

编者按 空间的物理学是利用微重力环境来研究物质运动规律的一门科学,其中的空间基础物理涉及利用空间微重力环境更好地检验引力理论、低温原子物理和低温凝聚态物理中的许多基础物理前沿问题.空间的物理学研究不仅会推动我国基础科学研究前沿领域的发展,而且会促进我国航天技术水平的进一步提高.我国载人航天工程和返回式科学实验卫星的成功都促进了空间的物理学发展,正在酝酿的一些专门的科学实验卫星项目可望为我国空间基础物理研究做出贡献.微重力条件提供的高精度物理实验环境吸引了一批理论物理学家,他们期盼微重力实验能使一批基础物理难题取得突破性进展.在此背景下,本刊特组织“空间的物理学”专题,分两期刊登,以飨读者.

空间的物理学*

胡文瑞[†]

(中国科学院力学研究所 北京 100190)

摘要 近些年来,在微重力环境中进行基础物理研究涉及到许多重大的基础物理课题,引起了国际理论物理界的关注,并被称为空间的基础物理学.进而,各国的空间局逐渐将微重力科学称之为空间的物理学,但空间的物理学并没有改变微重力科学的基本内容.随着国际空间站逐渐组装完成,空间站成员国正抓紧安排计划中的微重力科学实验项目,预计会在2016年以前取得一批重大成果.另一方面,需要在专门卫星上进行的引力理论和广义相对论验证实验,也在安排之中.在美国进行GP-B卫星计划后,探测引力波的LISA计划受到广泛的关注.空间的物理学将在促进重大学术成果和开拓新的技术发展两方面不断取得进展.

关键词 微重力科学 基础物理 流体物理 燃烧学 材料科学 生物技术

Physics in space

HU Wen-Rui[†]

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract In recent years fundamental physics in a microgravity environment has attracted much attention from theoreticians in the international community, and has been given the name of fundamental physics in space. Furthermore, microgravity science has gradually become known as physics in space amongst the space agencies of the chief space countries. However, physics in space has not changed the contents of microgravity science. As the International Space Station nears completion, its member countries are working hard to schedule the microgravity science missions, and important results should be obtained before 2016. On the other hand, plans for space tests on the theories of gravity and general relativity on board special satellites are under way. After the GP-B satellite experiment by NASA, the LISA program for space measurement of gravitational waves aroused broad interest. Physics in space will certainly make great strides in both promoting important scientific achievements and in developing high technology for applications.

Keywords microgravity science, fundamental physics, fluid physics, combustion, materials sciences, biotechnology

1 引言

当一个空间飞行器环绕地球以第一宇宙速度自主飞行时,我们可以选择一个(局部)惯性参考系,

其原点位于空间飞行器的质心位置.如果不考虑大

* 本文由第316次香山科学会议(主题:空间的物理学)上的发言整理而成,文章引用了会议简报的一些总结内容,谨此说明
2008-05-28收到

[†] Email: wrhu@imech.ac.cn

气阻力、光辐射压力、质心偏离引起的各种扰动力, 则空间飞行器中物体受到的地球引力与运动离心力抵消, 物体处于“失重”状态, 或者说物体处于微重力水平中. 所谓“微重力”是指该处的有效重力水平为地球表面重力水平的 10^{-6} . 在实际的绕地球飞行器中, 有效重力水平与频率相关, 低频时达到 10^{-3} , 高频时优于 10^{-6} . 除了地面的落塔、抛物线飞行的失重飞机和可达十几分钟的微重力火箭外, 用于微重力实验的空间飞行器有返回式卫星和不返回卫星、载人飞船、航天飞机和空间站. 各种载人空间飞行器不可避免人的干扰, 飞行器中的有效重力很难达到微重力水平, 而验证引力理论的高分辨率空间实验需要非常低的飞(femto, 毫微微)重力至阿(atto, 微微微)重力环境, 一般需要发射专门的基础物理卫星.

