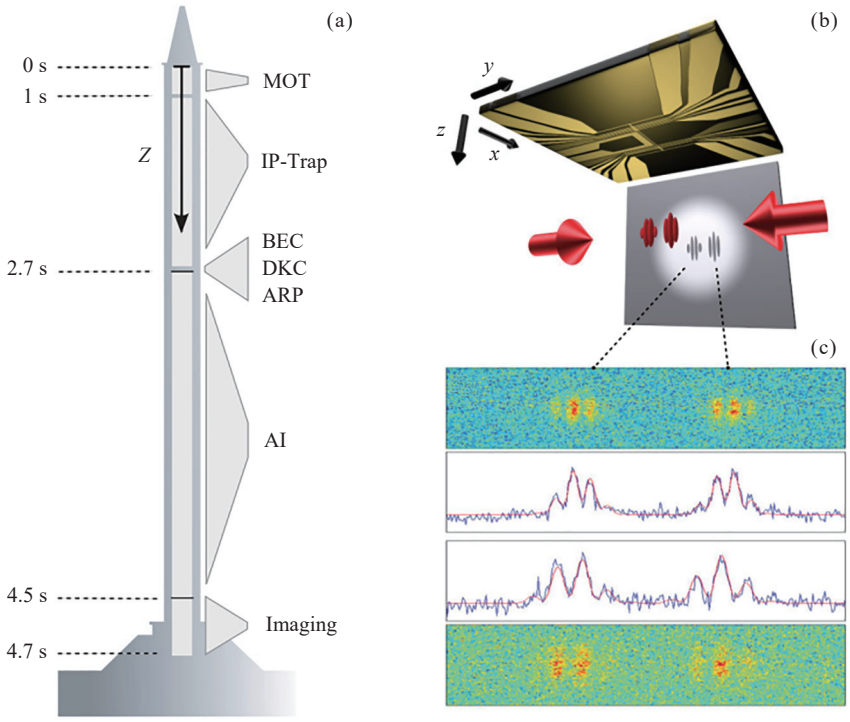

图 9　不来梅落塔 (ZARM drop tower) 以及 Mach-Zehnder 干涉仪装置

Fig. 9　ZARM drop tower and the Mach-Zehnder interferometry of a BEC

等待发射. 该原子钟在标准重力环境中获得的频率稳定度为 $3.0\times10^{-13}\ \tau^{-1/2}$, 准确度为 2.3×10^{-15}, 并预期微重力环境中能够获得优于 10^{-16} 的频率准确度, 但是到现在为止还没有看到更新的报道.

同期, 法国的 Bouyer 实验小组基于抛物线飞机提供的微重力环境利用原子的内态开展了一系列原子干涉的实验[45–50]. 2006 年研究团队初次报道了系统方案设计, 并指出拉曼光脉冲的相位噪声和抛物线飞机飞行过程中的加速度涨落是影响原子内态传感器的关键因素. 2009 年, 团队基于抛物线飞机提供的微重力环境以^{87}Rb 作为工作物质开展了光脉冲干涉实验并获得了 Ramsey 干涉条纹. 同时, 该文章预期基于卫星提供的超高微重力环境以及更低的振动加速度, 冷原子干涉仪用于测试加速度的灵敏度将比地面最优的加速度计高几个数量级, 且接近经过验证的空间加速度计.

2011 年 Bouyer 小组分别基于地面标准重力环境 ($1g$) 和微重力环境 ($0g$) 利用^{87}Rb 实现的物质波进行了加速度测试的实验. 重力水平为 $1g$ 时, 该加速度计能够检测到比飞机典型加速度弱 300 倍以上的惯性效应, 实验装置如图 10 所示[47]. 该干涉仪在飞行过程中的灵敏度为 3.0×10^{-4} m·s^{-2}·Hz$^{-1/2}$. 该工作是第一个测试水平方向的加速度的冷原子内态传感器.

2016 年 Bouyer 小组在抛物线飞机提供的微重力环境下利用^{87}Rb 原子和^{39}K 原子实现的双物质波内态传感器测试了 Eötvös 参数. 在标准重力环境和微重力环境测试的 Eötvös 参数的不确定度分别为 1.1×10^{-3} rad 和 3.0×10^{-4} rad. 在标准重力环境下, 由于对称限制导致的不确定度比在微重力环境中提高了接近 4. 该实验装置及其干涉方案如图 11 所示[48].

2016 年 Bouyer 小组再次在飞机上利用原子开展了两个方向的加速度测试. 在测试水平方向加速度的过程中, 当探寻时间为 3 ms, 信噪比为 3.1, 循环时间为 500 ms 时, 该干涉仪单次测量的灵敏度为 $2.3\times10^{-4}g$. 为了获得这一实验结果, 实验小组利用机械加速度计记录了反射镜的加速度, 并将这一结果与冷原子加速度计的响应函数卷积, 这一方法的准确度足以确定干涉的半条纹数. 在测试垂直轴加速度的过程中, 研究提出了在嘈杂条件下提高干涉条纹信噪比的方法, 使得探寻时间为 10 ms 时依然能够获得清晰的原子干涉条纹. 将传统重力仪具有大的动力学范围和连续测试优势与原子传感器所具有的高灵敏度和

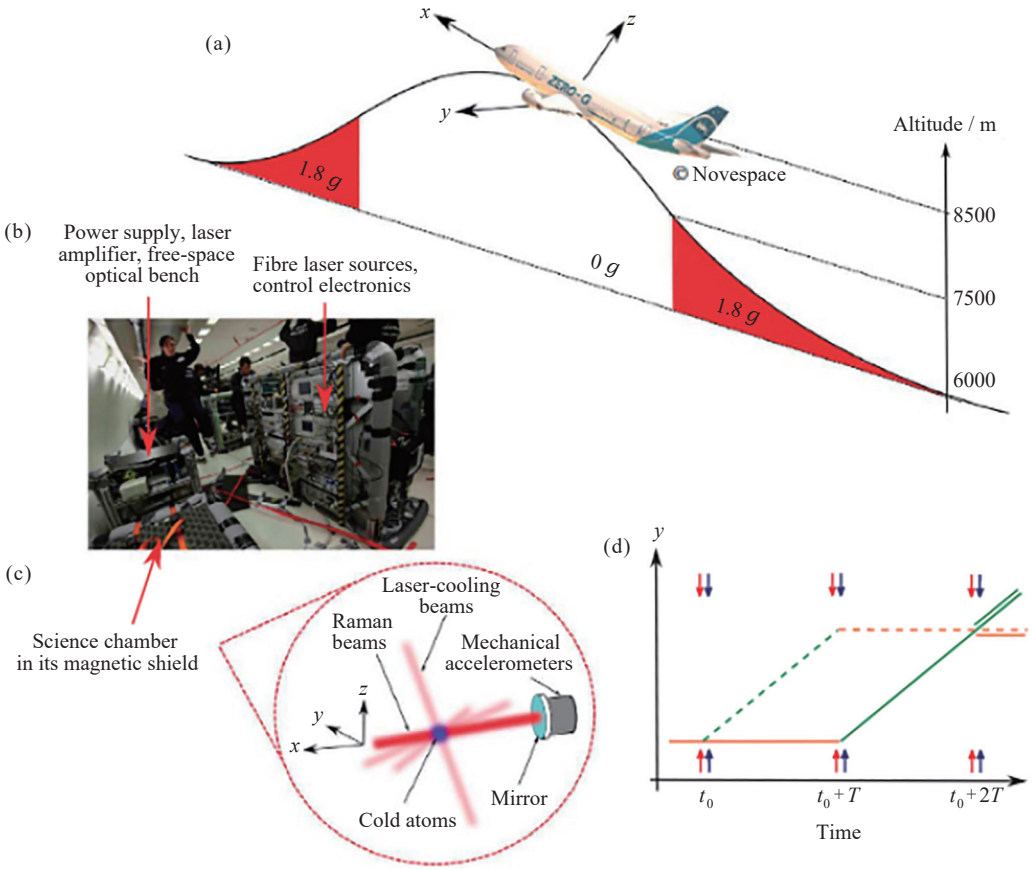

图 10 抛物线飞机的物质波干涉仪

Fig. 10 Matter-wave interferometry in the aircraft

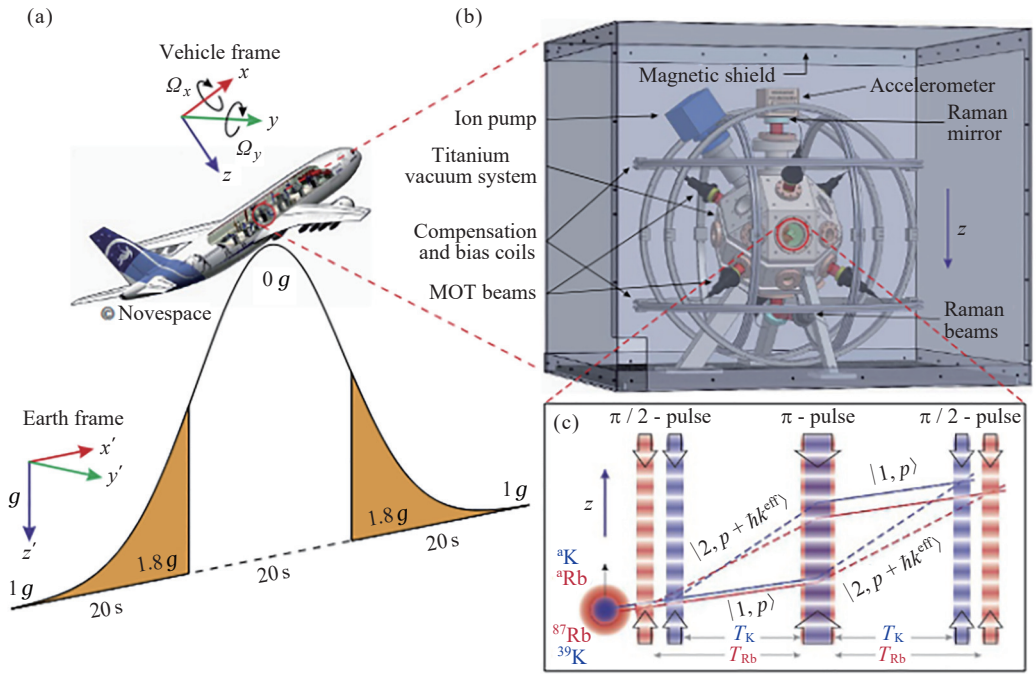

图 11 抛物线飞机的双物质波干涉仪

Fig. 11 Dual matter-wave interferometer onboard the Novespace Zero-G aircraft

长期稳定度特性集合起来的技术方案将更广泛地应用到惯性导航领域中, 用于测试三个维度的旋转以及加速度. 实验结果指出, 抛物线飞机的转动极大程度上限制了冷原子重力加速度计在 $0g$ 环境下的灵敏度, 这也是未来需要解决的问题.

2.1.3　爱因斯坦电梯 (Einstein Elevator)

2019 年 Bouyer 团队基于爱因斯坦电梯的运行模式开展了微重力环境下的超冷原子物理实验, 其装置以及运行时间如图 12 所示. 在其提供标准重力环境期间, 利用光阱蒸发冷却的方式获得^{87}Rb BEC; 在其提供微重力环境期间, 在 400 ms 的时间尺度上观察了凝聚体随时间的膨胀并详细对比了不同温度下的原子在 TOF 过程中的损失[51].

2024 年 Bouyer 小组基于爱因斯坦电梯提供的微重力环境利用^{87}Rb 原子开展了加速度测试的原子干涉实验, 其实验装置如图 13 所示, 这是继爱因斯坦电梯提供的微重力环境观察 BEC 之后开展的应用研究. Bouyer 引入贝叶斯算法将微重力环境中的加速度灵敏度提高了 350 倍左右, 最终在探寻时间为 200 ms 的情况下获得的单次灵敏度为 6×10^{-7} m·s^{-2} [52]. 另外, 基于该平台利用^{39}K 和^{87}Rb 两种原子实现的冷原子干涉仪测试等效原理将能够获得 10^{-10} 的超高精度.

