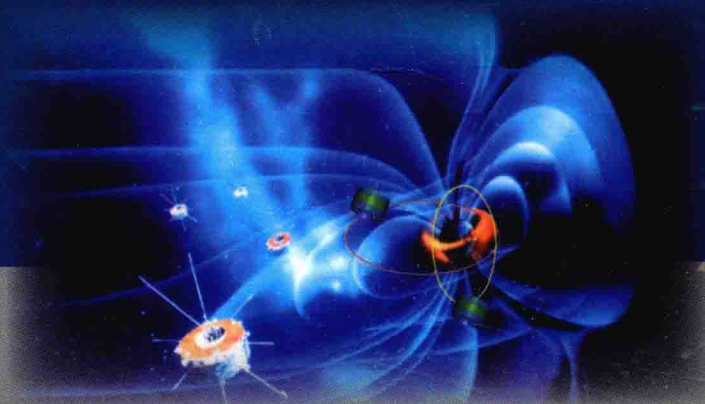


ADVANCES IN
SPACE PHYSICS

空间物理学进展

(第五卷)

史建魁 叶永烜 刘振兴 主编



科学出版社

空间物理学进展

(第五卷)

ADVANCES IN SPACE PHYSICS

史建魁 叶永烜 刘振兴 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书内容作为《空间物理学进展(第四卷)》的补充,主要包含以下内容:第一章为刘振兴院士有关传记及我国地球空间双星探测计划的内容;第二章至第四章为有关太阳探测、太阳风和太阳高能粒子方面的研究内容;第五章至第七章为有关地球磁层方面的研究内容;第八章至第十六章为本书的重点,包括磁层-电离层耦合、中高层大气和电离层方面的研究内容;第十七章为火星研究方面的内容。

本书可供有关高等院校的教师、研究生以及空间物理和空间探测方面的研究工作者学习或参考。

图书在版编目(CIP)数据

空间物理学进展. 第5卷/史建魁,叶永烜,刘振兴主编.—北京:科学出版社,2015.10

ISBN 978-7-03-045949-7

I. ①空… II. ①史…②叶…③刘… III. ①空间物理学-研究进展 IV. ①P35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 241190 号

责任编辑:张井飞/责任校对:韩 杨

责任印制:肖 兴/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年10月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015年10月第一次印刷 印张:26 1/4

字数:518 000

定价:238.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前言

这本最新的《空间物理学进展(第五卷)》是整个系列的第五篇章,正巧在充满回忆的2015年出版。其第一篇为刘振兴院士的自述,让我们了解前辈们如何在70年前遍地灰烟的抗日战争环境下,一切从零开始,求知与成长,之后在自己的土地上建立起鼎盛的空间科学事业。我们为此而感动和万分敬佩。

本书文章的很大部分都是得自这个宝贵的传承。接着三篇是介绍有关太阳风越来越精细的研究、前途万里的太阳射电频谱成像观测和在日冕附近高能粒子的传播过程研究。随之是描述利用双星(Double Star)、Cluster 和 Themis 等多点卫星进行有关地球磁层结构、磁层亚暴和磁场重联探测研究的新结果。本卷一个重要特色是接下来的包括了有关磁层-电离层耦合过程、极光、高层大气波动、大气光化学、中层大气内的高空短暂发光现象的分析研究。实验是科学之母,我们很高兴地看到本书随后的中国空间科学工作者关于电离层 TEC 和闪烁的观测研究,利用南极中山站、北极 Svalbard、欧洲非相干散射雷达(EISCAT)、国际超级双子激光雷达网(SuperDARN)的观测和研究,以及在海南岛的探空火箭实验研究。这些都取得了长足进步。展望未来,火星电离层将是未来中国火星探测的重要方面,本书有关火星大气逃逸的文章也是一篇重要的文章。

《空间物理学进展(第五卷)》顺利出版,再次体现了一片蓬勃的学术交流氛围和具有多样性的研究课题。地球和宇宙的今天和将来都是属于全人类的。我们必定会努力在空间物理研究中推陈出新,挑战高难度课题,立足国际前沿,更有力地推动全世界的和平合作。如大儒钱穆先生所提的命题:“中国文化对人类未来可有的贡献”。让我们空间科学工作者也为此尽一份力!