随着载人空间活动的发展, 人们需要进一步认识微重力环境中的物质运动规律, 从而发展了微重力这种极端环境下的学术领域——微重力科学. 在微重力环境中, 地球重力的影响极大地减弱, 控制地面过程的浮力对流、沉淀和分层以及由重力引起的静压梯度都极大地降低, 表面张力和润湿等作用变得突出. 从上世纪七八十年代以来, 微重力科学主要研究微重力流体物理、微重力燃烧、空间材料科学和空间生物技术. 近十余年来, 微重力条件提供的高精度物理环境吸引了一批理论物理学家, 他们希望利用空间的微重力环境能更好地检验广义相对论和引力理论以及低温原子物理和低温凝聚态物理的许多基础物理前沿问题. 这样就形成了微重力科学的一个新领域——空间基础物理. 近来, 人们常常把这些微重力科学的领域统称为空间的物理学, 它是利用微重力环境来研究物理学规律, 以区别于在地面重力环境中的物理学. 要指出的是, 中文的“空间的物理学”和“空间物理”是两个不同的概念, 后者主要研究太阳系等离子体的运动规律和行星科学, 而不涉及基础物理的前沿问题.

2 空间基础物理

2.1 广义相对论验证和引力理论^[1]

引力质量 m_g 和惯性质量 m_i 相等的(弱)等效原理是广义相对论爱因斯坦强等效原理假设的基础^[12]. 有文献记载的弱等效原理验证始于牛顿的摆实验, Eotvos 的扭称实验更为精确, 现代的月-地激光测距实验则检验了强等效原理^[12]. 到目前为

止^[12], 弱等效原理的实验精度 $\eta = 2 | m_g - m_i | / (m_g + m_i)$ 已达 10^{-13} , 在地基实验中已再难提高. 现在的一些引力理论认为, 将测量精度提高到 10^{-15} 以上有可能揭示广义相对论的问题, 具有很大的学术价值, 这只能在空间微重力条件下才能实现^[2]. 国际上蕴酿多年的“等效原理的卫星检验”(STEP)计划, 试图将弱等效原理的实验精度提高到 10^{-18} . STEP 计划一直没有获得美国的立项经费支持, 现在的立项经费就更加困难了. 目前欧洲一些国家正在争取安排 Mini STEP 计划, 其实验精度为 10^{-15} ; 法国的小型卫星(MicroScope)计划于 2010 年发射, 拟在 10^{-15} 精度上检验弱等效原理^[13].

引力探测-乙(Gravity Probe-B, GP-B)计划是美国空间局主持的计划, 由美国斯坦福大学 GP-B 小组负责. 该计划的主要任务是验证广义相对论的空间弯曲和拖曳效应, 即验证时间和空间因地球大质量物体存在而弯曲(测地效应)和大质量物体的旋转拖动周围时空结构发生扭曲(惯性系拖曳效应). 用 4 个旋转球体作为陀螺仪, 地球引力拖曳会影响球体的转轴. 用飞马星座中的一颗恒星校准陀螺自转轴的方向, 用望远镜测量“测地效应”. 通过球体转轴进动 0.000011 度, 探测“惯性系拖曳效应”. GP-B 卫星于 2004 年 4 月发射, 2005 年 9 月终止数据采集. 原预计 2006 年夏公布结果, 但是, 由于电场等因素影响了球体的方位, 仍需对其他影响进行研究. 现正在加紧分析真正有效的时空信号数据, 并尽快宣布观测结论. 初步结果显示, 较显著的“测地效应”从数据中完全可见, 正在完全证实广义相对论的道路上前进; 刚刚看到“惯性系拖曳效应”的端倪. 实验结果似乎验证了广义相对论的理论, 人们正在期待着最后宣布的科学结果^[3].