2.2　空间实验室

2010 年之后, 基于微重力环境模拟平台获得的成果极大地推动了空间环境中冷原子物理研究的发展. 空间能够提供更加持久的微重力环境, 因此基于空间环境提供的微重力环境开展超冷原子物理研究及应用成为追求的目标. 2016 年上海光机所设计的空间冷原子钟搭载天宫二号进入空间实验室, 在空间环境中开展了长达 34 个月的研究工作; 2017 年德国汉诺威

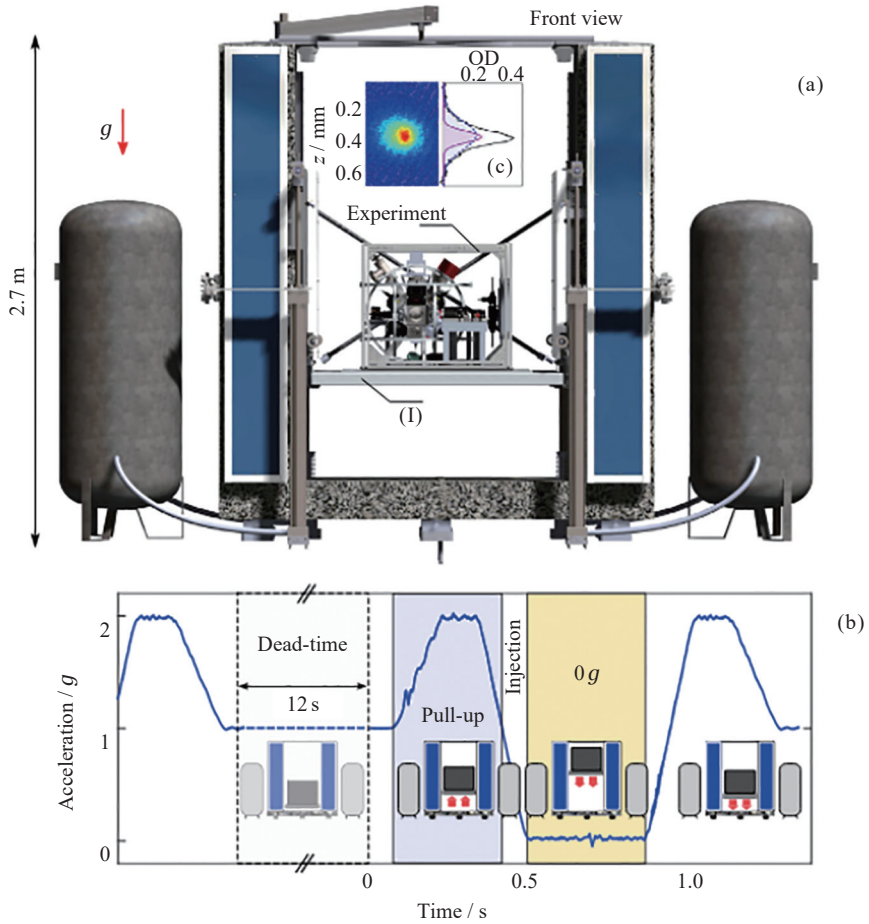

图 12　(a) 爱因斯坦电梯载荷. (b) 爱因斯坦电梯的加速度曲线. (c) BEC 在微重力环境中 TOF 50 ms 之后的原子图像

Fig. 12　(a) Schematic of the Einstein elevator and its payload for BEC. (b) The acceleration profile of the Einstein elevator. (c) Absorption image of the BEC with the TOF time of 50 ms

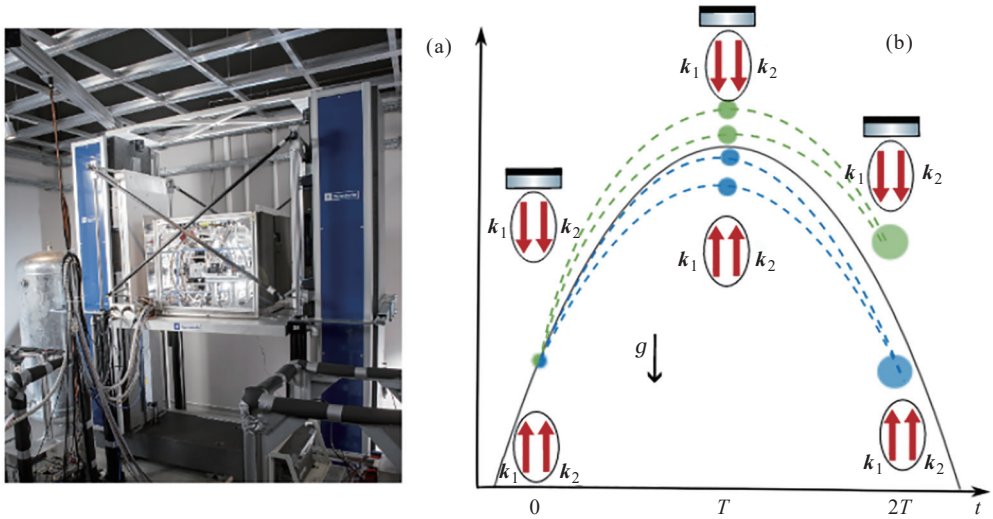

图 13 (a) 安装于爱因斯坦电梯内部的原子干涉仪装置. (b) 原子干涉仪原理

Fig. 13 (a) Atom interferometer installed on the Einstein elevator. (b) The schematic diagram of the atom interferometer

大学主导设计的物质波干涉仪 (Materiewellen-Interferometer Unter Schwerelosigkeit, MAIUS) 搭载探空火箭在近地轨道提供的微重力环境中开展实验.

随着国际空间站和中国空间站的全面建成与投入使用, 空间站能够长久地提供稳定的微重力环境; 随着载人飞船和货运飞船运载技术的发展, 实验系统在轨升级、更新的能力获得了极大的提升, 空间站成为研究微重力环境下超冷原子物理及其应用的理想平台. 2018 年, 美国国家实验室主导设计的冷原子实验室 (Cold Atom Laboratory, CAL) 搭载火箭发射并被安装在国际空间站上开始实验; 2022 年上海光机所和北京大学联合设计的超冷柜搭载梦天实验舱发射至中国空间站并开始在轨运行. 此外, 同时在梦天实验舱提供的微重力环境下开展实验的冷原子物理实验系统还包括上海光机所设计的空间冷原子微波钟实验系统和中国科学院授时中心设计的锶原子光钟. 随后, 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院设计的空间冷原子干涉仪搭载天舟五号货运飞船发射至空间并被安装在中国空间站上的高微重力柜开始在轨实验.

接下来将详细介绍基于空间实验室提供的微重力环境, 超冷原子研究及其应用领域所获得的一系列进展.

2.2.1 天宫二号 (Tiangong-2)

天宫二号是中国空间实验室阶段任务的主要飞行器之一, 承载着验证空间站关键技术的重要使命, 是中国的第一个空间实验室. 2016 年 9 月 15 日上海光机所研制的空间冷原子钟 (Cold Atom Clock Experiment in Space) 搭载天宫二号实验室进入空间, 成为世界上首台在轨运行并开展科学实验的空间冷原子钟. 与此同时, 空间冷原子钟也是空间环境中的第一个冷原子实验装置. 空间钟在轨连续运行 34 个月, 取得了一系列重要的进展, 技术指标达到国际先进水平[8,53,54]. 空间冷原子钟的原理图如图 14 所示[8], 在微重力近地轨道中原子被冷却、捕获、发射, 在微波场中使用 Ramsey 方法探询后最终被探测. 最终, 空间冷原子钟在轨道上实现了闭环锁定, 获得了接近 $3.0\times10^{-13}\ \tau^{-1/2}$ 的短期频率稳定度.

空间冷原子钟在近地轨道上的长期运行, 开辟了空间量子精密测量这一全新的应用领域. 空间冷原子钟作为微重力环境下超冷原子物理平台和原子钟研究的探路者, 是最早在轨运行的冷原子实验平台, 其设计方案和在轨实验结果为后续的空间站高精度时频柜项目以及空间站超冷原子物理实验柜项目提供了宝贵的经验.

2.2.2 探空火箭 (Sounding Rocket)

2017 年首次将 BEC 以及原子干涉的工作场景拓展至空间环境[55–57], 其实验装置以及原理如图 15 所示. 在探空火箭提供的长达 6 min 的微重力时段中, 研究实现了 BEC 并基于 Bragg 散射实现了原子干

涉. 研究制备了两个磁子能级上的量子气体, 分别是 F=2, m_F=0 和 F=2, m_F=2 态. 通过调节原子在磁阱中的保持时间, 研究了微重力环境下 BEC 在磁阱中的振荡. 原子中心位置的振荡与理论结果相符合, 但是观察到了 BEC 的 Thomas-Fermi 半径随保持时间的不规则的振荡. 通过长时间观察两个磁子能级上的量子气体随时间的膨胀, 发现两个磁子能级上的原子的中心位置经过长时间的 TOF 之后不会发生明显的改变, 但是原子的 Thomas-Fermi 半径会有较大差异也说明制备的两个磁子能级的原子的动量不一致.

2021 年有研究基于探空火箭提供的微重力环境再次演示了 Bragg 散射实现的原子干涉, 获得干涉图样如图 16 所示. 相比于之前的工作, 该研究基于原子芯片装置首次在微重力环境下制备了处于 F=1, m_F=±1, 0 磁子能级上的 BEC. 实验观察发现, 处于不同自旋态的 BEC 对于环境中剩余磁场有不同的响应, 并估算得到剩余磁场中的剩余曲率为 3.5 μT·mm^{-2}.

2.2.3　国际空间站 (International Space Station)

2014 年美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 正式宣布将要在国际空间站上建立空间冷原子实验室 (Cold Atom Lab, CAL)[58]. CAL 的主要科学目标是利用原子芯片装置在微重力环境下制备^{87}Rb, ^{39}K, ^{41}K 量子气体样品及其混合物; 在空间实验室建成第一个微重力环境下的、多用户的、长期运行的量子气体实验平台[59–61]. 2018 年 5 月 21 日, CAL 搭载 OA-9 Antares 230 火箭送入国际空间站, 由航天员完成安装和统一供电后, 于 2018 年 6 月开始冷原子实验, 实验装置如图 17 所示[60].

2020 年 CAL 更新了系统的科学模块, 首次报道了在国际空间站上实现的^{87}Rb 玻色–爱因斯坦凝

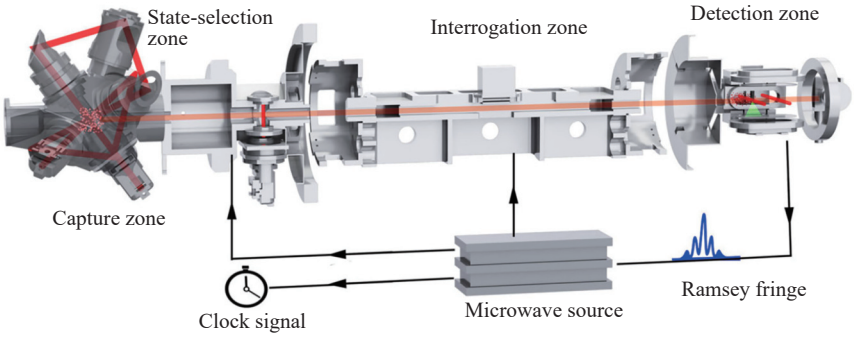

图 14　天宫二号空间冷原子钟原理

Fig. 14　Principle and structure of the space cold atom clock in Tiangong-2 laboratory

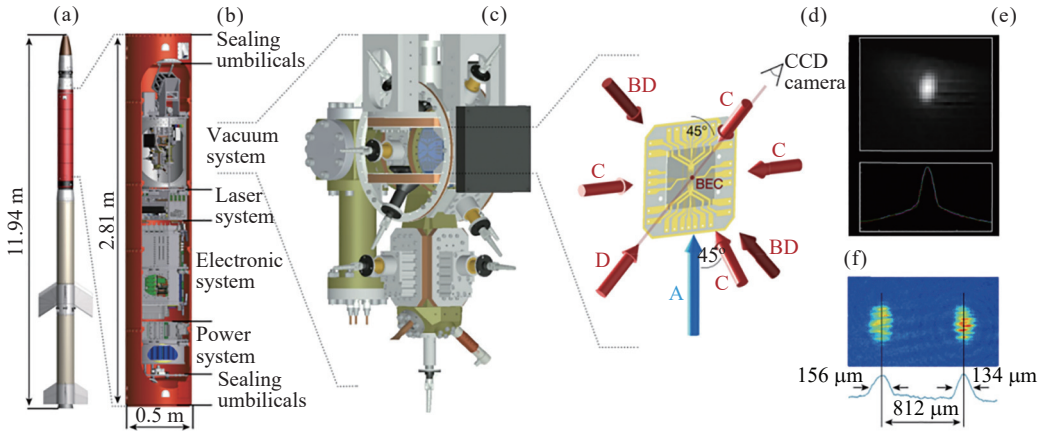

图 15　星载 BEC 干涉仪装置以及原理

Fig. 15　Set-up for space-borne Bose-Einstein condensation for precision interferometry