非常感谢中国国家自然科学基金(编号:41274146,41474137)和中国国家重点实验室专项基金对本卷编写和出版的支持。在《空间物理学进展(第四卷)》征文时,许多学者表示愿意投稿。由于篇幅限制,当时我们按照刘振兴院士的想法,一部分学者的文章收集在了第四卷中,随后立即组织出版第五卷刊登其余学者的文章。再次向大家的热情支持表示衷心的感谢。

叶永烜

目 录

前言

第 1 章	我学习和研究的回顾以及地球空间双星探测计划.....	1
	刘 振 兴	
第 2 章	太阳风研究的新进展	25
	涂传谕 何建森	
第 3 章	太阳射电频谱成像观测	65
	颜毅华	
第 4 章	太阳高能粒子的横向传播研究	80
	秦 刚	
第 5 章	地球磁尾高速流中的偶极化锋面研究	88
	邓晓华 周 猛	
第 6 章	磁层中关键区域磁场结构及其动力学效应.....	101
	沈 超	
第 7 章	亚 Alfvén 剪切流对磁场重联过程的影响	123
	马志为 李灵杰	
第 8 章	磁层电离层电动耦合数值模拟研究.....	164
	吕建永 赵明现	
第 9 章	中间层和热层金属层的研究进展.....	202
	窦贤康	
第 10 章	高空短暂发光现象	212
	陈炳志 许瑞荣 苏汉宗	
第 11 章	地球电离层之扰动发电	255
	黄健民	
第 12 章	中高层大气波动研究	279
	张绍东 黄春明 黄开明 龚 韵 甘 泉	
第 13 章	极区电离层观测研究	302
	胡红桥 刘瑞源 刘建军 张北辰 杨惠根	
第 14 章	基于卫星信号测量的电离层研究	325
	甄卫民 於 晓 欧 明	

第 15 章	极区电离层“等离子体云块”研究	352
	张清和 张北辰 杨升高 王 勇	
第 16 章	低纬地区(海南)电离层 E-F 谷区探测研究	379
	史建魁 王 铮	
第 17 章	火星离子逃逸和沉降——磁异常对大气逃逸的影响	393
	李 磊 张艺腾 谢良海 冯永勇	

第1章 我学习和研究的回顾 以及地球空间双星探测计划

刘振兴

中国科学院国家空间科学中心,北京 100190

1.1 求学、立志与科研创新

1.1.1 艰难的中小学学习

1929年9月14日,我出生在山东省昌乐县营子村一户农家,是一对双胞胎中的弟弟。出生时,我的父亲常年在外做工,当家的是我的爷爷,一位方圆几十里颇有名气的老中医。在6岁之前,我们无忧无虑地享受着成长的快乐,从爷爷那里常得到一些自然与社会中的常识及做人的道理。在玩乐之余,我们也能帮着大人做一些事,如帮爷爷做一些蜜饯为原料的药丸,也偶尔偷个嘴儿。我们从小就对各类自然现象表现出了强烈的好奇心与求知欲。每逢打雷闪电,我就问奶奶雷电的来历。在帮母亲喂蚕的过程中,跟大孩子去村前小河抓鱼时,我对蚕与青蛙的发育过程也十分好奇。从小养成的这种好奇心,对我后来在科学方面的观察和探索兴趣至关重要。在我6岁那年爷爷过世,家庭收入变得微薄,我和哥哥也经常加入全家的劳作之中,如经常起早去菜园里为萝卜抓虫,使得幼年的我经受了重要的锻炼。

后来我们上了本村的小学,1938年1月,日本侵略军侵占昌乐城,小学被迫撤销,之后我们兄弟俩又在私塾学习了两年。1940年,县教育局派人到我村办起了新式学堂,并统一配发抗日教材。学堂的老师叫赵立平,经常激励学生的爱国精神,培养民族气节。因使用抗日教材,学堂后来被鬼子突袭,赵立平老师被捕,从此不知所踪,开办不到一年的学堂自然也停了课。后来,我们转到了村里新办的类似于辅导班性质的学堂补习此前缺失的课程,准备报考高小。在此期间,我们经历了惊魂一劫。有一次鬼子大扫荡,母亲带着我们兄弟俩前往姑妈家避难,在半路上,我们亲眼见到同行的一位老人被流弹击中,当即殒命。多年来,一想起这事,我就心惊胆颤,对日本鬼子恨得咬牙切齿。

