



胡文瑞,中国科学院院士,国际宇航院院士。现任中国科学院力学研究所研究员。长期从事流体力学研究,是我国空间科学的领域带头人之一。

微重力科学前沿

胡文瑞^{1,2},康琦^{1,2}

1. 中国科学院力学研究所,北京 100190

2. 中国科学院大学,北京 100490

摘要 微重力科学是空间科学重要的组成部分,其前沿课题在一定程度上反映了人类认识自然的能力以及各国在该领域的研究状态。在微重力这种极端的物理条件下,孕育着物理、化学过程及材料制备中新现象、新规律的发现,以及在更高精度下实现对基本物理规律的检验与验证。本文介绍国内外微重力科学近年最重要的研究进展,并对其进行研判。

关键词 微重力科学;空间科学;微重力流体物理;微重力燃烧科学;空间材料科学;空间基础物理;空间站;返回式卫星

载人航天是人类空间活动的前沿,也是国家综合实力的重要标志。地球近地轨道空间站、月球空间站、以及火星空间站都在微重力环境中运行,需要微重力科学和技术的支撑;同时,空间探索也为发展微重力科学研究和应用提供了条件。微重力

环境是一种极端的物理条件,孕育着物理、化学过程及材料制备和生物过程中新现象、新规律的发现,以及在更高精度下实现对基本物理规律的检验与验证。微重力科学与技术研究除对人类认识自然具有重要的科学意义之外,在空间探索活动中也

具有重要的应用价值。

流体运动、燃烧及材料制备过程等都与流体介质直接相关联,微重力环境为流体创造了近乎各向同性的物理条件,该环境中浮力对流、重力沉降及分层、液体静压梯度都极大地减小,在地面被重力效应所掩盖的次级效应(如界面作用等)将会凸显,影响或改变流体对流及燃烧机制、并且影响材料制备和生物过程。

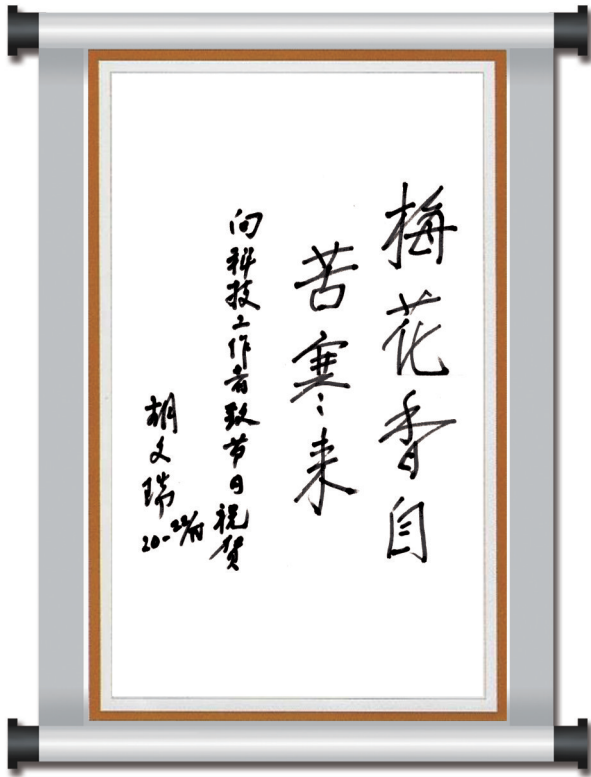
2011年起,Nayangam等^[1]发表了一系列国际空间站液滴燃烧实验(FLEX)的结果,观察到在“热焰”熄灭之后液滴周围的温度仍能维持液滴在低温下(600℃~800℃)的燃烧反应,即“冷焰”燃烧,可见火焰熄灭后液滴的汽化由低温化学反应(即冷焰)维持。这样一个“冷焰”是前所未有的过程,传统的液滴燃烧理论不能解释在微重力燃烧实验中发现的这一新现象。实际上,后来在对辛烷和癸烷的实验中也发现了类似的次级燃烧现象,亦即冷焰燃烧的发生和存在不依赖于液体燃料的类型。NASA的FLEX实验在扩散体系中发现的、由可见火焰引起的准稳态冷焰是全新的,不仅将促进燃烧理论的完善,对航天器防火安全也具有重要的启示作用。“冷焰”的发现被NASA列为国际空间站的十大成就之一。