聚[60], 展示了微重力环境下 BEC 的整个相变过程. 利用相同的实验参数分别基于 CAL 在地面和空间站开展实验, 在地面获得的 BEC 原子数为 4.5×10^4, 凝聚比为 15%; 在空间站获得的 BEC 原子数为 1.3×10^5. 实验结果表明, 标准重力环境和微重力环境中 BEC 的密度分布呈现出较大差异, 如图 18 所示[60]. 在地面标准环境中, 不同磁子能级的 BEC 经过自由飞行之后只能看到标准的双模分布, 主要包括外围热原子以及原子团中心的凝聚体. 处于 F=2, m_F=0 磁不敏态的 BEC 在重力的作用下与处于 F=2, m_F=2 态的 BEC 在空间上密不可分, 在不施加梯度磁场的前提下看不到不同磁子能级之间的分布. 在微重力环境下, 处于 F=2, m_F=0 磁不敏态的 BEC 在背景磁场的作用下产生二阶塞曼效应在 F=2, m_F=2 态原子外围形成类似于光晕的原子云 (Halo-cloud), 因此不同磁子能级的 BEC 自由飞行之后能够通过原子分布区分不同磁子能级的原子, 通过增加偏置场和梯度场验证了这一猜想. 此外, 在微重力环境下详细研究了 BEC 在磁阱中的绝热释放过程, 获得的超冷量子气体的温度分别为 231 (9) pK 和 720 (79) pK, 在长达 1.018 s 的时间尺度上观察了 BEC 质心和动量宽度的变化.

2021 年 CAL 实验室报道了国际空间站上实现的三维量子气泡, 实验通过不同射频频率缀饰的量子气泡经过不同 TOF 时间之后的原子如图 19 所示[62]. 研究团队建立了超冷原子处于不同温度下, 不同缀饰射

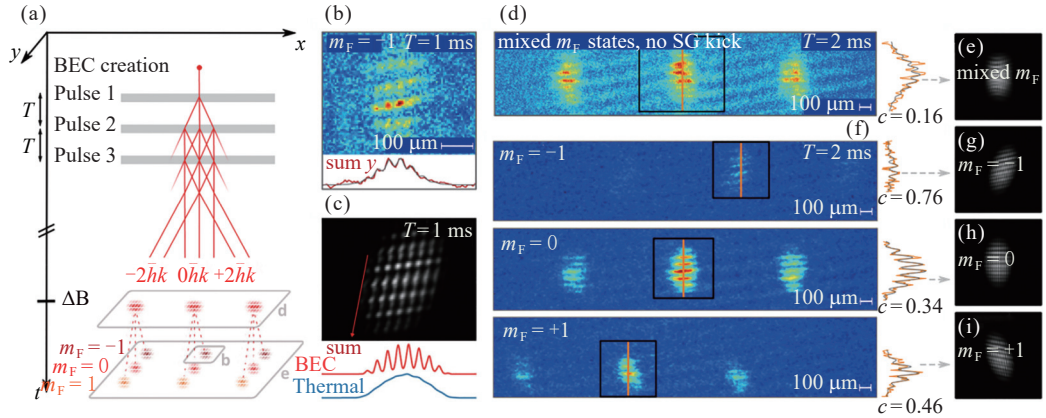

图 16 基于探空火箭实现的空间物质波干涉图样的实验和模拟结果

Fig. 16 Experimental and simulated spatial matter-wave fringes on the sounding rocket

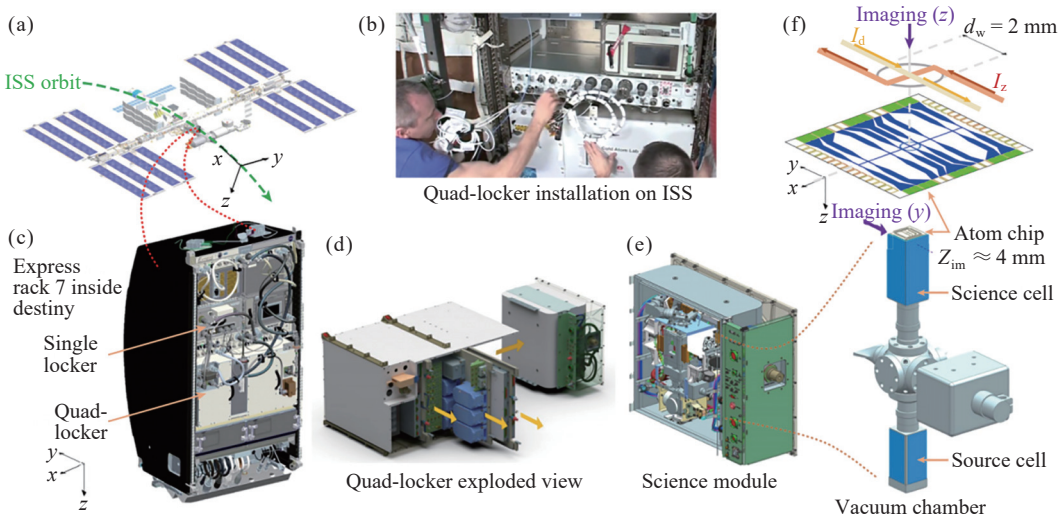

图 17 国际空间站的 CAL 装置

Fig. 17 CAL apparatus in the International Space Station (ISS)

频场强度、不同微重力环境中形成的量子气泡的物理模型. 与此同时, 物理模型和实验均发现当气泡从一个非微扰的谐振子阱开始膨胀时, 原子气泡有明显的降温. 原子在椭球形势阱表面演化的系统是人类迄今为止并没有探索过的新奇拓扑结构模型, 在地面环境中由于重力的存在, 椭圆形量子气泡的实验实现几乎

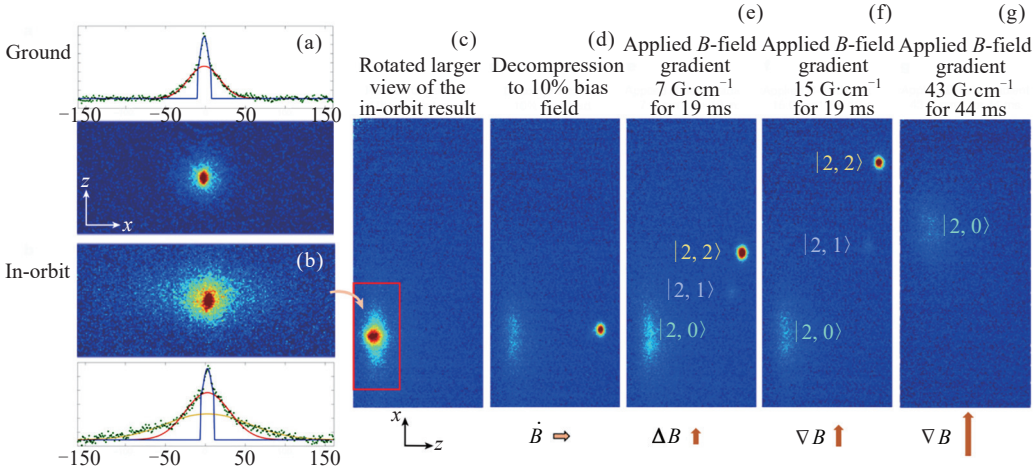

图 18　CAL 在地面和国际空间站获得的^{87}Rb 玻色–爱因斯坦凝聚

Fig. 18　BEC production in CAL on the Earth and in orbit

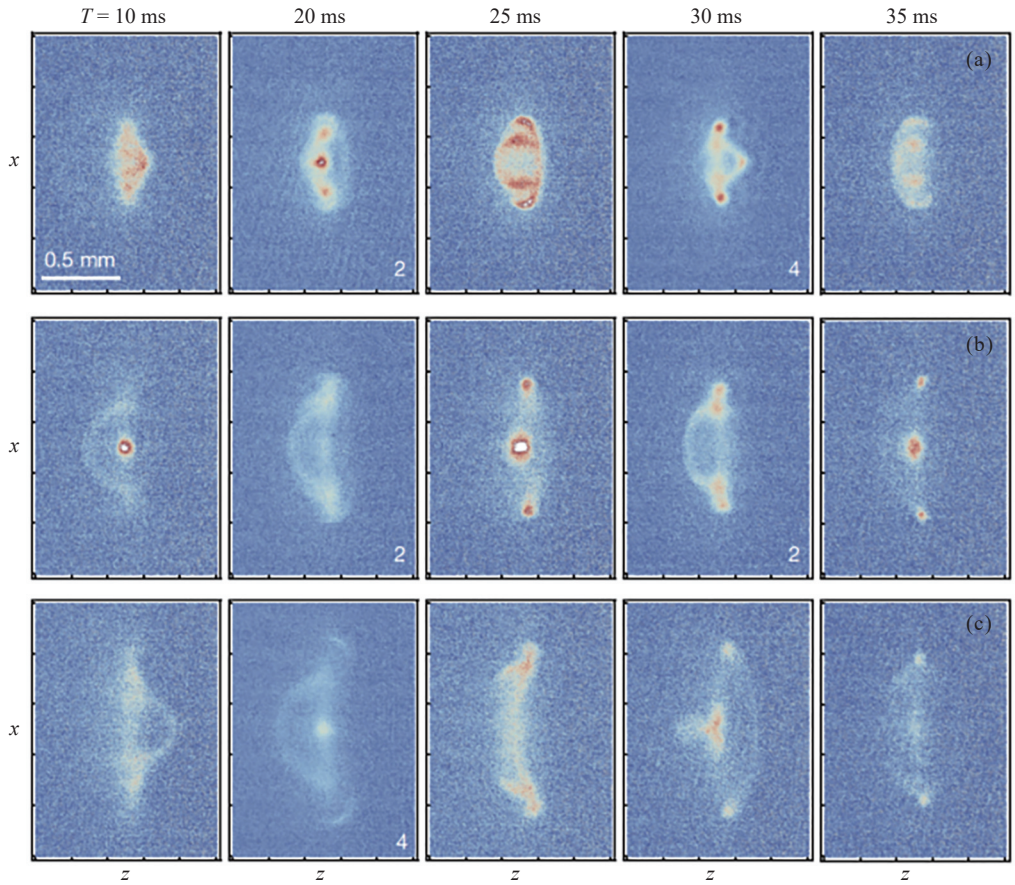

图 19　国际空间站获得的三维超冷原子气泡的演化

Fig. 19　Evolution of the 3D ultracold atomic bubbles in the ISS

是一件不可能的事情, 该实验结果对于探索复杂超冷原子系综内部的拓扑、维度和相互作用具有重要意义. 不过, 基于原子芯片装置利用射频在磁阱中蒸发获得的 BEC, 不仅距离原子芯片表面很近, 而且有较大的纵横比, 这些天然因素都进一步限制了观察和操控量子气泡的时间尺度. 虽然可以通过绝热转移将原子团的位置移动至距离原子芯片表面较远的地方, 但是避免不了转移过程中引起的加热或者激发.

2022 年 CAL 实验小组报道基于 CAL 实验装置在微重力环境下实现了 BEC 的绝热转移. 量子系综的绝热传输是量子传感、量子信息和通信的关键技术. 在 100 ms 左右的时间内, 利用扫描阱频率的方法, 原子可以被快速绝热转移超过 1 mm 的距离, 且转移精度为亚微米量级, 进一步拓展了微重力环境下基于原子芯片实验装置操控和研究超冷原子的空间尺度和时间尺度[63]. 利用磁阱绝热转移原子系统的原理如图 20 所示[63], 另外, CAL 通过物质波透镜技术在国际空间站将膨胀能量为 3.6 ±0.2 nK 的超冷原子降低至 52±10 pK.