1941年的下半年,我们考上了离家十几里的高小。高小的校舍属一位叫王懿德的实业家所有。他在青岛经营企业,但很关心高小的发展,时常在回乡探视时为师生们作一番讲话,鼓励孩子们努力学习,将来成为国家的有用之材。他为我们兄

弟所向慕,从那时我们就树立了一个初步的理想:好好学习,长大之后像他一样发展实业,成为对人民和社会有用的人才。在这种理想的支撑下,我们兄弟俩刻苦努力,到高小毕业时,成绩已在班里遥遥领先。

高小毕业之后,我们哥俩都考上了昌乐中学就读简易师范,因为简易师范对家庭困难而成绩优异的学生有生活补助。哥哥上的是昌乐中学总校简师班,我上了离家一二十里的昌乐中学山唐分校简师班。简易师范的学习并不顺利,常受日寇骚扰,甚至连在教室里上课都难以得到保证。鬼子来袭时,大家都带着马扎到树林里去上课。就在这种环境下,我依然努力学习。由于成绩优异,我每月都能得到52斤小米的奖励。简易师范毕业后,我们哥俩在家干了几个月的农活,又在附近村子的小学教了几个月的书。之后,我们都考入潍县师范学校。没多久,由于战乱,学校解散,我们又都回了家。

这时已到了1948年,为了继续求学,我们兄弟俩在一个做烟草生意的姑表哥带领下,奔赴480公里以外的青岛见到了父亲。到达青岛后不久,我们就进入青岛市辖临时中学就读。1949年6月,青岛解放,临时中学随即被合并入青岛市第四中学(青岛四中)。青岛四中办学正规,师资力量也相对雄厚,学习、生活条件都很好。我们兄弟俩的成绩在四中仍然名列前茅(图1.1)。



图 1.1 1950 年 1 月,我(后排右三)与青岛四中同学合影,前排右三为哥哥刘振隆

1950年,为提前报考大学,我们与几位同学租了一间小阁楼,自学物理、数学等课程,并复习此前所学各科。经过一个多月的努力,我们兄弟俩双双考入山东大学。

1.1.2 专业波折的大学教育

出于“学好数理化,走遍天下都不怕”的朴素想法,我们哥俩考入山东大学物理系。与我们一同从青岛四中考入山东大学的一位同学上了电机系,经过一阶段学习后,他给我们讲了该系的专业学习情况;面向生产生活中的实际问题,常做些制图之类的设计。这令我们逐渐心生向往。于是我们以家境贫寒为由申请休学一年,目的是复学后选择电机系,毕业后成为实业家,像王懿德先生那样,成为对人民和社会有用的人才。休学后,我们哥俩在不同学校各自任教。一年后我们复学,但由于学校关于专业调整的政策已变,我们未能如愿调入电机系,带着苦恼,不得已只能重新回到物理系就读。

在物理系学生选专业时,学校新聘请的青岛观象台台长王彬华为学生作了一场关于鼓励学生报选气象专业的动员。青岛观象台当时隶属海军,王彬华为军官身份。当天,身着呢子军装,头戴军帽,英武帅气的王彬华在学生们面前谈到如何满足国防需要而进行天气观测和预报时,我们兄弟俩立刻为“呼风唤雨”的气象学所吸引,认为这是一个培养对国家、人民和社会有用人才的专业,于是毫不犹豫地选择了物理系气象专业组。

不久,物理系气象专业组被合并到了南京大学气象系。在南京大学就读期间,我经过刻苦努力,很快成绩就在班级名列前茅。由于成绩突出,我被初定为保送赴苏联留学的第一人选。但由于身为工人的父亲此前有一次在填履历表时,误将自己家庭“成分”填为地主,我在保送赴苏的政审中因“出身”问题而被淘汰,只得抱憾毕业。