引力波是广义相对论理论预言的现象, 40 年前声称在地面测量到高频引力波, 激起引力探测的热潮. 低频引力波只能在空间探测. 欧洲空间局和美国空间局联合推进空间探测引力波的“激光干涉全球天线”(LISA)计划, 它的探测源是 10^8 太阳质量的黑洞, 相应的频率是 10^{-3} — 10^{-1} Hz. LISA 计划由相距 500 万公里等边近三角形的三颗卫星组成, 每颗卫星分别有 2 个悬浮的试验质量, 位于激光器平台的前端. 引力波传到卫星环境中, 将引起试验质量微小的位移, 通过激光干涉方法测量小于纳米量级的位移, 推演出引力波的存在. 为了验证 LISA 计划的关键技术, 将于 2010 年发射 LISA Pathfinder 卫星, 而 LISA 计划预计在 2019 年以后发射. 引力波探测

的成功不仅可以验证广义相对论理论的预言,还将开辟引力波天文学,具有极大的重要性.欧洲空间局将 LISA 计划列为中、远期的首选项目,美国空间局“超越爱因斯坦”计划两大卫星之一的“大爆炸观测台”卫星也是探讨测量中频(0.1—1.0 Hz)引力波.空间引力波探测的学术重要性由此可见一斑.

我国空间科学的发展需要研讨引力理论,研究卫星实验的方案,大家正在集思广益.中国科学院理论物理研究所张元仲及其他专家联合提出 TEPO 计划,建议在 10^{-16} 精度内验证弱等效原理和在 10^{-14} 精度内验证新型的二维等效原理;华中科技大学罗俊等人提出 TISS 计划,希望利用高精度空间静电悬浮加速度计将检验牛顿引力的反比定律精度提高 3 个数量级.中国科学院紫金山天文台倪维斗的计划是希望探测低频(5×10^{-6} — 5×10^{-3} Hz)引力波;中国科学院应用数学研究所刘润球则关注空间的中频(10^{-2} — 10^0 Hz)引力波探测.这些方案都还在蕴酿过程中.

2.2 空间冷原子物理和原子钟研究

激光冷却和玻色-爱因斯坦凝聚(BEC)曾分别于 1997 年和 2001 年获得诺贝尔物理学奖,它们是当代物理学最活跃的前沿领域之一. BEC 有时也称为物质的第五态,它是 1925 年爱因斯坦预言的物质状态,即当气体温度低于其极限温度时,所有冷原子都聚集在最低量子能态上,表现出玻色子的特征.作为一种新的物质状态,它包含着许多新的基本物理规律,等待人们去探索,诸如物质波及其相干性、低温极限(10^{-15} K)、量子相变等.另一方面,它蕴育着许多重大的应用前景,诸如原子激光、高精度时标等.微重力环境可以更好地降低气体的温度,改进谱线的宽度和稳定性,提高系统的信噪比,从而为研究提供更好的条件.欧洲空间局的空间 BEC 研究也正在安排当中.

作为该领域的一个重要应用项目,空间冷气体原子钟的研制受到重视.地面通过激光冷却和冷原子喷泉效应,可以使冷气体原子钟的精度达到 10^{-16} .而在微重力环境中,则可以使冷气体原子钟的精度提高一个数量级,从而在军事和民用上产生极大的价值.欧洲空间局和美国国家航空和空间署都将空间冷原子钟研究作为国际空间站的重要研究项目.

中国科学院上海光学精密机械研究所王育竹在地基的 BEC 研究中取得很好的成果^[4],正在准备研

制空间的超高精度冷原子微波钟,精度可达 10^{-17} ;华东师范大学马龙生提出进行空间高精度光钟研究的建议,精度可达 10^{-18} .