2023 年 CAL 实验室在微重力环境下基于协同蒸发冷却实验方案实现了^{87}Rb 原子和^{41}K 原子的双组分玻色–爱因斯坦凝聚[64], 如图 21 所示[64]. 这是 CAL 团队第二次在轨更新设备之后获得的实验结果, 本次在轨升级了全新的科学模块以及微波源, 如图 22 所示[64]. 科学模块包含真空系统、原子源、线圈以及磁屏蔽内部的光学组件, 微波源主要用于^{39}K 和^{41}K 玻色子协同蒸发冷却. CAL 并没有在微重力环境下制备^{39}K 玻色–爱因斯坦凝聚的计划, 但是制备了温度低

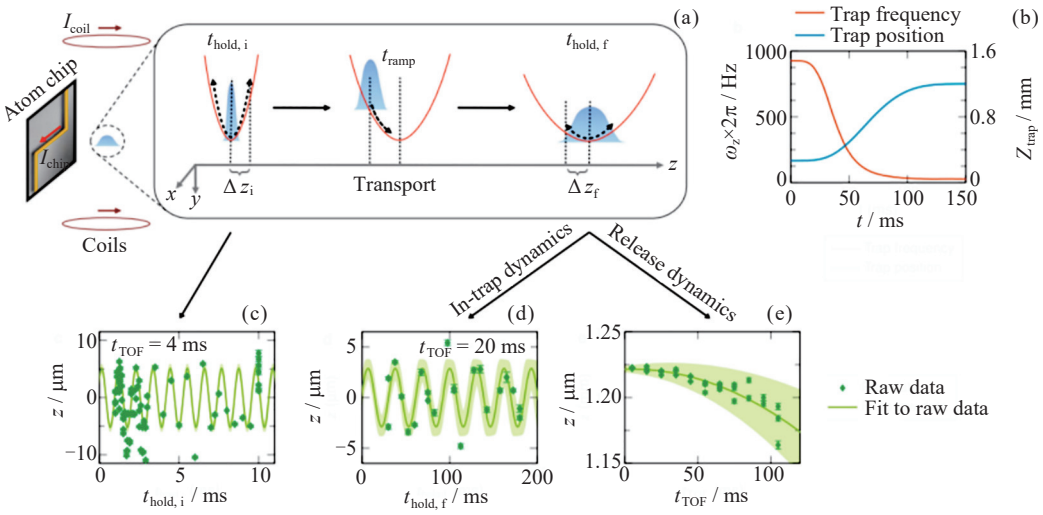

图 20 国际空间站上基于原子芯片装置精确转移量子气体的原理

Fig. 20 Principle of the precision transfer of the quantum gas in orbit based on the atom-chip apparatus onboard the ISS

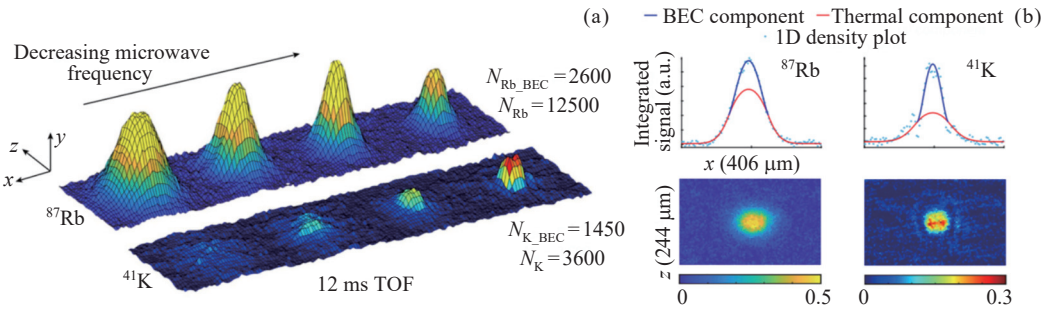

图 21 国际空间站获得的双组分玻色–爱因斯坦凝聚

Fig. 21 Dual-species of Bose-Einstein condensates in the ISS

至 350 nK 的 ^{39}K 原子. 另外, 由于多个物种间共用 Bragg 光束能够有效抑制干涉仪的共模噪声, CAL 在空间站利用 ^{87}Rb 和 ^{41}K 原子的共同魔术波长激光开展了双组分的 Bragg 原子干涉实验, 但是温度更低、数量更多、控制精度更高的实验手段将进一步提高原子干涉仪的信噪比.

2024 年继在轨更新 SM-3 的科学模块之后, CAL 基于新的物理系统在微重力环境下开展了 ^{87}Rb Mach-Zehnder 原子干涉仪的研究, 其原子干涉实验装置以及干涉原理如图 23 所示. 利用 785 nm 的激光提供 π/2-π-π/2 脉冲, 获得的物质波干涉信号的对比度为 0.36(2)[65]. 然而, 当双脉冲的时间间隔由 0.5 ms 延长至 10 ms 时, 几乎看不到超冷原子干涉信号. 文中详细研究了空间站的振动对于原子干涉仪的对比度的影响, 并与安装在空间站的三维的加速度计 SAMS 121 F04 做了详细的比对. 结果发现, 对于小的时间间隔, 由于空间站振动引起的相位变化远大于高斯模拟引起的白噪声, 这一现象与更大的时间间隔

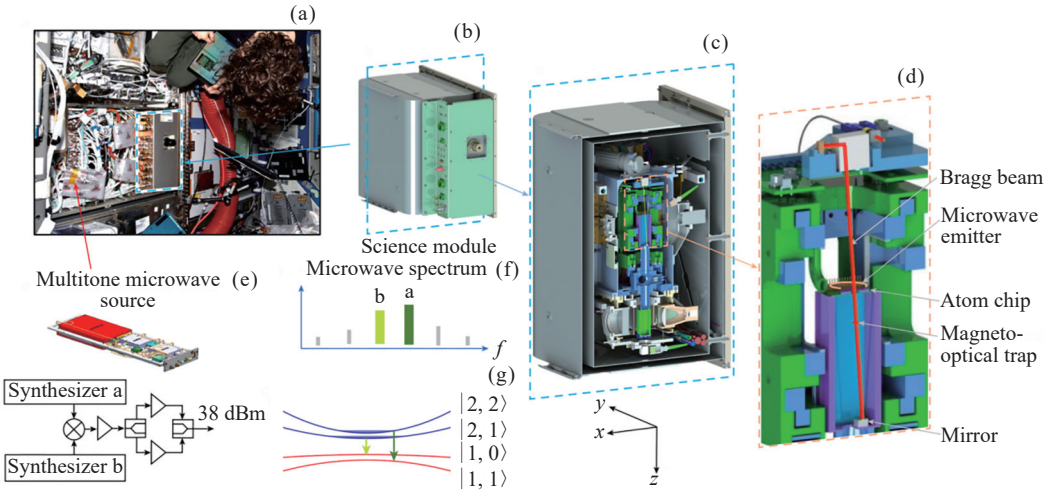

图 22　冷原子实验室在轨更新的硬件

Fig. 22　CAL on-orbit hardware upgrades

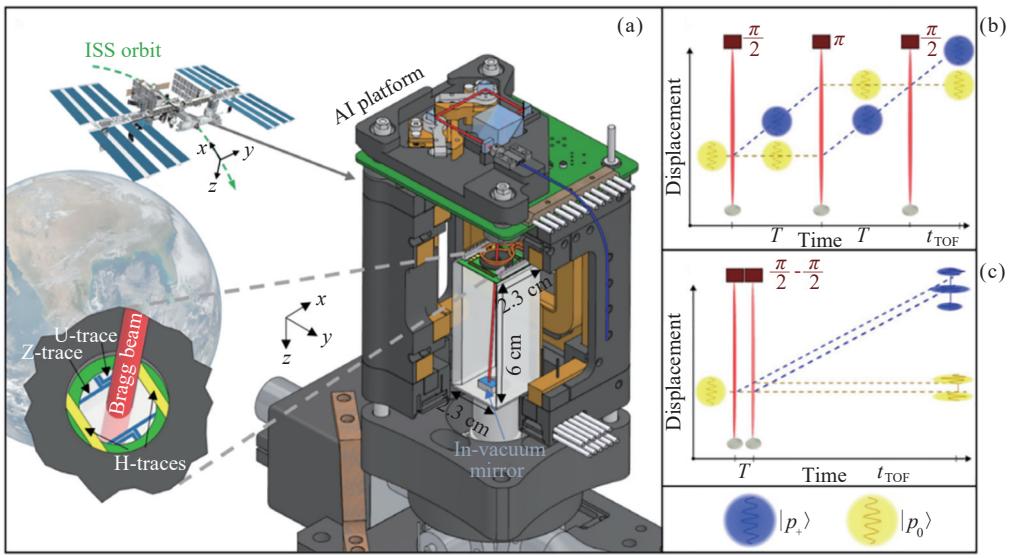

图 23　(a) 空间站上的原子干涉仪装置, (b) Mach-Zehnder 干涉原理, (c) Ramsey 原子干涉原理

Fig. 23　(a) Atom interferometer setup onboard the ISS, (b) Mach-Zehnder interferometer diagram, (c) Ramsey atom interferometer diagram

截然相反. 另外, CAL 团队利用 π/2-π/2 脉冲在空间站开展了剪切干涉仪研究, 实验和理论预期的 Bragg 脉冲时间间隔一致. 由于剪切波干涉仪运行一次即可产生原子干涉图像, 因此对于环境振动引起的相位噪声不敏感. 最后, 研究利用 Ramsey 干涉过程测试了单光子反冲动量为 3.77 (6) kHz, 这是首次在空间环境利用物质波干涉演示量子传感器.

2.2.4 中国空间站 (China Space Station)

2022 年 10 月 31 日, 安装于高精度时频实验柜的空间冷原子微波钟跟随梦天舱一起发射至中国空间站. 高度集成的空间冷原子微波钟, 基于 2017 年提出的腔内冷却式空间冷原子钟的设计方案[66], 采用高可靠、集成化的自由空间光学系统[67,68]. 该空间原子钟在地面测试过程中的频率稳定度为 $1.1\times10^{-12}\ \tau^{-1/2}$, 超过 200000 s 平均时间的频率稳定度达到 2.5×10^{-15} [69,70]. 空间冷原子微波钟整个装置的尺寸为 900 mm×600 mm×400 mm, 重量不超过 105 kg, 如图 24 所示[70].