1.1.3 师承大师的副博士学位攻读与研究

1955年大学毕业,我们兄弟俩也就此分开。哥哥被分配到沈阳中心气象台工作,我被分配到中国科学院地球物理研究所任研究实习员,从此聚少离多。

刚参加工作,我就接触了仰慕已久的科学大师,见到了著名气象学家、地球物理学家赵九章等多位科学家。1955年11月,我参加了钱学森先生关于用辩证唯物论指导科研工作的报告会。这使我感到无比荣幸,并对我以后的科学精神、科研思想和科研方法等方面都产生了深远的影响。

1957年,我通过全国统考被录取为赵九章先生的副博士研究生。就读副博士研究生之初,我的选题方向为近地层大气湍流结构特性。1958年5月,中国科学院组织了一个包括多学科的西北固沙考察队。在赵九章先生的建议下,我参加了这次固沙考察。从北京出发经内蒙古到甘肃,我第一次看到西北一望无际的沙漠,大风刮过,沙粒飞起,天昏地暗,农田被掩盖,部分铁路被阻塞。这使我深刻认识到西北治沙的重要性和必要性。在接下来的定点考察中,我被分到中国科学院宁夏

中卫沙坡头固沙站。我阅览了该站积累数年的风沙观测资料,认识到风沙与近地层湍流有密切关系,于是用数据分析和理论相结合的方法,研究了沙的传输过程和不同风力与方向情况下沙丘的运动规律。在不到两个月的时间内就写出了关于我国西北风沙问题的两篇研究论文,后经赵九章先生推荐,在《科学记录》杂志上发表(刘振兴,1958;1959)。这是首次对我国西北的风沙问题进行观测和理论相结合的研究,对当时的固沙工作有着一定的参考价值(1987年,作为赵先生研究团队的一员,我因近地空间环境的探测和理论研究获得了国家自然科学三等奖)。

1957年10月,苏联人造地球卫星发射成功。以赵九章先生为首的著名科学家向国家提出了我国也要研制人造卫星的建议。经批准后,中国科学院成立了“581”组开始着手准备卫星研制工作。赵先生为主要负责人,根据实际情况,他建议从火箭探测开始。1959年3月,赵先生将我调入“581”组,承担火箭探测数据处理工作。此后在我的建议下,我的副博士研究生学位论文由近地层大气物理研究方向改为高空大气物理方向。赵先生还特地把我推荐给著名的空气动力学家郭永怀先生,请他指导我的课题研究。经过近两年的努力,我用稀薄气体动力学方法,完成了学位论文《流星与空间大气相互作用》,并得到了郭永怀先生的好评。

1959年,赵先生根据当时空间物理发展的趋势,在地球物理研究所成立了磁暴研究组,并亲自指导这个组的工作。该组是我国磁层物理学发展的摇篮。研究生毕业以后,在赵先生的安排下,我从高层大气组转入了磁暴研究组,从事磁暴期间地球辐射带变化的研究。从此,我又从高层大气跨入了磁层物理和太阳风的研究领域。带着地球辐射带研究的基础,1967年参加了我国第一颗卫星“东方红一号”空间粒子环境模拟试验的任务,所研究制定的空间粒子环境参数标准,对卫星的研制、发射和运行安全起了一定的作用。在此基础上,我负责撰写了《人造地球卫星环境手册》一书中的粒子辐射部分(《人造地球卫星环境手册》编写组,1971)。

1968年,恩师赵九章先生含冤去世,这使我悲伤欲绝。次年10月,我随空间物理及探测技术研究所到西安工作。当时研究所的主要工作是探测空间粒子环境,包括地球辐射带和同步高度区粒子环境,为下一步卫星研制提供空间环境数据。我和另一同事负责探测器数据处理和分析工作。在“东方红一号”卫星上天后不到一年时间内,广大科研人员积极努力,于1971年3月成功发射了科学试验卫星“实践一号”。作为“实践一号空间探测”项目的参与者及《人造地球卫星环境手册》一书的主要作者之一,我于1978年获得全国科学大会奖。

从1975年起,我开始在国内开展太阳风研究。从太阳风的卫星探测数据中,发现太阳风中存在着湍流现象,而且与低层大气的湍流有些相似之处。在这一启示下,我将研究低层大气湍流的基础和方法,推广到太阳风湍流的研究中,从而得出了太阳风湍流的普遍表达式,理论与探测结果符合得很好(刘振兴,1980)。在研究中,我逐渐认识到太阳风、磁层、电离层和高层大气之间有密切的耦合关系,于是

