在空间天气领域我所经历的国际合作

——访中国空间科学学会理事长，中国科学院国家空间科学中心原主任 吴季

空间天气是自人造卫星发射以来，在传统学科空间物理基础上逐步发展形成的一个新领域。空间天气研究往往需要从太阳到地磁全链条上的观测数据，特别需要尽可能多地获得对同一事件在不同时间和地点的原始观测数据，以及更多的国家和机构的参与。因此，空间天气是一个典型的需要大量国际合作的研究领域。我自1997年以来开始进入这个领域，主要工作是跟踪、分析和判断学科前沿的发展，实施大型观测项目特别是卫星观测项目，组织、协调和推动国际合作。这里对我在该领域经历的国际合作工作做一个简要的回顾。

1. 与欧空局合作的地球空间双星计划

1997年9月我开始担任国家空间科学中心副主任，分管空间物理及其相关空间环境预报和探测技术方面的工作，不久就遇到了一次与欧洲空间局深度合作的机会。

1997年初刘振兴院士与其合作者北京大学濮祖荫教授等一起讨论，如何在地球空间实施一个多点的探测计划。当时欧空局四颗卫星的星簇计划（CLUSTER）刚在1996年经历了发射失败，国际上对地球空间的探测处于低谷。经过讨论，这个集中了当时中国国内空间物理领域大部分科学家的小组，提出了一个双星的探测计划，即地球空间双星计划。该计划的两颗卫星分别为赤道星和极轨星，都是大椭圆轨道，但是轨道高度比欧洲的星簇计划距离地球更近，使得卫星每转一圈都要进出辐射带两次，因此需要卫星具备较强的抗辐射能力。此外，数据传输和测控也挑战很大，因为其轨道高度是我国当时最高的。

1997年11月我们迎来了由欧洲空间局科学部主任Roger Bonnet带队的星簇计划代表团的访问。

刘振兴院士和我商量，拟在接待该代表团的交流会上报告双星计划的设想，希望得到欧洲同行的认可和支持。

刘振兴院士是欧空局星簇计划在中国的联合研究者（Co-I），负责星簇计划中国数据中心的建设。欧空局代表团到访的主要目的就是通知中方，星簇计划已经正式恢复，将由俄罗斯的联盟号火箭于2000年分两次发射。因此，各国数据中心的工作也需要正式恢复。这次会谈的主要目的是听取我们数据中心的筹备工作，在报告完数据中心的工作后，刘振兴院士报告了双星计划的设想。我当时是会议的主持人，刘院士的报告后，Roger Bonnet提议会议中间休息一下。得到我的同意后，欧空局代表团的几个核心人员走出去在楼道里商量了起来。会议再次开始后，Roger Bonnet立即发言，他询问欧空局是否能够参加中国的双星计划，具体参加的方式是向中方提供CLUSTER上多个科学载荷的正样发射备份件，搭载到中方的双星上，同时希望探测数据共享。这种合作方式也是国际上通用的科学计划合作方式，提供搭载机会，同时探测数据共享。对中国来说，在当时的条件下，几台欧洲（英国、奥地利、法国、德国，以后又增加了爱尔兰）的探

测仪器都是非常先进的，我们自己还无法研制和生产。增加这几台欧洲仪器，可以极大地提升我们的探测能力。更为重要的是，这些仪器就是星簇计划上探测仪器的备份件，因此与星簇计划的探测能力一致，无需交叉定标，就可以实现对地球空间的六点探测。会后我们认真研究了欧空局的建议，并立即回复欧空局，中方同意搭载并开展联合探测。

双星计划1997年初提出，11月确定与欧空局星簇计划合作，经历了两年多的论证和设计后于2000年立项。特别需要提及的是，星簇计划发射前欧空局对合作的迫切需求大幅提高，1999年Bonnet曾为此专程访问我们，说明了该合作对欧空局的必要性和紧迫性。对于中国而言，当时最大的问题是在航天领域从来没有立项过空间科学卫星计划。幸运的是，1998年政府机构改革成立了新的国防科工委，下设国家航天局，负责空间科学领域的国际合作。在中国科学院和国家航天局的支持下，我们从1999年10月开始正式启动了双星计划的方案设计和可行性论证，重点关注两颗卫星轨道的设计，即如何才能使我们的两颗卫星和星簇计划最大程度的配合，从而实现六点联合探测。2000年3月我带队到欧空局参加双星计划可行性方案的联合评审，2000年7月航天东方红卫星公司正式启动双星计划卫星工程方案设计，2000年底双星计划得到国防科工委的正式批准立项。