2022 年 11 月 12 日, 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院研制的空间冷原子干涉仪搭载天舟五号货运飞船发射至中国空间站, 在航天员的协助下安装于梦天实验舱内的微重力科学实验柜. 该干涉仪主要利用^{85}Rb 和^{87}Rb 双组分的冷原子干涉仪在微重力环境中测试等效原理[71] 以及用作冷原子陀螺仪[72]. 图 25[71] 为空间冷原子干涉仪的框图及其装置, 整个装置的外部尺寸为 460 mm×330 mm×260 mm, 重量不超过 37 kg, 载荷的功耗大约 70 W. 2024 年该团队首次报道了在微重力环境下基于原子干涉仪实现的旋转测试结果. 采用双衍射拉曼跃迁的点源干涉测量方案, 利用内置的压电驱动的反射镜来获得干涉条纹并从中提取旋转和加速度信息, 最终获得的单次旋转分辨率为 50 μrad·s^{-1}, 32 次旋转后的旋转分辨率可

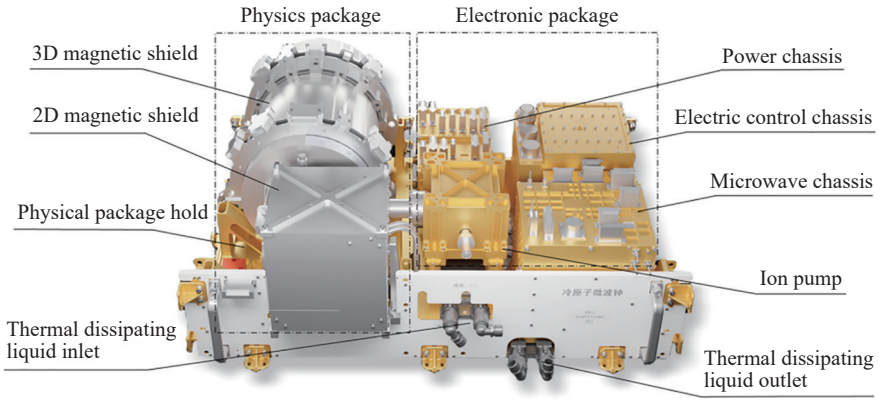

图 24 中国空间站梦天实验舱空间冷原子微波钟装置

Fig. 24 Schematic of the cold atom microwave clock in the Mengtian lab module of the CSS

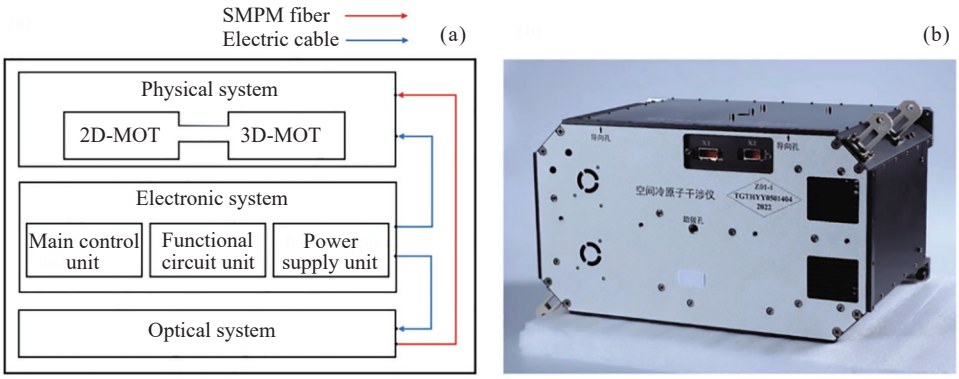

图 25 中国空间站空间冷原子干涉框图及其装置

Fig. 25 Space cold atom interferometer scheme and corresponding payload in the CSS

以达到 17 μrad·s^{-1}. 该结果与空间站的经典陀螺仪的结果表现出很好的一致性, 为空间中冷原子陀螺仪的进一步发展奠定了基础.

3　中国空间站超冷原子物理实验柜

伴随着中国空间站的建成和发展, 其将提供两个实验舱用于开展微重力环境下的科学研究, 分别是问天实验舱和梦天实验舱, 主要面向空间生命科学和人类研究、微重力物理、空间天文学和地球科学以及新的空间技术等领域[73–76]. 中国空间站超冷原子物理实验柜属于微重力基础物理领域, 其主要目标是利用中国空间站提供的微重力环境优势, 在微重力环境下建成以^{87}Rb 玻色–爱因斯坦凝聚和^{40}K 费米简并气体为工作物质的超冷原子物理实验平台. 利用空间微重力环境条件, 超越地面实验室重力的限制, 利用两级冷却的实验手段[6,77–81] 获得温度为 pK 量级的超冷原子, 使得原子操控和观测时间可以延长至秒量级.

3.1　超冷柜的方案设计和地面实验

2022 年 10 月 31 日, 超冷柜搭载梦天实验舱成功发射至中国空间站并开展了一系列的在轨实验. 发射至中国空间站的超冷原子物理实验柜如图 26 所示[82], 整柜的外部尺寸为 1820 mm×1050 mm×815 mm, 包含物理系统、冷却激光系统、光阱光晶格激光系统、科学电控单元和实验柜支撑系统.

超冷柜的物理系统、冷却激光系统、光阱光晶格激光系统和科学电控单元四个子系统分别如图 27 所示[82]. 物理系统主要为光与原子相互作用提供所需的超高真空、光场和磁场环境, 其主体为真空系统, 提供所需光场的自由空间光学元件以及提供磁场的线圈全部固定在真空系统上. 为了实现高度集成化的超

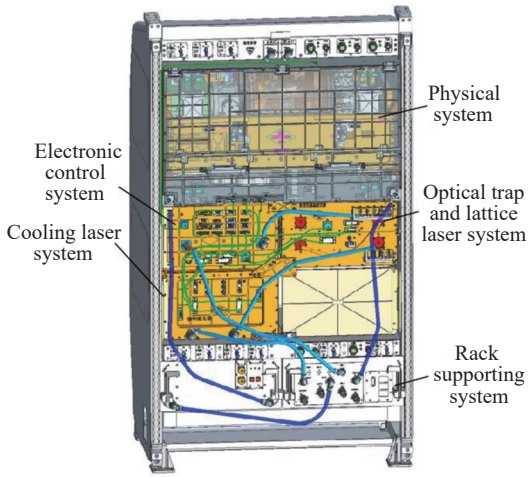

图 26　超冷原子物理实验柜

Fig. 26　Cold atom physics research rack

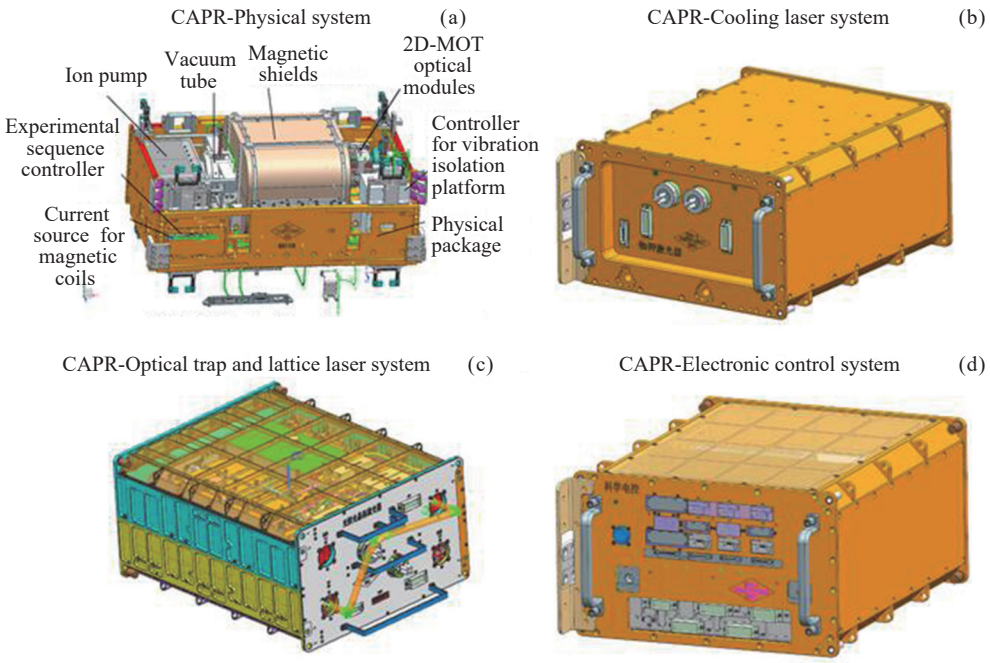

图 27　超冷原子物理实验柜子系统

Fig. 27　Schematic diagrams of the subsystem of the CAPR

冷柜, 维持离子泵工作的高压电源模块、驱动磁场线圈的电流源模块、对冷却激光和光阱光晶格激光进行调制的全光纤光学平台、负责时序控制的前置模块以及物理系统的供电模块等全部集成在物理系统中. 为了避免周期的环境磁场对在轨运行的超冷柜产生影响, 科学腔以及安装在上面的物理光机和线圈全部内置于磁屏蔽中. 磁屏蔽采用坡莫合金材料, 共计三层, 每层厚度为 1 mm. 为了给超冷柜提供超高的微重力环境, 物理系统中的所有单机安装在一个主动隔振模块内部. 集成后物理子系统的外部尺寸为 590 mm×930 mm×510 mm, 质量约为 170 kg.

超冷柜最初的真空系统如图 28 所示[83], 区别于其他微重力环境下所使用的原子芯片实验装置, 超冷柜的真空系统采用双腔的设计方案, 腔体包括 2DMOT 腔和 3D 科学腔[83]. 两个腔体中间有一个差分管, 用于维持两个腔体真空度的压差超过 2 个数量级. 一方面, 保证科学腔中的真空度能够维持在 10^{-9} Pa 的数量级; 另一方面, 也为科学腔中超冷原子制备和俘获提供足够多的冷原子束流. 系统中使用一个 3 L·s^{-1} 的离子泵维持 2D 腔的真空环境, 一个 20 L·s^{-1} 和 8 L·s^{-1} 的离子泵用于维持科学腔的超高真空环境. 另外, 系统中还装有吸气剂用于维持超高真空环境. 此外, 在经历发射前的一系列集成测试的过程中, 超冷柜会面临长时间的断电状态, 这就要求其能够在重新上电之后迅速恢复超高真空环境并能够正常开展冷原子实验, 这也是超冷柜真空系统设计的关键技术之一. 实际使用过程中, 超冷柜的真空系统经历长达 1 个月的断电, 重新上电后 10 min 内就可以迅速恢复超高真空环境.

由于铝钛合金 (TC4) 具有密度低、热膨胀率低、热导率小、力学性能好、机械强度高的特点, 特别是该方案经过天宫二号空间冷原子钟的实验验证, 因此超冷柜的整个真空腔体采用 TC4 材料实现. 另外, 双腔的设计也为科学腔中超冷原子的调控提供了足够多的光学通道, 科学腔体侧面有 12 个光学窗口用于物理连接, 上下各有一个光学窗口. 超冷柜中用于实现和探测^{87}Rb BEC 的光路分布如图 29 所示[84], 包括 2D-MOT 冷却光、2D-MOT 重泵光、推送光、3D-MOT 冷却光、3D-MOT 重泵光、交叉光阱光束、探测光和成像系统等. 此外, 系统还集成有用于两级交叉光束冷却的两束粗腰光阱光束、用于在三维六角晶格中调控超冷原子的 4 束光晶格光束.

超冷柜真空系统集成方案如图 30 所示[82], 所有的物理光机和线圈全部集成在真空系统上[84,85].

光纤波导作为柔性的光学元件, 具有重量轻、容易集成和运输、对于环境温度和振动更加不敏感等特性, 超冷柜首次利用全光纤激光系统为平台提供激光光源, 用于 BEC 的制备、调控和探测[86,87]. 全光纤激光系统包括三部分, 如图 31 所示[84]. 第一部分是用于铷原子激光冷却的 780 nm 激光器 (①②③), 分别包含冷却激光、重泵激光和探测激光, 其主要用途是提供将^{87}Rb 热原子的温度冷却至μK 量级以及吸收成像所需的激光. 第二部分是全光纤的光学平台 (④), 对冷却激光系统的三路输出进行分束、合束、频率和开关控制, 最终为原子冷却和探测提供所需的 15 路输出. 第三部分是光阱光晶格激光系统, 能够提供 8 路 1064 nm 激光, 其中两路用于交叉光阱蒸发冷却制备 BEC, 如图 31(b) 所示. 两路用于两级交叉光束冷却,