2012年起,中国科学院空间科技先导专项组织了专门用于微重力科学和生命科学研究的“实践十号”返回式科学卫星任务,科学研究28项^[2]。卫星于2016年4月6日成功发射,20天的空间实验圆满完成,取得了丰硕的科学成果,已发表SCI学术论文近200篇,2019年11月Springer Nature出版社与中国科学出版社联合出版了研究成果专著《Physical Science Under Microgravity: Experiments on Board the SJ-10 Recoverable Satellite》^[3]。代表性的研究工作包括:1) 在颗粒流体气液相分离实验中,首次观测到微重力下颗粒气体的分仓聚集——麦克斯韦妖现象,微重力实验得到了颗粒气体团簇相图,验证了颗粒气-液相分离理论,建立了由第一性原理出发的扩散方程与成核理论模型^[4];2) 国际上首次环形液池模型大曲率面型空间实验,在原液桥体积效应研究的基础上提出创新尝试,空间实

验结果检验了体积效应的形成机理,拓展了体积效应理论的普适性^[5-6];3) 科学上突破了颗粒组装和干燥图案形成中的若干重要关键科学问题,技术上实现了胶体复杂体系在空间的管理和操控。进一步澄清了主导气液界面组装的关键动力学过程^[7-8];4) 首次揭示低速流动中火焰传播模式的完整图谱,获得低速流动(微重力环境)中热厚材料火焰传播和熄灭规律,认识火焰对气流的动态响应特性以及火焰稳定和熄灭机制,对于发展固体材料燃烧的理论和模型,改进航天器材料可燃性评价方法有重要意义和价值^[9];5) 空间60多小时的高浓度In含量($x=0.11$)空间晶体生长成功获得了高质量的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ 三元晶体,深入地研究了晶体生长过程和其中的溶质输运现象。 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ 三元光电晶体是最佳高效热光伏电池的半导体材料之一,而在地面上只能生长出含铜量为3%的晶体^[10]。

10余年来,国际空间站(ISS)一直是国际微重力研究的主要平台。中国载人航天工程任务中也安排了微重力科学的研究,在2016年、2017年发射的“天宫二号”空间实验室以及与其交会对接的“天舟一号”货运飞船中也开展了微重力流体科学(液桥科学实验、两相系统技术验证实验)、微重力材料科学(多功能晶体生长炉)以及空间基础物理关键技术(静电悬浮加速度计)的研究。并在未来空间站中全面安排了微重力流体科学实验柜、燃烧实验柜、空间材料实验柜、基础物理实验柜等专用实验平台,以及变重力实验柜和高微重力实验柜、手套箱实验柜等通用实验平台,与微重力实验相关的柜架共计10余个^[11]。此外,多种新型返回式卫星微重力平台等也逐步形成,为中国微重力科学研究及应用创造了良好的条件。

微重力环境使宏观物体或微观粒子受重力的约束条件被改变,基础物理探索中对相对论与引力理论、冷原子物理、低温凝聚态物理等规律的认知成为空间基础物理研究的重点。空间微重力环境中引力背景作用、原子热运动程度等被极大地减小、自由落体尺度被放大、非保守力作用可以被极大地减弱,可能在更高的精度进行相对论和引力物理等效原理检验和验证,以及获得极端的低温环



胡文瑞院士为《科技导报》
“2020全国科技工作者日专刊”题词

境,进行冷原子物理(冷原子钟)以及(低温)凝聚态物理研究。

近年来,美国 NASA 的冷原子实验室计划(CAL)、空间高精原子钟计划(PARCE)以及欧洲的空间原子钟组合计划(ACES)都在加紧实施;欧洲空间局(ESA)和德国空间局(DLR)联合资助的空间光钟计划(SOC)已在 ISS 上运行;法国国家航天研究中心(CNES)与 ESA 联合发射的 MICROSCOPE 卫星正在空间运行,计划在 10^{-15} 精度上检验等效原理^[2]。

2008年,上海光机所开始研制空间激光冷却原子钟地面原理样机—铷原子喷泉钟,该钟成为“天宫二号”(TG-2)冷原子钟实验的直接基础。2019年,TG-2空间冷原子钟实验是国际上首次在空间开展实验的冷原子钟,取得的主要成果有^[3]: 1) 冷原子温度约 $3.3 \mu\text{K}$,微重力下激光冷却效率比地面提高了3倍左右;2) 获得了微重力环境下 Ramsey 条纹中心线宽随抛射速度的变化规律,根

据在轨数据推算冷原子钟日稳定度为 7.2×10^{-16} ,处于国际领先水平,具有里程碑的意义。该项目的成功,为空间超高精度时间频率基准的重大需求奠定了技术基础,也为未来空间基础物理研究开辟了新的方向。中国未来空间站上的超高精度时频系统也已经启动了包括光钟在内的研制任务。

引力波探测既是空间天文学的前沿领域,也是空间基础物理引力理论的重要研究课题。2016年2月11日,美国地面大型激光干涉引力波探测器(LIGO)项目科学合作组织(LSC)宣布第一次探测到了高频引力波信号^[14]。对应于大质量扰动中、低频引力波只能在太空中探测。ESA 与 NASA 合作一直在执行空间引力波探测的激光干涉空间天线阵列计划(LISA),预计在2030年前后发射探测卫星^[15-17]。中国也在努力地进行相关的研究^[18-19]。空间的低频段引力波直接探测发现超大质量黑洞的并合和原初引力波等现象,将促进空间引力波天文学的重大突破。