2.3 低温凝聚态物理

凝聚态物质在极低温条件下会表现出许多特异的性质,成为物理学的新热点.微重力条件可以实现极小的静压梯度,可以提供更高精度的物理学实验条件,从而在更高精度下验证理论和揭示新的规律.美国喷气推进实验室在航天飞机上完成了液氦在临界温度附近(纳度的精度内)的比热奇异性实验,初步验证了二阶相变的重整化群理论^[1].科学家们提出了一批空间实验课题,诸如超流氦相变动力学,连续相变的普适性,气-液临界点的尺度规律,约束于不同几何形状和尺度的液氦性质,相图特殊点附近氦混合物的性质,约束和边界效应,非平衡相变,分形结构和图样形式,临界现象,超流体的流体动力学,量子固体等.这些课题大都需要超低温条件,因而需要空间大型制冷设备,耗资巨大.美国已暂停这方面的研究,中国在短期内还难于安排相关的空间实验条件.

3 微重力流体物理

微重力流体物理是微重力科学的重要领域,它是微重力应用和工程的基础,人类空间探索过程中的许多难题的解决需要借助于流体物理的研究.在基础研究方面,微重力环境为研究新力学体系内的运动规律提供了极好的条件,诸如非浮力的自然对流,多尺度的耦合过程,表面力驱动流动,失重条件下的多相流和沸腾传热,以及复杂流体力学等.可以引入静 Bond 数 $B_0 = \rho g l^2 / \sigma$ 或动 Bond 数 $B_d = \rho g l^2 / (\sigma'_{\tau} + \Delta T)$ 来分析重力作用和表向张力作用的相对重要性,其中 ρ , σ , g , l 分别是流体密度、界面的表面张力、有效重力加速度和特征尺度, $|\sigma'_{\tau}|$ 和 ΔT 分别是表面张力梯度和特征温差. Bond 数小于 1 时,表面张力的作用会大于重力的作用,这要求小的尺度、或小的重力加速度、或小的密度差,对应于小尺度过程、微重力过程、或中性悬浮过程^[5].

3.1 简单流体的对流和传热

具有界面的流体体系普遍存在于自然科学和工程应用中.研究热毛细对流的规律,对于空间材料加工、生物技术、燃烧等过程中热毛细对流控制都有重

要意义,并对地面电子装置的热控制,食品加工过程,化学工程微电子机械系统(MEMS),薄膜等小尺度的流动问题也有指导作用.微重力环境中流体的晃动、流体的运动与固体结构的相互耦合是航天工程中经常遇到的问题.对微重力环境中简单流体的传热和传质过程,人们主要研究毛细系统中临界现象和浸润现象,热毛细对流的转捩过程和振荡机理,液滴热毛细迁移及相互作用规律等方面.流体管理研究也是微重力工程中的重要课题.

3.2 多相流的传质和传热

微重力气/液两相流动与传热研究的主要对象包括两相流动的流型、沸腾与冷凝传热、混合与分离等现象,对我国载人航天技术(如航天器热与流体管理系统、空间站与深空探测器等大型航天器动力系统、载人航天器环控生保系统以及空间材料制备与空间生物技术实验等)的发展有直接的应用价值.在微重力环境中,重力作用被极大地抑制甚至完全消除,更能凸显气、液、固相间的传递机制,便于更深刻地揭示其流动与传热机理.借助于微重力气液两相流动与传热的深入研究,对我国实现能源战略需求和地面常重力环境中的石油、化工、制造等相关技术开发与应用也有重要指导意义.

3.3 复杂流体

复杂流体是一种分散体系,它指的是具有一种或几种分散相的物质体系,也有人称之为软物质.在重力条件下,复杂流体的许多行为特征会受对流、沉降、分层等干扰,而微重力条件则有助于研究在地面上被重力作用所掩盖的过程,特别是分子间的相互作用力.微重力复杂流体研究包括:胶体的聚集和相变研究,悬浮液和乳状液的稳定性研究,复杂等离子体的结晶研究,气溶胶的稳定性和聚集行为研究,对颗粒体系本征运动行为的研究,临界点现象的研究;以及材料制备、石油开采和生物流体的相关问题研究.随着人类深空探测活动的展开,对不同重力场中分散体系物质的操作与运输的要求,以及对其运动规律认知的需求十分迫切.空间科学实验不仅能够使我们获得新的科学知识,而且其科学成果对于地面材料及器件制备工艺的创新具有重要指导意义.对复杂流动现象的研究在材料设计中起到了切实的作用,如对复杂流体自组织现象的研究成果已经应用于纳米结构材料和器件的研制.近年来,复杂流体(软物质)的力学和物理学,接触角、接触线和浸润

现象等与物理化学密切相关的领域也越来越受到关注^[6].