写了题为《太阳风-磁层-电离层-高层大气间的耦合过程》的论文(刘振兴,1980)。1987年,“太阳风向磁层和电离层中的传输”项目获中国科学院自然科学三等奖。

1.1.4 从刘氏模型到涡旋诱发重联理论

改革开放后,对外交流的大门打开,1980年5月至次年9月我作为访问学者赴美国马里兰大学进行木星磁层理论模式等方面的研究。木星磁层模型理论是木星磁层物理中的重要课题。当时主要有两个模型用来解释木星磁层结果的观测现象:磁异常模型与磁盘模型。此前公认の木星磁盘模型假定整个磁层是随着木星共转,磁盘面处处与磁赤道平行。但这两个假定与后来的探测事实并不相符。我根据美国“旅行者”飞船对木星磁层探测的最新数据,分析认为木星的快速旋转对木星磁盘结构有着重要的影响,从而提出了一个新的木星磁层磁盘模型(Liu, 1982)。其主要结果载入了剑桥大学出版的《木星磁层物理》(Dessler, 2002)一书中,被称为“刘氏模型”。该书主编美国著名空间物理学家 A. J. Dessler 教授如此评价:“这项研究表现出重大的发展,可能成为这方面的经典著作之一。”这项研究于1987年被中国科学院推荐为国家级重大科技成果。回国后,我先后被评为副研究员、研究员、博士生导师、研究室主任等;1984年,被评为我国第一批有突出贡献的中青年专家。

1987年,我再度赴美半年,先后在阿拉斯加大学、斯坦福大学、加利福尼亚大学洛杉矶分校进行访问、讲学与合作研究(图1.2)。在此期间与阿拉斯加大学教授李罗权等合作,提出了磁层亚暴的等效电路模型(Liu et al., 1988)。该模型用



图1.2 1987年3月,在美国访问期间在阿拉斯加“圣诞老人之家”的留影

等效电路方法首次考虑了磁层亚暴发生和发展的全球过程,将国际上长期争论的两种观点“太阳风直接驱动过程”和“卸载过程”统一起来,解释了磁层亚暴期间磁层和电离层电流系统的耦合过程和变化规律。这项研究受到了国际同行的高度关注,所发表的文章被多次引用。

1986~1988年,我首次提出了流体涡旋诱发磁场重联(VIR)的新概念,建立了涡旋诱发重联理论模型。我们还将VIR理论应用于能量传输事件(FTE),建立一个三维的FTE模型(Liu and Hu, 1988; Liu et al., 1990)。

在VIR理论之前,国际上已有几个瞬时磁场重联模型。这些模型都认为,两个磁场相反的等离子体区在两边垂直流推动下被向内压缩,最后在存在反常电阻的扩散区产生磁场重联。我认为,这些过程在磁尾电流片区是容易出现的,但在大部分磁层顶边界层区流场基本上是与磁力线平行的。因而,在这些区域,上述模型的条件与实际情况不相符。其次,在磁层顶边界层区存在着较强的速度剪切,从而会形成流体涡旋。于是我将动力气象学中的一些物理现象与磁场重联联系起来进行思考,如大气中的切变线、低涡和台风形成等,从中得到了新的启示。经上述认真思考和交叉研究,我们首次提出了流体涡旋诱发磁场重联的新机制,建立了一个新磁场重联理论,为研究磁场重联开辟了一条新的途径。

涡旋诱发磁场重联的物理图像可概括为:在同时存在着流场切变和磁场切变的等离子体区,由于K-H不稳定性的发展,首先形成流体涡旋。由于流体涡旋对磁场的扭曲作用,磁力线变形、打结,最后产生磁场重联并形成磁涡旋。我冲破三十多年来磁场重联研究的传统观念,首次提出流体涡旋磁场重联的新机制,磁流体涡旋管的新概念(在磁流体涡旋管中存在着场向电流和开尔文波),新的涡旋-撕裂模不稳定性(这种不稳定性可激发磁场重联),以及涡旋诱发重联能量传输事件模型(能解释FTE的观测现象)。在可压缩等离子体中,发现在VIR过程中可产生不同类型的激波。