对于中国而言，双星计划不但是第一个空间科学计划，还是第一个与发达国家密切合作的航天计划。为此，我们设立了双方的联络人，我作为中方联络人负责与欧空局的对接。此外，我们还成立了联合的科学工作队以及下设的数据实施组。在工程研制方面，我们每年召开一次双边会议沟通和协调研制进度。2003年春天，北京受到了非典型性肺炎的疫情冲击。经过双方的共同努力，欧洲的探测仪器按时交付参加整星的测试，确保了两颗卫星分别于2003年12月和2004年7月按时发射。

双星计划的科学意义在于，在星簇计划和双星计划之前，人类没有开展过对地球空间的多点探测。然而，地球磁层的整体结构（矢量磁场强度的分布）随时都会受到来自太阳的影响。在太阳发生大的日冕物质抛射（CME）事件并且该事件能够到达地球空间时，地球磁场的波动最大可达30%~40%，也会引起电离层、高层大气的剧烈变化。没有太阳爆发时，地球磁力线在磁尾区也会偶尔发生重联，进而引起地球磁层亚暴、辐射带的高能粒子通量的增加以及电离层的扰动。一颗卫星的单点探测无法确定这些现象的变化量和规律，因为无法确定卫星是恰好飞越过边界层还是磁场本身发生了波动。在双星计划提出之前，由于星簇计划的四颗星是以一个编队形式飞行，星与星之间的距离在几百到数千km之间变化，不能同时获得磁层其他区域的数据。特别是，由于星簇计划四颗星的轨道是极轨，因此对赤道面的磁层状况缺乏实时的探测数据加以配合。1996年星簇计划第一次发射时，德国航天局曾经有一个Equator-S计划可以与星簇计划配合。这个小卫星1996年成功发射入轨，在没有CLUSTER配合的情况下孤独地运行了5个月，后来遇到了一次大的太阳爆发引起的空间天气事件，星上计算机受损使得寿命终止。因此，星簇计划在决定再次上马后，寻找类似的联合探测计划就成了欧洲星簇计划科学团队的重点。也就是在此时，中国提出了双星计划，正好可以和星簇计划相互配合开展联合探测。我们的双星计划不但有一颗赤道轨道卫星，还有一颗比星簇计划轨道要低很多的极轨卫星。虽然说是双星计划和星簇计划六点联合探测，在宏观尺度上讲实际上是三点，其中一个点就是星簇计划的四颗卫星，可以进行微观尺度的多点探测。这样一种配合使得这个国际合作成为地球空间探测史上的一个非常重要的联合探测计划。

到2010年，双星计划和星簇计划联合探测已经取得了很多科学成果，发表了超过200篇科学论文，发现了磁尾区域的大尺度横向波动现象，以及极隙区的通量管事件等。此外，双星计划在技术上的一系列创新还获得了国家科技进步一等奖。双星计划与星簇计划的合作团队，在国际上获得了国际宇航科学院（IAA）的团队成就奖。

2. 与俄罗斯建立空间天气联合研究中心

2000年夏天，中国科学院国际合作局为了落实国家领导人在访问西伯利亚时的指示精神，组织了一个针对俄罗斯科学院西伯利亚分院的考察团。我参加了这个考察团，访问了该分院的20多个研究所，其中在访问位于伊尔库斯克的日地物理研究所的时候，该所所长日列布佐夫（G.Zerebtsov）院士积极建议与中方开展紧密的合作。考虑到在地域上我国与西伯利亚处于近似的地理时区，但是在纬度上高低互补，特别是他们在空间环境的地面观测方面具有悠久的历史和深厚的技术能力，我们商定建立一个联合的研究中心，使双方相关研究单位的研究人员可以互访并开展合作研究。