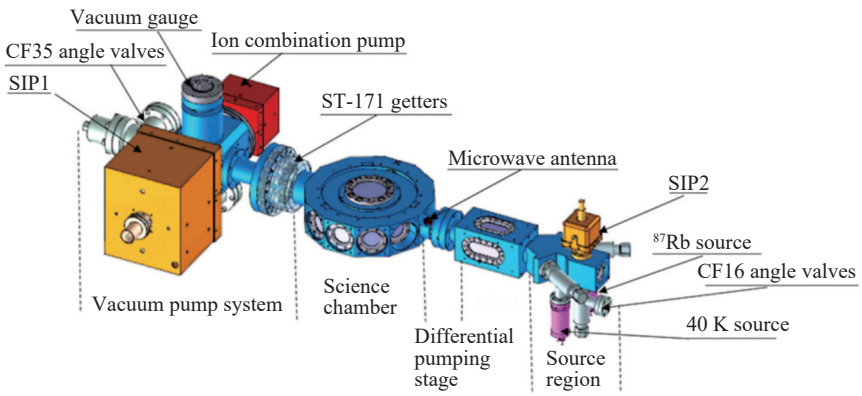

图 28 超冷原子物理实验柜真空系统方案

Fig. 28 Vacuum system scheme of the CAPR

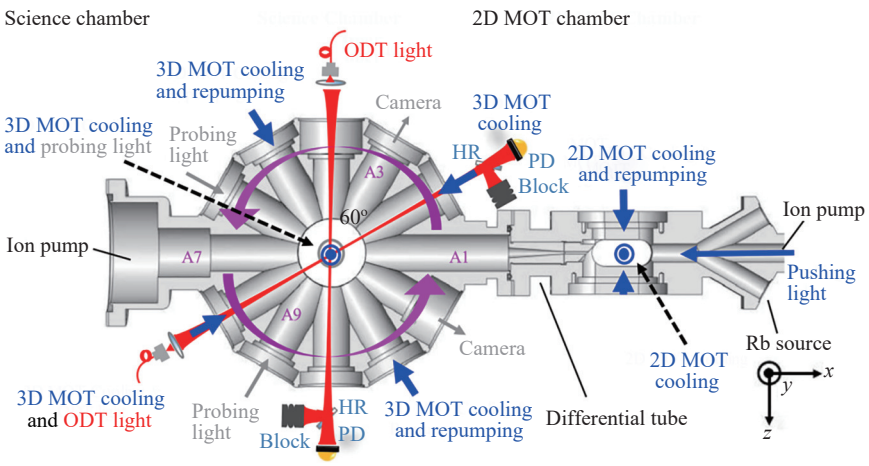

图 29　超冷原子物理实验柜光路分布

Fig. 29　Schematic of portion optical beams for CAPR

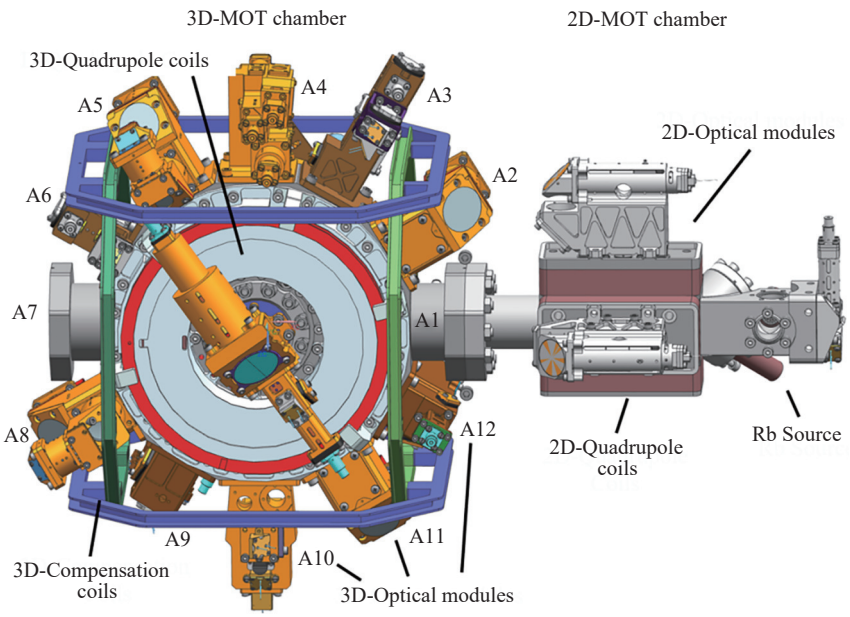

图 30　超冷原子物理实验柜集成化的真空系统

Fig. 30　Integrated vacuum system of the CAPR

另外 4 路用于三维六角光晶格调制超冷原子. 另外, 冷却激光系统、光阱光晶格激光系统、科学电控单元的尺寸均为 470 mm×550 mm×270 mm, 且每个单机的质量不超过 50 kg.

科学电控单元为超冷柜的核心控制单元, 一方面负责整个实验系统的运行和状态监测、工程数据和应用数据的采集与存储; 另一方面, 作为空间站实验平台与超冷柜科学系统指令和数据通信的枢纽, 将由平台发来的指令进行存储、执行或者转发, 同时将超冷柜的应用数据和工程数据上传至空间站平台. 超冷柜的运行逻辑如图 32 所示[82], 科学电控单元对 780 nm 冷却激光系统、1064 nm 光阱光晶格激光系统、前置控制模块和相机进行操控, 使得所有单机都能够按照实验时序工作, 超冷原子制备和操控实验能够正常进行.

地面实验过程中, 3D-MOT 中装载的原子数大于 2×10^9, 原子温度低于 500 μK. 实验上利用压缩磁光阱和暗磁光阱技术进一步提高原子的密度, 利用

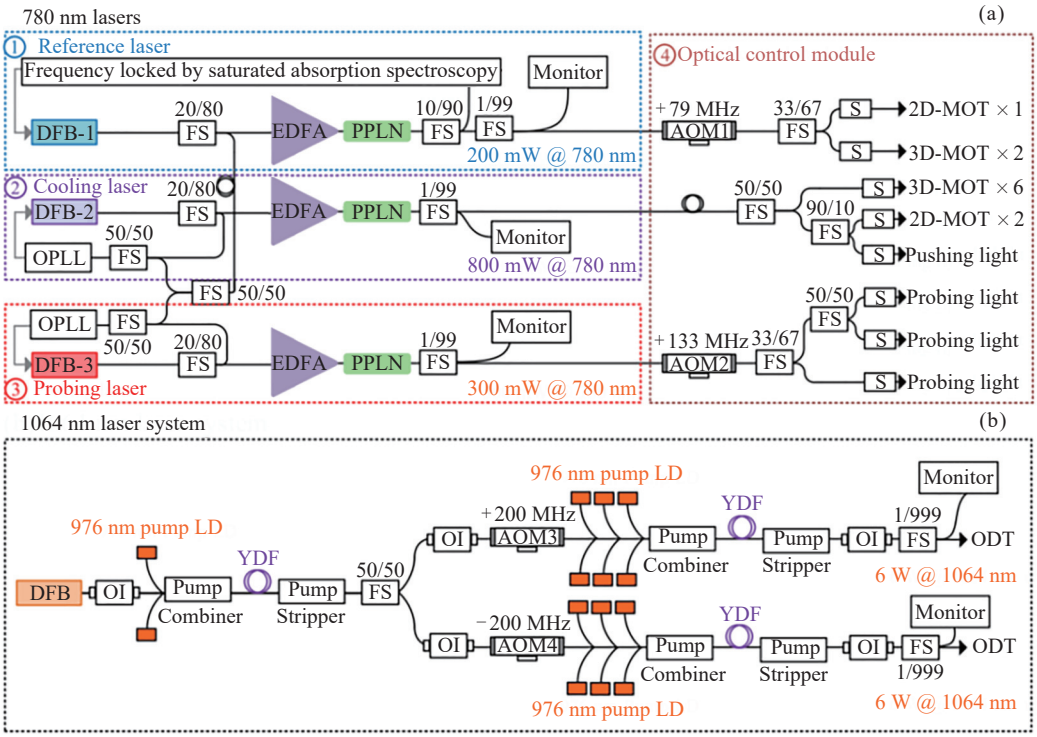

图 31 超冷原子物理实验柜 780 nm 激光系统与 1064 nm 细腰激光系统

Fig. 31 All-fiber 780 nm and 1064 nm laser system for CAPR

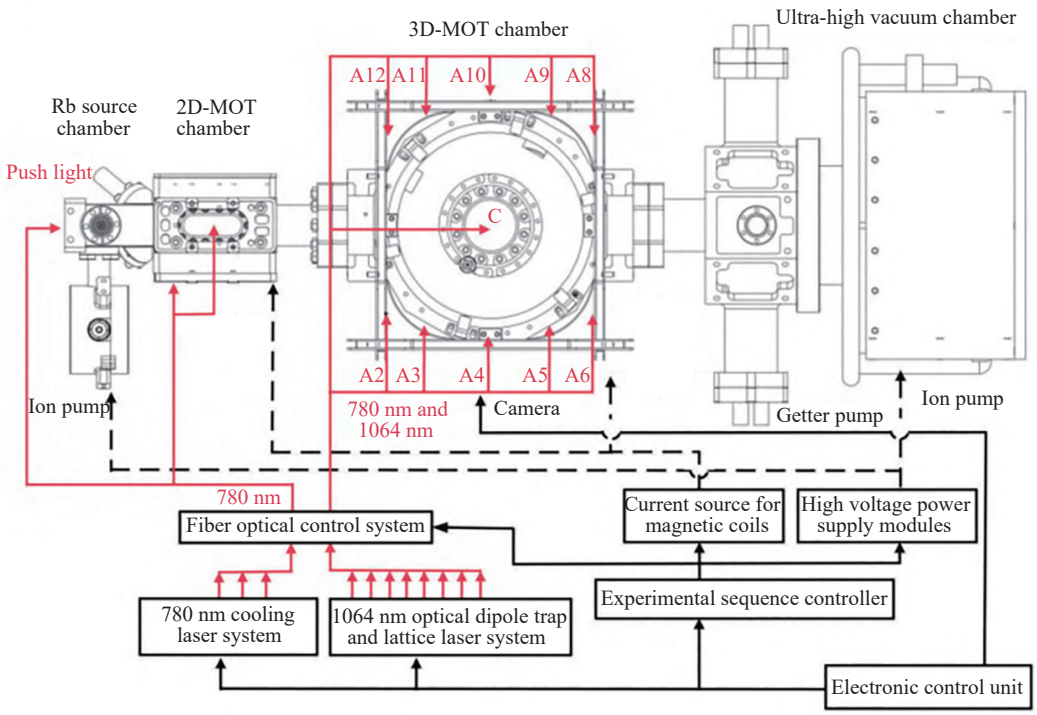

图 32 超冷原子物理实验柜

Fig. 32 Principal scheme of the CAPR

molasses 技术进一步降低原子的温度. 1064 nm 交叉光阱中装载的原子数大于 2×10^6, 原子温度低于 30 μK. 通过在交叉光阱中持续蒸发冷却获得了全光的 BEC, 利用光阱蒸发冷却观察到的 BEC 的相变过程如图 33 所示[84]. 当激光器的功率降低至 40 mW 时, 将原子从光阱中释放出来, 原子自由飞行 15 ms 之后呈现明显的热原子分布 (见图 33a); 当激光器功率降低至 38 mW 时, 原子自由飞行 15 ms 之后呈现明显的双模分布 (见图 33b); 持续降低激光器的功率至 30 mW 时, 原子自由飞行 15 ms 之后已经看不到明显的热原子分布 (见图 33d).

最终获得的 BEC 的原子数不低于 1×10^5, 利用超冷原子的动量扩散评估得到原子的温度低于 30 nK. 此外, 在地面实验过程中, 基于两级交叉光束冷却进一步将原子的温度降低至 2.4 nK[82,88,89].

3.2　在轨运行情况

集成后的超冷原子物理实验柜在地面完成测试后, 开展了环境模拟实验以保证系统能够经受发射过程中的冲击和振动. 随后, 超冷原子物理实验柜参与了梦天舱的集成测试, 以保证在地面实验室能够通过天地链路实现系统的远程控制.

2022 年 10 月 31 日, 超冷原子物理实验柜随梦天舱发射至中国空间站. 继梦天舱与空间站核心舱成功交会对接后, 2022 年 11 月 4 日, 超冷柜在轨开机. 通过对比系统在发射前后的系统工程参数的一致性进一步判断超冷柜的设计满足载荷能够承受发射过程中冲击和振动的需求. 截止到 2024 年 11 月 20 日, 超冷柜在没有宇航员干预的情况下在轨连续自主运行时间超过 2 年, 每个工作日的持续工作时间约 3 h, 且在此期间并未进行任何硬件的维修和更新. 基于超冷原子物理实验柜的实验由上海光机所、北京大学联合开展, 在地面实验室通过天地链路将指令发送至超冷柜, 并通过天地链路下行应用数据和工程数据, 在地面实验室开展数据的分析和处理.

到目前为止, 在微重力环境下利用超冷柜开展了磁光阱、光学黏团、光阱蒸发冷却制备 BEC、深度冷却等实验, 且已经取得了初步的实验结果.