在1994年举行的国际磁层顶物理学术讨论会上,涡旋诱发重联与李罗权、傅竹风1985年提出的多X重联模型,以及M. Scholer与D. J. Southwood于1988年提出的时间变化的单X重联模型共同被公认为通量传输事件的三个基本模型。关于涡旋诱发重联的研究成果获1993年中国科学院自然科学一等奖和1995年国家自然科学三等奖。2001年,我又因“磁层能量传输与释放研究”获国家自然科学奖二等奖。同年获何梁何利基金科学与技术进步奖。

1.1.5 从严要求的人才培养

在研究生学习期间,我感觉到赵九章先生在培养学生方面具有超前的创新意识,注重把理论与实践相结合,把国家的需求与研究方向相结合,并能积极开展学

术讨论和交流,注重不同学科的交叉。这些对我培养研究生产生了重要的影响(图1.3)。



图 1.3 2014 年 9 月 14 日,我的部分学生为我庆祝 85 岁寿辰

在培养研究生过程中,我常以赵先生为榜样,重视三严学风和树立高尚的科学道德,注重培养学生的创新意识和独立开展科学研究工作的能力。有句话说得非常好,“授人以鱼,不如授人以渔。”特别是在与欧洲航天局(ESA,也称欧空局)的 Cluster 科学数据系统(CSDS)合作和双星计划中,我把学生和青年研究者带到了国际合作的前列,开展了实质性的国际合作,使得他们在工作中,不计个人利益,勇于承担,独当一面,并取得了优异的成绩。这为双星计划的成功实现起到了非常重要的作用。

在我培养的 30 名硕博士研究生中,大部分现已是有关研究所的研究员、博士生导师,或者大学教授、副教授。他们有的去了美国、加拿大、澳大利亚和欧洲的一些国家工作,但大部分仍在国内,工作在空间科学和空间科学技术研究的领域,在国家的航天事业和空间科学事业中做出了优异的成绩。在此希望我的所有学生和我培养过的年轻人继续努力,无论在哪里,无论在哪个研究领域,都为国家、为人类做出更大的贡献。

1.1.6 积极推动空间科学探测与研究

1. 与 Cluster 合作打开中欧空间科学合作之门

20 世纪 90 年代,日地空间物理的探测和研究进入了一个新的时期,国际上各空间机构开展了空前规模的合作。国际空间协调组(IACG)制定了“国际日地物理”(ISTP)计划,这项计划的一个核心内容是发射包括欧洲航天局的由 4 颗卫星组成的 Cluster 计划。1990 年 7 月欧洲航天局发出通告,邀请各国的空间科学家参加其 Cluster 科学数据系统并进行合作研究。

1990 年 11 月,我代表中国科学院空间科学与应用研究中心向欧洲航天局递交了一份提案。欧洲航天局认为我方在基础研究方面有一定的优势,其科学评审委员会于 1992 年 2 月审议通过了我方的提案(当时共通过了 3 个提案:美国提案、中国提案和匈牙利提案)。该委员会决定同意中国科学院空间科学与应用研究中心加入欧洲航天局 CSDS 系统,邀请我代表中国出席欧洲航天局 1992 年 6 月在荷兰举行的第六次卫星科学工作会议讨论有关合作事宜。1993 年 11 月,中国与欧洲航天局双方在北京正式签署了中欧科学研究合作协议。

根据协议成立了中国 Cluster 数据和研究中心及中国 Cluster 科学工作队,我任这两个机构的主任和中方首席科学家。中国 Cluster 科学数据和研究中心为欧洲航天局 Cluster 科学数据系统的正式成员。这是我国第一次与欧洲航天局开展规模较大和层次较高的国际合作项目,为此后开展的合作奠定了良好基础。

1992 年,欧洲的“空间科学城市”法国图鲁兹市授予我市长勋章。2000 年,国际空间研究委员会(COSPAR)和印度空间研究组织联合向我颁发了 Vikram Sarabhai 奖。欧洲航天局为了表彰为 Cluster 所做出的工作,于 2001 年和 2005 年两度给我颁发了“对欧洲航天局 Cluster 做出突出贡献”奖励证书。2010 年欧洲航天局又给我颁发了国际合作奖。直到现在,中国 Cluster 科学数据中心仍然在连续获得 Cluster 4 颗卫星上的探测数据,这对于我国空间物理研究和空间天气模型与预报都发挥着重要的作用。