3.4 近期的空间实验

随着国际空间站的逐步安装,国外微重力空间实验的项目将逐步进行.目前已经纳入计划中的项目有:

- 毛细流动:不同形状、介质、浸润性、流体管理;
- 热毛细对流;
- 流体的梯度涨落;
- Soret 系数测量;
- 近临界和超临界流体;
- 蒸发和冷凝过程:流体的热管理;
- 沸腾传热;
- 颗粒材料行为;
- 胶体和乳剂聚集和稳定性;
- 泡沫稳定性.

“十一·五”期间,国家安排了进行空间微重力科学和空间生命科学研究的“实践-10”卫星,将完成10项微重力科学的空间实验.这些实验包括空间热毛细对流、具有蒸发界面的对流、颗粒材料物理、沸腾传热、复杂流体的结晶等流体物理空间实验项目.同时,在载人航天工程第二阶段中,还要安排半浮区液桥、多液滴相互作用、复杂流体稳定性、多相流传热等空间实验项目.我国的微重力流体物理已有较好基础,将会做出较大贡献.

微重力流体物理所涉及的许多过程与微尺度流动中的过程有许多相似性,引起人们的兴趣.以中国科学院力学研究所国家微重力实验室为主的流体物理研究有不少建树,获得国际同行的好评.

4 燃烧科学

燃烧是一门古老的学科,而地面的燃烧过程都是和浮力对流密切耦合在一起的,给模型化研究增加了难度.微重力条件下基本上没有浮力对流的影响,为研究燃烧的化学反应过程提供了极好的机遇.1957年,东京大学Kumagai教授的0.5s落塔实验研究了乙醇棉球的微重力燃烧过程,开创了微重力燃烧的实验研究和利用落塔进行微重力实验的时代.落塔设施已成为进行微重力燃烧实验的有力工具.

微重力燃烧涉及了地面燃烧学的主要领域,美国国家航空和空间署将微重力燃烧作为重要的研究方向,欧洲和日本空间局也十分重视.几乎地面主要

的燃烧过程都进行了空间微重力实验,诸如预混气体燃烧、气体扩散燃烧、液滴燃烧、颗粒和粉尘燃烧等,并研究了典型气体环境中燃料表面的点火和传播、流动过程与燃烧的耦合等,发现了一些新现象,例如燃烧的分散球状分布等.在许多微重力燃烧过程中,除了通常的吹熄极限,还有辐射损失引起的冷熄极限,这只能在微重力环境中才能观测到.微重力燃烧的研究除了具有重大的机理意义以外,还在于:利用对燃烧过程的深刻理解,改进地面燃烧过程的效益,利用对燃烧产物的进一步分析,改进地面燃烧产物污染环境.中国的能源将在较长时间内以煤作为主要燃料,应加强微重力煤燃烧的研究^[7].

载人飞行器的安全防火是微重力燃烧的重大课题,自从阿波罗1号飞船在地面着火,烧死3名宇航员后,美国国家航空和空间署就把防火安全作为载人航天的首要问题.特别是今后的长期载人飞行任务,使防火任务更加严重.需要研究典型气体氛围下沿固体表面的着火条件、火焰传播过程和熄火条件;还要研究闷烧的各种条件.除进行相应的模拟研究外,还要进行大量的落塔实验,对逐个上天的非金属材料 and 某些金属材料进行典型气体环境下的燃烧实验.同时,还需要制订载人飞行器的防火规范.美国和俄罗斯各自建立了他们的载人航天材料筛选和防火规范,但载人航天器中的着火事件仍有发生.因为载人航天器内存在着火的条件,问题不可能完全解决.特别是在载人探索火星等长时间飞行任务中,防火规范还是一个需要进一步探讨和研究的课题^[8].