微重力科学是重要的基础性研究,直接影响着人类对自然界物理规律的认识,并在宇航探测和地面新技术的发展中有重要的应用价值。中国微重力科学有长期的规划,并正在布局建设多种空间微重力实验平台,有良好的发展前景。但是前期基础研究的支持、投入极其有限,可持续发展的能力有待提高。期望国家在不同的体系中均衡布局、协同发展,也希望大批的年轻学者勇于奉献、敢于创新,投身于微重力科学的长远发展,为人类探索自然、认知宇宙做出重要的及具有里程碑意义的贡献。

胡文瑞 康琦

(2020年4月22日于北京)

参考文献(References)

- [1] Nayangam V, Uietrich D L, Ferkul P V, et al. Can cool flames support quasi-steady alkane droplet burning? [J]. Combustion and Flame, 2012, 159(12): 3583-3588.
- [2] 康琦, 胡文瑞. 微重力科学实验卫星——“实践十号” [J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(5): 574-580.
- [3] Hu W R, Kang Q. Physical Science Under Microgravity:

- Experiments on board the SJ-10 recoverable satellite[M]. Varanasi: Springer Nature Singapore, 2019.
- [4] Wang W G, Hou M Y, Chen K, et al. Experimental and numerical study on energy dissipation in freely cooling granular gases under microgravity[J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(8): 084501.
- [5] Kang Q, Wang J, Duan L, et al. The volume ratio effect on flow patterns and transition processes of thermocapillary convection[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 868: 560–583.
- [6] Kang Q, Wu D, Duan L, et al. Surface configurations and wave patterns of thermocapillary convection onboard the SJ10 satellite[J]. *Physics of Fluids*, 2019, 31(4): 20.
- [7] Li W B, Ji W J, Lan D, et al. Self-assembly of ordered microparticle monolayers from drying a droplet on a liquid substrate[J]. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2019, 10(20): 6184–6188.
- [8] Li W B, Ji W J, Sun H H, et al. Patterns formation in drying sessile and pendant droplet: Interactions of gravity settling, interface shrinkage and capillary flow[J]. *Langmuir*, 2019, 35: 113–119.
- [9] Zhu F, Lu Z, Wang S F, et al. Microgravity diffusion flame spread over a thick solid in step-changed low-velocity opposed flows[J]. *Combustion and Flame*, 2019, 205: 55–67.
- [10] Yu J D, Inatomi Y, Kumar V N, et al. Homogeneous In-GaSb crystal grown under microgravity using Chinese recovery satellite SJ-10[J]. *NJP Microgravity*, 2019, 5: 8–6.
- [11] 国家自然科学基金委员会, 中国科学院. 国家科学思想库: 中国学科发展战略——空间科学[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [12] Touboul P, M'etris G, Rodrigues M, et al. Microscope mission: First results of a space test of the equivalence principle[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 119: 231101.
- [13] Liu L, Lü D S. In-orbit operation of an atomic clock based on laser-cooled ^{87}Rb atoms[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2760.
- [14] Gabriela G. The LIGO scientific collaboration, the virgo collaboration, observation of gravitational waves from a binary black hole[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116: 061102.
- [15] Paul M. LISA pathfinder: First step to observing gravitational waves from space[J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2017, 840: 012001.
- [16] Danzmann K, Prince T A, Binetruy P, et al. LISA—Unveiling a hidden Universe[R]. Assessment Study Report, European Space Agency, 2011.
- [17] Amaro-Seoane P, Aoudia S, Babak S, et al. Low-frequency gravitational-wave science with eLISA/NGO[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2012, 29(12): 124016.
- [18] Hu W R, Wu Y F. The Taiji program in space for gravitational wave physics and the nature of gravity[J]. *National Science Review*, 2017, 4(5): 685–686.
- [19] 胡文瑞. 空间引力波探测方案的探讨[J]. *科技导报*, 2018, 36(12): 1.

Frontiers of microgravity science

HU Wenrei^{1,2}, KANG Qi^{1,2}

1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100490, China

Abstract Microgravity science is an important branch of space science. To some extent, its frontier projects reflect the ability of human beings to understand nature and the research levels of various countries in this field. Under the extreme physical condition of microgravity, it is pregnant with the prospects of the discovery of new phenomena and laws in physical and chemical processes and material preparation, as well as the realization of the test and the verification of basic physical laws with higher precision. In this paper, the most important research progress of microgravity science in recent years is reviewed.

Keywords microgravity science; space science; microgravity fluid physics; microgravity combustion science; space materials science; space fundamental physics; space station; recoverable satellite ●



(责任编辑 卫夏雯)