2000年12月底，我们双边举办的第一次空间天气研讨会在伊尔库斯克召开。当地气温即使在白天也是零下28ºC，地面覆盖着厚厚的积雪。从北京直飞伊尔库斯克的航班由西伯利亚航空公司值飞，飞机落地后，时任伊尔库斯克州副州长的日地物理研究所所长日列布左夫院士到机场亲自迎接我们。我们一行20余人由贵宾通道入境，乘坐该所派出的专车入住了日地物理研究所的招待所。

研讨会期间，我与日列布佐夫所长签署了建立联合研究中心的合作协议。双方拟定对互访人员提供经费支持，每年轮流主办双边研讨会。为了激励双方加强合作，我们还设立了最快论文奖，奖励第一篇合作发表的研究成果。到2010年该实验室成立10周年时，双方合作成果丰硕，共举办了10次双边研讨会，参加研讨会和合作研究的人员在双方都涉及了多个研究机构，共发表合作研究成果100余篇。目前该实验室的合作仍然在持续之中。

3. 与俄罗斯联合开展对火星空间环境的探测

2005年10月，我们收到了一封来自俄罗斯科学院空间研究所的邮件，邀请我们搭载他们正在推动的火卫一土壤返回计划（Phobos-Grunt），可以将中国的一颗科学小卫星带到地球空间。收到邀请后，我考虑，如果他们去火星，我们为什么不能一起去火星呢？当时，中国的深空探测刚刚起步，对月球的探测也才刚刚开始，采用搭载发射的方式去火星，可以大大加快中国进入深空探测的步伐。此外，我们分析了国际上历次火星探测任务，主要都是针对火星表面的，对火星大气和空间环境的探测非常少。当时的空间天气研究正在向太阳和太阳系其他行星关系的研究拓展，研究火星空间环境也是空间天气学科发展的前沿之一。然而我们了解到，俄罗斯运载的余量只有110 kg，因此只能根据这个约束条件来设计轻小型的科学载荷，而探测空间环境的载荷一般都比较小，正好适合这个研究方向。这就是后来的“萤火一号”中俄联合火星探测计划。

作为一项科学探测计划，科学目标是最主要的部分。其中，我提出的一个重要科学目标，就是与俄罗斯探测器合作，对火星的大气和电离层开展联合的掩星探测。这个探测的实施过程是在两个探测器进入火星轨道并分离之后，从俄罗斯“福布斯-土壤”探测器上发射两个频段的无线电波，由我们的小卫星接收其信号。当两个探测器的连线，也就是无线电电波射线切过火星大气和电离层时，电波受大气和电离层密度随高度变化的影响，将发生弯曲，且不同的波段将出现不同的弯曲和延时。通过对接收信号强弱变化和延时的分析，就可以反演出火星大气和电离层物理参数的垂直剖面曲线。这将是人类首次如此详细地探测火星上的大气和电离层，特别是当电波连线分别切过火星正午和子夜两个特殊的地理时间上空时，其科学数据将反映火星大气和电离层变化的两个极端情况，这对全面了解火星大气和电离层的特性非常重要。

此外，国家空间科学中心的科学团队还提出了另一个重要的科学目标。因为国际上的其他计划都没有对火星周边的空间环境进行过磁场和粒子的同时探测，因此不了解粒子的运动方向和能量来源。如果在小卫星上同时配置磁强计和粒子（包括电子和低能热离子）探测仪，就有望揭示更真实的火星空间环境，并测得从火星表面逃逸的氧粒子的流量，从而判断火星上水的流失总量，推算出“10亿年前火星表面上到底有多少水？”这一目前仍然存疑的重大科学问题。