中国科学院工程热物理研究所和力学研究所进行了一些微重力燃烧的研究工作.近年来,清华大学和华中科技大学等煤燃烧重点实验室开始关注微重力的煤燃烧研究.在“十一·五”期间,非金属材料燃烧、导线的烧燃、煤的燃烧等项目已列入空间实验计划,应能取得好的结果.

5 材料科学

空间材料科学曾是微重力科学中耗资最大的领域,材料科学各分支领域的学者都希望在空间微重力环境中去研究凝固过程的机理和制备高质量的材料.空间微重力环境是制备、研究多元均匀块体材料的最佳场所,其主要特征就是消除了因重力而产生的沉降、浮力对流和静压力梯度.由于浮力减弱,密度分层效应的消失,可以使不同密度的介质均匀地混合.由于空间微重力环境中静压力梯度几乎趋于

零,因而能提供更加均匀的热力学状态.这种条件更有利于研究物质的热力学本质和流体力学本质,探索、研制新型的材料和发现材料的新功能.目前空间材料科学研究的重点是利用空间实验的成果改进地面材料制备技术,以及利用空间微重力环境测量高温熔体的输运系数.在国际空间站的欧洲、美国和日本压力舱中,都有材料研究的专柜.

利用微重力环境进行材料科学研究,不仅可以发展材料科学理论,还可以发展新型材料和新型加工工艺.微重力环境可以制备出一些比地面更好的高品质材料,空间材料科学的进展及空间材料制备的技术可以改进空间和地面的材料加工,特别是为地面的晶体生长和铸造技术提供帮助.空间材料科学涉及的领域有金属材料、半导体材料、光学晶体材料、纳米材料和高分子与生物医学材料等^[9].

我国空间材料科学目前面临相当大的困难.克服这些困难,目前一方面可充分利用国际合作(俄罗斯、日本),另一方面,我们需要面对现实,以地基实验为主,在加强国际合作的同时,扩大该领域的研究团队,同时该学科需要进一步凝炼学科方向和科学问题,今后应该创造条件开展空间材料科学研究.我国空间材料科学在林兰英先生的倡导和指导下,一批学者积极参与,取得了重要学术成果.“十一·五”期间,我国的SJ-10卫星计划和载人航天工程(第二阶段)计划中都分别安排了多工位材料实验炉的空间实验,应能做出一批较好结果.

6 生物技术

空间生物技术促进了生物技术的定量化和模型化研究,促进了新的实验方法和仪器设备的发展,具有重要学科意义.另一方面,空间生物技术有很强的应用背景,可以改善人类的健康和发展生物产业,是空间商业计划的新方向.目前,空间生物技术的主要研究方向是蛋白质单晶生长和细胞/组织的三维培养.

晶体衍射法仍然是当今研究生物大分子结构和功能的主要方法,获得高质量的大尺寸蛋白质单晶就是一项艰难的任务.溶液法生长蛋白质晶体受到许多因素的影响,微重力环境可以更有效地提供扩散为主的输运环境以及实现失重条件下的无容器过程和较好的界面控制,使空间的蛋白质单晶生长显示出许多优点.各国空间局都安排了大量的空间蛋白质单晶生长实验,而且取得很大进展.但并不是所

有空间实验都取得好结果,也有不少不成功的实验。机理研究表明,蛋白质晶体生长过程取决于溶质的运输过程和非线性的界面动力学过程;对于不同的生长条件,可以从实验和理论上具体分析这两个过程的作用。由于蛋白质晶体生长过程的复杂性,重力因素只是生长过程中诸多因素之一,机理研究还有待进一步完善。国际上有人认为液/液体系较好,也有人认为液/气体系较好。大家都在争取更多的空间实验,以取得更多的积累。空间蛋白质单晶生长已成为有重要应用前景的商业计划项目^[10]。