4　结论与展望

绝对零度为人类在空间尺度和时间尺度研究微观物质提供了绝佳的实验条件, 因此极限低温一直是人类不断追求的目标. 同时, 这一路上也伴随着很多新奇物理现象的发现. BEC 作为人类在追求低温物质过程中的一个重要里程碑, 极大地推动了量子力学的发展. 继 BEC 之后, 对于更低温物理的探索从未停止, 基于 BEC 的深度冷却实验方案逐渐发展起来. 在地面标准重力环境中目前主要有 DKC 和 TSCBC 以及利用偏置场补偿重力之后做绝热释放等实验方案.

微重力环境为超冷原子物理研究及其应用提供了天然的优势, 因此美国、德国、法国等国家争相在抛物线飞机、落塔、爱因斯坦电梯、探空火箭以及国际空间站等微重力环境模拟实验平台上开展研究. 近 20 年来, 微重力环境下 BEC 的实现、深度冷却以及

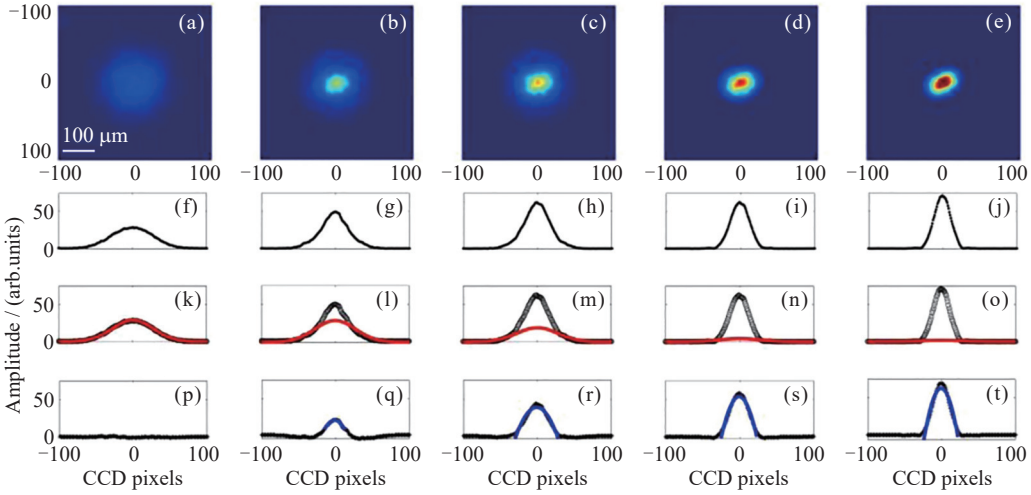

图 33　BEC 的相变过程

Fig. 33　Phase transition of BEC

基于 BEC 开展的物质波干涉与调控实验取得了一系列重要研究进展, 极大地推动了微重力环境下的超冷原子物理研究与应用的不断深入.

然而, 要在空间环境中实现超冷原子物理实验平台在工程上需要面临更多的挑战. 首先, 平台的设计受到尺寸、重量和功耗的严格限制, 其次, 为了能够承受发射过程中的冲击和振动, 必须保证系统具备超高的可靠性. 再次, 由于发射后的超冷柜需要远程控制, 因此适用于超冷柜的控制系统需要兼容至梦天实验舱的控制系统中, 这对于实验平台控制系统自主操作能力、长期运行的可靠性和一致性等都提出了严格的要求. 到目前为止, 超冷柜在中国空间站连续在轨运行超过两年的时间, 且并未进行硬件的更新和维护, 这也足以说明超冷原子物理实验柜的可靠性. 在轨运行期间, 基于超冷柜开展了磁光阱、光学黏团、光阱蒸发冷却制备观察 BEC、深度冷却等实验, 且已经取得了初步的实验结果, 实现了超冷柜作为微重力环境下超冷原子物理实验平台的主要目标.

微重力环境下超冷原子的发展以及在量子精密测量和量子传感方面的应用是一个长期的研究课题. 基于超冷柜, 在微重力环境下研究利用光阱蒸发冷却实现的 BEC 与在磁阱中利用射频蒸发冷却制备的 BEC 之间的主要差异; 在微重力环境下在秒量级的时间尺度上观察 BEC 的三维动力学演化过程; 在微重力环境下利用两级交叉光束冷却实验方案制备 pK 量级的超冷原子, 并探索该方案能够实现的极限低温. 通过对比基于超冷柜地面镜像件与超冷柜飞行件获取的实验结果, 在实验上深入研究微重力环境对于超冷原子制备、调控和探测的影响机制, 为微重力环境下的超冷原子操控的动力学模拟提供了重要的参考依据. 此外, 研究可以基于超冷柜在更低的温度尺度和更长的时间尺度来调控三维六角晶格中的超冷原子, 以及开展脉冲冲击冷却、动量滤波等研究.

微重力环境下的超冷原子领域在未来有很广阔的应用前景. 实现温度低于 femtoKelvin (fK) 量级的超冷原子, 在新的温度尺度上开展超冷原子物理研究, 观察新奇的物理现象; 基于更低温度尺度、更大时间尺度的超冷原子探索基础物理, 如爱因斯坦等效原理、暗物质、暗能量等; 提高以超冷原子为工作物质的量子精密测量设备和量子传感器的精度, 用于星间重力或者重力梯度测试以及空间导航.

致谢 中国载人航天工程办公室、中国科学院、中国科学院空间应用工程与技术中心对空间站超冷原子物理实验柜项目给予了大力支持.

参考文献

[1] BOSE. Plancks gesetz und lichtquantenhypothese[J]. *Zeitschrift für Physik*, 1924, **26**(1): 178-181

[2] EINSTEIN A. Quantentheorie des einatomigen idealen Gases[J]. SB Preuss. Akad. Wiss. phys. -math. Klasse, 1924

[3] ANDERSON M H, ENSHER J R, MATTHEWS M R, *et al.* Observation of Bose-Einstein condensation in a dilute atomic vapor[J]. *Science*, 1995, **269**(5221): 198-201

[4] AMMANN H, CHRISTENSEN N. Delta kick cooling: a new method for cooling atoms[J]. *Physical Review Letters*, 1997, **78**(11): 2088-2091

[5] LEANHARDT A E, PASQUINI T A, SABA M, *et al.* Cooling Bose-Einstein condensates below 500 Picokelvin[J]. *Science*, 2003, **301**(5639): 1513-1515

[6] WANG L, ZHANG P, CHEN X Z, *et al.* Generating a Picokelvin ultracold atomic ensemble in microgravity[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2013, **46**(19): 195302

[7] KASEVICH M A, RIIS E, CHU S, *et al.* RF spectroscopy in an atomic fountain[J]. *Physical Review Letters*, 1989, **63**(6): 612-615

[8] LIU L, LÜ D S, CHEN W B, *et al.* In-orbit operation of an atomic clock based on laser-cooled ^{87}Rb atoms[J]. *Nature Communications*, 2018, **9**(1): 2760

[9] LAURENT P, LEMONDE P, SIMON E, *et al.* A cold atom clock in absence of gravity[J]. *The European Physical Journal D-Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics*, 1998, **3**(3): 201-204

[10] ALONSO I, ALPIGIANI C, ALTSCHUL B, *et al.* Cold atoms in space: community workshop summary and proposed road-map[J]. *EPJ Quantum Technology*, 2022, **9**(1): 30

[11] HEAVNER T P, HOLLBERG L, JEFFERTS S R, *et al.* Characterization of a cold cesium source for PARCS: primary atomic reference clock in space[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2001, **50**(2): 500-502

[12] LÜ Desheng, LIU Liang, WANG Yuzhu. Space cold atomic clock and its scientific applications[J]. *Manned Spaceflight*, 2011, **17**(1): 47-51 (吕德胜, 刘亮, 王育竹. 空间冷原子钟及其科学应用 [J]. 载人航天, 2011, **17**(1): 47-51)

[13] MENG Y L, JIANG X J, WU J, *et al.* Satellite-borne atomic clock based on diffuse laser-cooled atoms[J]. *Frontiers in Physics*, 2022, **10**: 985586

[14] KOVACHY T, HOGAN J M, SUGARBAKER A, *et al.* Matter wave lensing to picokelvin temperatures[J]. *Physical Review Letters*, 2015, **114**(14): 143004

[15] BASSI A, CACCIAPUOTI L, CAPOZZIELLO S, *et al.* A way forward for fundamental physics in space[J]. *NPJ Microgravity*, 2022, **8**(1): 49

[16] TINO G M, BASSI A, BIANCO G, *et al.* SAGE: a proposal for a space atomic gravity explorer[J]. *The European Physical Journal D*, 2019, **73**(11): 228

[17] SUN Y, LIU L. Designing precision measurement of the gravitational Aharonov-Bohm effect in microgravity[OL]. *Fundamental Research*, 2024. https://doi.org/10.1016/j.fmre.2024.05.006

[18] LIU L. Exploring the Universe with matter waves[J]. *Nature*, 2018, **562**(7727): 351-352

[19] VOGEL A, SCHMIDT M, SENGSTOCK K, *et al.* Bose–Einstein condensates in microgravity[J]. *Applied Physics B*, 2006, **84**(4): 663-671

[20] SLEATOR T, BERMAN P R, DUBETSKY B. High precision atom interferometry in a microgravity environment[OL]. arXiv preprint arXiv: 9905047, 1999

[21] PETERS A, CHUNG K Y, CHU S. Measurement of gravitational acceleration by dropping atoms[J]. *Nature*, 1999, **400**(6747): 849-852

[22] PETERS A, CHUNG K Y, YOUNG B, *et al.* Precision atom interferometry[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1997, **355**(1733): 2223-2233

[23] CHEN X Z, FAN B. The emergence of picokelvin physics[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2020, **83**(7): 076401

[24] ADAMS C S, LEE H J, DAVIDSON N, *et al.* Evaporative cooling in a crossed dipole trap[J]. *Physical Review Letters*, 1955, **74**(18): 3577-3580

[25] BARRETT M D, SAUER J A, CHAPMAN M S. All-optical formation of an atomic Bose-Einstein condensate[J]. *Physical Review Letters*, 2001, **87**(1): 010404

[26] HÄNSEL W, HOMMELHOFF P, HÄNSCH T W, *et al.* Bose–Einstein condensation on a microelectronic chip[J]. *Nature*, 2001, **413**(6855): 498-501

[27] FOLMAN R, KRÜGER P, SCHMIEDMAYER J, *et al.* Microscopic atom optics: from wires to an atom chip[J]. *Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 2002, **48**: 263-356

[28] FORTÁGH J, ZIMMERMANN C. Magnetic microtraps for ultracold atoms[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2007, **79**(1): 235-289

[29] ZHOU Shuyu, LONG Quan, ZHOU Shanyu, *et al.* Realization of Bose-Einstein condensation in SIOM of Chinese Academy of Sciences[J]. *Physics*, 2002, **31**(8): 481-482 (周蜀渝, 龙全, 周善钰, 等. 玻色–爱因斯坦凝聚在中国科学院上海光机所实现 [J]. 物理, 2002, **31**(8): 481-482)

[30] LI Xiaolin, KE Min, YAN Bo, *et al.* A Z-trap in an atom chip for trapping neutral ^{87}Rb atoms[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(11): 6367-6372 (李晓林, 柯敏, 颜波, 等. 利用原子芯片上 Z 形磁阱囚禁中性^{87}Rb 原子 [J]. 物理学报, 2007, **56**(11): 6367-6372)

[31] HU J Z, URVOY A, VENDEIRO Z, *et al.* Creation of a Bose-condensed gas of ^{87}Rb by laser cooling[J]. *Science*, 2017, **358**(6366): 1078-1080

[32] ZHANG C, YANG C, HU L, *et al.* Beijing drop tower microgravity adjustment towards $10^{-3}\sim10^{-5}$ g level by Cold-Gas Thrusters[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2023, **35**(4): 39

[33] ZHANG XQ, YUAN LG, WU WD, *et al.* Some key technics of drop tower experiment device of National Microgravity Laboratory (China)(NMLC)[J]. Science in China Ser. E Engineering & Materials Science, 2005, 48: 305-316.

[34] HU Wenrui, KANG Qi. Frontiers of microgravity science[J]. *Science & Technology Review*, 2020, **38**(10): 59-62 (胡文瑞, 康琦. 微重力科学前沿 [J]. 科技导报, 2020, **38**(10): 59-62)

[35] LUO L, ZHOU HY, SUN YH, *et al.* Tsinghua university freefall facility (tuff): A 2.2 second drop tunnel for microgravity research[J]. Microgravity Science and Technology, 33, 1-19.