但是这个想法并不一定能够得到俄罗斯方面的支持，我们需要做更深入的协商工作。2006年初，我和另一个研究人员访问了莫斯科。在和俄罗斯科学院空间研究所讨论时，我们的科学目标和探测方案得到了他们的高度认可和积极支持。但是在和Phobos-Grunt探测器的总体责任单位——拉沃什金航天联合体讨论时，他们并不是十分相信中国可以研制出只有100 kg重的火星探测器，因为那将是全世界最轻的火星探测器。最后，经过不断的讨论，他们终于认可了我们方案的可行性，同意提供110 kg的搭载重量给我们，并将我们一同带到火星轨道后再释放。

然而，后来的事情大家都知道了。首先是由于俄方研制进度的拖延，错过了2009年10月的窗口，直到2011年11月才发射。其次在发射后，由于上面级发动机没有启动，致使整个探测器没有飞出地球空间，两个月后坠毁在太平洋中。

虽然“萤火一号”没有实现我们奔向火星的梦想，但是它使中国的空间科学家再次体验了通过自主设计的科学目标，登上国际竞争与合作的大舞台的过程。此外，在“萤火一号”之前，中国还没有一个专门研究火星的团队，甚至还没有一本关于火星的教科书，哪怕是翻译的都没有。“萤火一号”之后，我们不但组建了相关的科研团队，翻译出版了关于火星的教科书，还在之后提出了一系列新的科学目标和探测方案，为今后的自主火星探测培养了人才队伍和奠定了基础。

4. 推动与欧空局的深度合作项目——SMILE

相互提供搭载，仅仅是双边合作的一种形式。更为紧密的合作是共同遴选项目，以及更加深入的技术领域的合作。由于中国和欧空局在地球空间双星计划上的成功合作，双方建立了相互信任的良好关系。因此，自2004年双星计划成功发射后，双方一直通过年度双边会的形式，讨论如何开展进一步的深度合作。

2013年，在一次中欧的双边研讨会上，我和时任欧空局科学部主任阿尔瓦诺·吉门内（Alvaro Gimenez）讨论商定，采取通过举办双边研讨会的形式，征集和遴选合作项目。2014年，我们举办了两次由双方科学家参与的项目征集研讨会。第一次在中国成都举行，双方科学家可以各自报告自己的想法和项目建议。但是第二次在丹麦哥本哈根举行研讨时，我们只接收联合申报的项目建议报告。之后，我们发布了联合项目征集指南，并收到了13份正式的由双方科学团队联合申报的项目建议书。2015年初，双方的技术团队对这13份建议书进行了技术可行性筛选，选出4项技术可行性高的项目提交给一个由双方资深科学家组成的联合科学委员会。联合科学委员会对这4个项目进行了排序，最后SMILE项目以其创新的科学探测仪器和突出的科学目标胜出，成为中国和欧空局自双星计划之后的又一个深度合作的科学卫星计划。

SMILE卫星的全称是太阳风–磁层相互作用全景成像卫星（Solar wind Magnetosphere Ionosphere Link Explorer）。卫星主载荷是一台具有宽视场观测能力的软X射线成像仪，采用类似龙虾眼一样的多通道掠射引导孔和大面积探测器实现宽视场的探测能力。卫星运行于远地点在极区上空的大椭圆轨道上，居高临下对磁层顶进行成像。由于太阳风与磁场内中性氢的相互作用，将诱发软X射线的辐射。这些辐射曾被运行于低地球轨道上的X射线天文望远镜观测到，但是对X射线天文望远镜而言，这些辐射是噪声。SMILE将第一次通过成像的方式对磁层顶对太阳风的响应进行观测，是继对磁层采用多点探测之后的更高层次的空间环境观测，对认识磁层变化特性和空间天气研究具有重要意义。

SMILE卫星及其载荷目前正在研制之中，中国和欧洲将分别研制科学载荷和卫星平台的一部分，并最终在欧空局进行整星测试，预计于2023年在法属圭亚那的库鲁发射场用欧洲火箭发射升空。

5. 与巴西合作建立南美空间天气联合实验室

2006年，我第一次访问了巴西空间研究机构（INPE），了解到他们那里也有和我们类似的空间物理研究团队及与空间天气相关的应用研究。2011年，中国科学院提出海外发展计划，我在INPE的支