在微重力环境中实现了三维的细胞/组织培养,开创了一片新天地。地球表面的重力作用,使细胞培养器中的附壁效应十分显著,一般都需要外加旋转效应。旋转效应引起的剪切力作用于被培养的细胞,将改变其性能,使被培养细胞或组织的性能发生较大变化。人们在地面利用三维旋转器来模拟某些微重力效应的同时,还进行了大量空间细胞/组织培养的实验,包括从细菌到哺乳动植物广泛类群的细胞。空间的生物反应器实验的结果表明,失重条件下的三维细胞培养极大地改善了地面细胞的培养条件,并已获得了一些很好的成果。随着空间生物反应器实验工作的进展,空间细胞/组织培养已经显示出重要的商业应用前景^[11]。

中国科学院生物物理研究所是我国从事空间蛋白质单晶生长研究的主要单位,动物研究所和力学研究所在细胞三维培养方面做了许多研究工作。

目前,国际空间活动正在调整探索方向,微重力研究遇到经费紧缺的困难。今后十余年的基础物理大型探测集中于 LISA 计划,一些中、小型计划正在考虑之中。国际空间站将于 2010 年完全建成,欧洲空间局的哥伦布舱和日本的希望舱段已分别与国际

空间站主体对接。今后十年将是国际空间站出成果的时期,预计会完成一大批空间微重力实验。我国空间科学规划将微重力科学列为持续发展领域,我国载人航天工程第二步将建空间实验室,第三步将建空间站。今后 15 年将是我国微重力科学发展的好时期,我们要抓紧机遇,安排好计划,努力做出好成绩。

参考文献

- [1] 倪维斗. 相对论性引力理论的实验基础及测试. 见科学前沿与未来(第 10 集),香山科学会议主编. 北京:中国环境科学出版社,2006. 第 159 页
- [2] 李杰信. 追寻兰色星球. 北京:航空工业出版社,2000
- [3] Everitt F F, Parkinson B. Gravity Probe B—Post Flight Analysis. Final Report, NASA, Oct. 2006
- [4] 王育竹,王笑鹏. 物理,1993,22:16[Wang Y Z, Wang X J. Wulx Physics, 1993, 22:16(in Chinese)]
- [5] 胡文瑞,徐砾昌. 微重力流体力学. 北京:科学出版社,1999
- [6] 孙祉伟. 力学进展,1998,28:93[San Z W. Advances in Mechanics, 1998, 28:93(in Chinese)]
- [7] 张夏. 力学进展,2004,34:507[Zhang X. Advances in Mechanics, 2004, 34:507(in Chinese)]
- [8] 张夏. 力学进展,2005,35:100[Zhang X. Advances in Mechanics, 2005, 35:100(in Chinese)]
- [9] Regel L L. Materials Processing in Space, New York & London, Consultants Bureau, 1990
- [10] 毕汝昌. 空间科学学报,1999,19(增刊):9[Bi R C. Chin. J. Space Sci., 1999, 19(supplement) 9(in Chinese)]
- [11] 丰美福. 空间科学学报,1999,19(增刊):17[Feng M F. Chin. J. Space Sci., 1999, 19(supplement) 9(in Chinese)]
- [12] 张元仲. 物理教学,2002,24(9):2[Zhang Y Z. Physics Teaching, 2002, 24(9) 2(in Chinese)]张元仲. 物理,2008,37(9):643[Zhang Y Z. Wulx Physics, 2008, 37(9) 643 (in Chinese)]
- [13] <http://microscope.onera.fr/mission.html>

封面故事

封面右上图为空间甚低频观测阵列对日地空间的可监测范围示意(引自《中国空间科学项目中长期发展规划》和 NASA 网站),左下图为神舟飞船示意图。右上图表示了日地之间的联系,大部分太阳风会绕过地球,但是也有一些太阳风高能粒子进入地球空间环境,从而可能产生灾害性空间天气。