[36] ZHANG J Q, DONG W B, WANG Z, *et al.* Development of a new microgravity experiment facility with electromagnetic launch[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2021, **33**(6): 68

[37] VAN ZOEST T, GAALOUL N, SINGH Y, *et al.* Bose-Einstein condensation in microgravity[J]. *Science*, 2010, **328**(5985): 1540-1543

[38] MÜNTINGA H, AHLERS H, KRUTZIK M, *et al.* Interferometry with Bose-Einstein condensates in microgravity[J]. *Physical Review Letters*, 2013, **110**(9): 093602

[39] VOGT C, WOLTMANN M, HERRMANN S, *et al.* Evaporative cooling from an optical dipole trap in microgravity[J]. *Physical Review A*, 2020, **101**(1): 013634

[40] LANGLOIS M, DE SARLO L, HOLLEVILLE D, *et al.* Compact cold-atom clock for onboard Timebase: tests in reduced gravity[J]. *Physical Review Applied*, 2018, **10**(6): 064007

[41] PETERMAN P, GIBBLE K, LAURENT P, *et al.* Microwave lensing frequency shift of the PHARAO laser-cooled microgravity atomic clock[J]. *Metrologia*, 2016, **53**(2): 899

[42] SACCOCCIO M, LOESEL J, COATANTIEC C, *et al.* PHARAO space atomic clock: new developments on the laser source[C]//Proceedings of the SPIE 10568, International Conference on Space Optics—ICSO 2004. Toulouse, France: SPIE, 2017: 1056819

[43] LAURENT P, ESNAUT F X, GIBBLE K, *et al.* Qualification and frequency accuracy of the space-based primary frequency standard PHARAO[J]. *Metrologia*, 2020, **57**(5): 055005

[44] LAURENT P, CLAIRON A, LEMONDE P, *et al.* The space clock PHARAO: functioning and expected performances[C]//IEEE International Frequency Control Symposi-

um and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum, 2003. Proceedings of the 2003. Tampa, FL, USA: IEEE, 2003: 179-184

[45] NYMAN R A, VAROQUAUX G, LIENHART F, *et al.* I. C. E. : a transportable atomic inertial sensor for test in microgravity[J]. *Applied Physics B*, 2006, **84**(4): 673-681

[46] STERN G, BATTELIER B, GEIGER R, *et al.* Light-pulse atom interferometry in microgravity[J]. *The European Physical Journal D*, 2009, **53**(3): 353-357

[47] GEIGER R, MÉNORET V, STERN G, *et al.* Detecting inertial effects with airborne matter-wave interferometry[J]. *Nature Communications*, 2011, **2**(1): 474

[48] BATTELIER B, BARRETT B, FOUCHÉ L, *et al.* Development of compact cold-atom sensors for inertial navigation[J]. *Quantum Optics*, 2016, **9900**: 990004

[49] BARRETT B, ANTONI-MICOLLIER L, CHICHET L, *et al.* Dual matter-wave inertial sensors in weightlessness[J]. *Nature Communications*, 2016, **7**(1): 13786

[50] ANTONI-MICOLLIER L, BARRETT B, CHICHET L, *et al.* Generation of high-purity low-temperature samples of ^{39}K for applications in metrology[J]. *Physical Review A*, 2017, **96**(2): 023608

[51] CONDON G, RABAULT M, BARRETT B, *et al.* All-optical Bose-Einstein condensates in microgravity[J]. *Physical Review Letters*, 2019, **123**(24): 240402

[52] PELLUET C, ARGUEL R, RABAULT M, *et al.* Atom interferometry in an Einstein elevator[OL]. arXiv preprint arXiv: 2407.07183, 2024

[53] LÜ D S, REN W, SUN Y, *et al.* Characterization of laser cooling in microgravity via long-term operations in Tian-Gong-2 space lab[J]. *National Science Review*, 2023, **10**(4): nwac180

[54] REN W, LI T, QU Q Z, *et al.* Development of a space cold atom clock[J]. *National Science Review*, 2020, **7**(12): 1828-1836

[55] BECKER D, LACHMANN M D, SEIDEL S T, *et al.* Space-borne Bose–Einstein condensation for precision interferometry[J]. *Nature*, 2018, **562**(7727): 391-395

[56] LACHMANN M D, AHLERS H, BECKER D, *et al.* Ultracold atom interferometry in space[J]. *Nature Communications*, 2021, **12**(1): 1317

[57] KRUTZIK M. Matter Wave Interferometry in Microgravity[D]. Humboldt-Universität zu Berlin: Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät I, 2014

[58] SORIANO M, AVELINE D, MCKEE M, *et al.* Cold atom laboratory mission system design[C]//2014 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2014

[59] ELLIOTT E R, KRUTZIK M C, WILLIAMS J R, *et al.* NASA's Cold Atom Lab (CAL): system development and ground test status[J]. *NPJ Microgravity*, 2018, **4**(1): 16

[60] AVELINE D C, WILLIAMS J R, ELLIOTT E R, *et al.* Observation of Bose–Einstein condensates in an Earth-orbiting research lab[J]. *Nature*, 2020, **582**(7811): 193-197

[61] FRYE K, ABEND S, BARTOSCH W, *et al.* The Bose-Einstein condensate and cold atom laboratory[J]. *EPJ Quantum Technology*, 2021, **8**(1): 1

[62] CAROLLO R A, AVELINE D C, RHYNO B, *et al.* Observation of ultracold atomic bubbles in orbital microgravity[J]. *Nature*, 2022, **606**(7913): 281-286

[63] GAALOUL N, MEISTER M, CORGIER R, *et al.* A space-based quantum gas laboratory at picokelvin energy scales[J]. *Nature Communications*, 2022, **13**(1): 7889

[64] ELLIOTT E R, AVELINE D C, BIGELOW N P, *et al.* Quantum gas mixtures and dual-species atom interferometry in space[J]. *Nature*, 2023, **623**(7987): 502-508

[65] WILLIAMS J R, SACKETT C A, AHLERS H, *et al.* Interferometry of atomic matter waves in the cold atom lab onboard the International Space Station[OL]. arXiv preprint arXiv: 2402.14685, 2024

[66] LÜ D S, PENG X K, REN W, *et al.* Design of a space atomic clock with intracavity cooling[C]//2017 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC). Besancon, France: IEEE, 2017: 623-624

[67] ZHANG Z, XIANG J F, MENG Y M, *et al.* Design of a highly reliable and low-cost optical bench for laser cooling[J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, **72**: 102974

[68] ZHANG Z, XIANG J F, XU B, *et al.* Integrated, reliable laser system for an ^{87}Rb cold atom fountain clock[J]. *Chinese Physics B*, 2023, **32**(1): 013202

[69] DENG S M D, REN W, XIANG J F, *et al.* Cold atom microwave clock based on intracavity cooling in China Space Station[J]. *NPJ Microgravity*, 2024, **10**(1): 66

[70] DENG S M D, REN W, XIANG J F, *et al.* Physics package based on intracavity laser cooling ^{87}Rb atoms for space cold atom microwave clock[J]. *Chinese Physics B*, 2024, **33**(7): 070602

[71] LI J T, CHEN X, ZHANG D F, *et al.* Realization of cold atom gyroscope in space[OL]. arXiv preprint arXiv: 2407.07183, 2024

[72] HE M, CHEN X, FANG J, *et al.* The space cold atom interferometer for testing the equivalence principle in the China Space Station[J]. *NPJ Microgravity*, 2023, **9**(1): 58

[73] WANG Xiang, WANG Wei. Key technical characteristics of the Tiangong Space Station[J]. *Scientia Sinica: Technologica*, 2021, **51**(11): 1287-1298 (王翔, 王为. 天宫空间站关键技术特点综述 [J]. 中国科学: 技术科学, 2021, **51**(11): 1287-1298)

[74] GU Y D. The China Space Station: a new opportunity for space science[J]. *National Science Review*, 2022, **9**(1): nwab219

[75] GAO M, ZHAO G H, GU Y D. Recent progress in space science and applications of China's Space Station in 2020–2022[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(4): 503-510

[76] GU Y D, GAO M, ZHAO G H. Science research and utili-

zation planning of China's Space Station in operation period 2022-2032[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, **40**(5): 609-614

[77] LUAN T, JIA T, CHEN X Z, *et al.* Optimized degenerate Bose—fermi mixture in microgravity: DSMC simulation of sympathetic cooling[J]. *Chinese Physics Letters*, 2014, **31**(4): 043401

[78] LUAN T, YAO H P, WANG L, *et al.* Two-stage crossed beam cooling with ^{6}Li and ^{133}Cs atoms in microgravity[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(9): 11378-11387

[79] YAO H P, LUAN T, LI C, *et al.* Comparison of different techniques in optical trap for generating picokelvin 3D atom cloud in microgravity[J]. *Optics Communications*, 2016, **359**: 123-128

[80] LUAN T, LI Y F, ZHANG X S, *et al.* Realization of two-stage crossed beam cooling and the comparison with Delta-kick cooling in experiment[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, **89**(12): 123110

[81] FAN B, ZHAO L H, ZHANG Y, *et al.* Numerical study of evaporative cooling in the Space Station[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2021, **54**(1): 015302

[82] LI Lin, XIONG Wei, WANG Bin, *et al.* Design and verification of the cold atom physics rack installed in the Chinese Space Station[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, **51**(11): 1101014 (李琳, 熊炜, 汪斌, 等. 中国空间站超冷原子物理实验柜设计与验证 [J]. 中国激光, 2024, **51**(11): 1101014)

[83] LIU Q, XIE Y, LI L, *et al.* Development of an ultra-high vacuum system for a cold atom physics rack in space[J]. *Vacuum*, 2021, **190**: 110192

[84] LI L, XIONG W, WANG B, *et al.* The design, realization, and validation of the scheme for quantum degenerate research in microgravity[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2023, **15**(3): 7100508

[85] LI Wenwen, LIU Qian, LIANG Angang, *et al.* Integrated design and realization of two-dimensional magneto-optical trap for ultra-cold atomic physics rack in space[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, **49**(11): 1112001 (李文文, 刘乾, 梁昂昂, 等. 空间超冷原子实验两维磁光阱系统的集成设计与实现 [J]. 中国激光, 2022, **49**(11): 1112001)

[86] HONG Yi, HOU Xia, CHEN Dijun, *et al.* Research on frequency stabilization technology of modulation transfer spectroscopy based on Rb^{87}[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, **48**(21): 2101003 (洪毅, 侯霞, 陈迪俊, 等. 基于 Rb^{87} 调制转移光谱稳频技术研究 [J]. 中国激光, 2021, **48**(21): 2101003)

[87] LI L, ZHOU C Y, XIONG W, *et al.* All-fiber laser system for all-optical ^{87}Rb Bose Einstein condensate to space application[J]. *Applied Optics*, 2023, **62**(29): 7844-7851

[88] XIE Y, FAN B, LI H, *et al.* Ground experiment verification and on-orbit prediction of the two-stage cooling at pK level in the Chinese Space Station[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2022, **55**(20): 205301

[89] LI H, YU J C, YUAN X L, *et al.* Deep cooling scheme of quantum degenerate gas and ground experimental verification for Chinese Space Station[J]. *Frontiers in Physics*, 2022, **10**: 971059

作者简介

李　琳　女, 1995 年 11 月出生于山西省朔州市, 现为中国科学院上海光学精密机械研究所助理研究员, 主要研究方向为空间冷原子物理、冷原子传感等.

E-mail: linli@siom.ac.cn

李　唐（通信作者）　男, 1978 年 10 月出生于安徽省宿州市, 现为中国科学院上海光学精密机械研究所研究员, 博士生导师, 主要研究方向为空间冷原子物理、冷原子传感等.

E-mail: litang@siom.ac.cn

刘　亮（通信作者）　男, 1963 年 1 月出生于上海市, 现为中国科学院上海光学精密机械研究所研究员, 博士生导师. 主要研究方向为空间超冷原子物理、空间冷原子频标以及基于空间冷原子物理的精密测量.

E-mail: liang.liu@siom.ac.cn