持下适时推动与他们合作成立了中国科学院南美空间天气实验室/中国–巴西空间天气联合实验室(China- Brazil Joint Laboratory for Space Weather, CBJLSW)。成立该实验室的主要目的是希望将我们沿东经120°子午链建设的地面观测设备和北美与南美在西经60°附近的地面观测设备连成一个空间环境监测子午圈。这个国际子午圈的想法并不是我提出的,但是有了南美空间天气实验室之后,就可以使当时还没有连成圈的最后一段,也就是南美这一段的观测站实际建立起来。巴西在空间领域的研究地位完全可以统筹南美的观测数据,使他们共享我们在东经120°附近的观测设备,可以形成更大范围和互补地理位置的观测数据共享。实验室自2014年8月年成立以来,已经取得了良好发展。我也提议在巴西建立一个类似于我们在中国四川稻城建立的干涉式太阳射电望远镜,该望远镜的设计基础是基于我本人提出的圆环阵列被动微波成像理论。圆环阵列被动微波成像理论具有UV覆盖完整、基线冗余分布合理、成像质量高的特点,可以对太阳爆发后进入行星际的CME实施高时空分辨率的连续观测。目前正由INPE牵头开展论证该望远镜的选址。如果该望远镜能够建立,将与我们在稻城的望远镜实现地理位置和时区的良好互补。

6. 在ILWS和COSPAR多边合作中的工作

与日共存计划(Living With a Star,LWS)是美国NASA在2000年提出的一个关于日地关系的国家计划,包括他们所有日地关系的科学任务,如SDO, STEREO以及Parker太阳探测器等。当时由于国际空间机构间协调组(Inter-Agency Consultant Group, IACG)的实际工作已经结束,亟需其他计划予以延续。经过讨论,该协调组接受了将LWS提升为一个国际计划的建议,由NASA、欧空局(ESA)、日本空间研究所(ISAS)、俄罗斯空间研究所(IKI)和加拿大航天局(CSA)组成指导委员会,形成了国际与日共存计划(ILWS)。中国作为一个普通成员与其他二十几个国家共同参与其中。

2003年以后,由于中国的地球空间双星计划对日地空间天气研究的贡献,在ILWS轮值主席欧空局科学部赫门·奥普根诺斯(Hermann Opgennooth)的建议下,ILWS同意吸收中国作为新的指导委员会成员。2005年我代表中国作为ILWS指导委员会的正式成员,第一次参加了ILWS在印度果阿举行的年会。

2010—2012年,我担任ILWS轮值主席。在此期间,我认为我所做的最大贡献是引导各成员国讨论空间天气研究对卫星和地面观测的最重要的需求是什么,包括物理参数、图像和观测点的空间布局,也就是讨论卫星和地面观测技术的发展路线是什么。这个讨论导致了我们向COSPAR提出开展一个空间天气路线图研究的建议,并积极推动了该项研究。由COSPAR和ILWS共同领导的该路线图研究成果于2015年正式发表。

7. 结语

自地球空间双星探测计划开始,中国的空间天气观测和研究得到了快速发展。其中国际合作的因素发挥了重要的作用,特别是与欧洲以及俄罗斯的合作,这些合作是从理论研究到观测技术的全面合作,使得合作双方都受益匪浅。

空间天气研究需要从太阳到地球表面全链条,从高能粒子到热等离子体全能谱段,从X射线到低频射电全频谱段,以及全球各个地理位置和地理时间全天时、全天候的观测数据。任何单一国家都不能依靠自己的力量完全获得这些数据。因此,空间天气领域的国际合作是十分必要和不可或缺的。中国空间天气研究通过国际合作取得了长足的进步和发展的事实,更加证明了这一点。

我自己在相应的工作岗位上,为能够见证这一发展并做出了一些贡献感到非常的欣慰。特别是欧洲空间天气周(ESWW)组织在2017年将International Marcel Nicolet Medal for Space Weather and Space Climate奖颁发给我,在此表示衷心的感谢。希望更多的管理者和研究者能够认识到在这个领域里国际合作的重要意义,继续将利用更加广泛数据的空间天气国际化研究向前推进。