因在空间物理研究中所做出的工作,我于 1995 年当选为中国科学院院士。

2. 大胆创新,提出地球空间双星探测计划

自从 1957 年第一颗人造地球卫星成功发射以来,50 多年来的人类空间活动事实表明,地球空间环境探测对空间知识的创新、空间天气预报、航天活动和国家安全、空间开发和利用以及国民经济建设等起着越来越重要的作用。为了推动地球空间探测研究的发展,国际上提出和实现了一系列的空间科学探测计划。我国是一个空间大国,但还不是空间强国,在空间探测方面与空间强国相比还有相当大

的差距,这正是限制我国空间科学发展的主要因素之一。因此亟须发展我国的空
间探测和科学研究,迅速提高我国空间科学研究的水平。当时我们已经与欧洲航
天局 Cluster 计划开展了合作,但还缺乏自主的空间科学探测与研究计划。

为此,我于 1997 年 4 月提出了地球空间双星探测计划(简称“双星计划”,英文
名称为“Double Star Program”,简称“DSP”或“DS”)(Liu et al., 2005)。我提出双
星计划后,与中国科学院空间科学与应用研究中心(现国家空间科学中心)以及北
京大学的同行进行了讨论,大家都表示支持。双星计划的基本想法是将地球磁层
最重要的空间区域用两颗卫星覆盖来开展探测,形成独立的地球空间探测卫星系
统。同时双星计划又与欧洲航天局的 Cluster 卫星探测计划(Escoubet et al.,
2001)内外相互配合,开展地球空间的“六点”协调探测。

地球空间双星探测计划是我国第一个空间科学探测计划,是我方为主的我国
与欧洲航天局开展合作的重大国际合作探测计划。双星计划取得了一系列的科学
探测与研究成果。图 1.4 为我与 P. Escoubet 博士在巴黎签订有关双星计划合作
方面的合作文件。



图 1.4 2003 年 9 月,我与 Cluster 项目科学家 Philippe Escoubet 博士在巴黎

1.2 地球空间双星探测计划

1.2.1 地球空间双星探测计划简介

1. 双星计划的组成、科学目标和卫星轨道

双星计划由两颗卫星组成,一颗为赤道卫星,即探测 1 号(代号 TC-1),另一颗
为极轨卫星,即探测 2 号(代号 TC-2)。两颗卫星代号中的“TC”为“探测”二字的

汉语拼音“Tan Ce”的简称(Liu et al., 2005)。

简单地说,双星计划的科学目标是探测研究地球空间人类未探测的重要空间区域,研究地球空间场和粒子扰动变化的不同时空尺度的物理过程。

双星计划中赤道星(TC-1)的近地点约 700km,远地点约 $13R_E$,倾角约 28° ;极轨星(TC-2)的近地点约 550km,远地点约 $7R_E$,倾角约 90° 。

图 1.5 为双星计划的两颗卫星轨道在地球空间的示意图。从图 1.5 以及卫星的轨道参数可以看出,这两颗卫星的轨道覆盖了当时人类还未探测的地球空间区域。这两颗卫星之间的配合,可以同时探测地球空间暴所发生的重要区域——地球的磁尾和极区,并研究地球磁层和电离层的耦合过程。

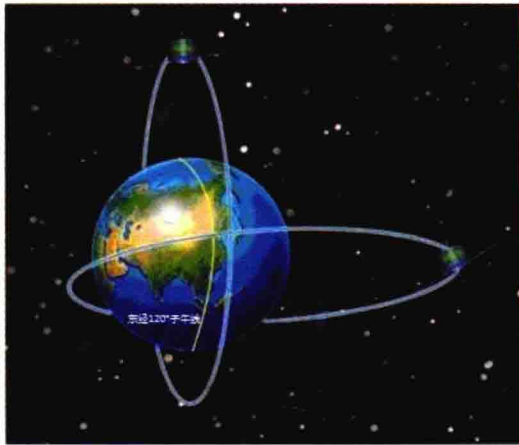


图 1.5 双星计划的两颗卫星轨道在地球空间的示意图

2. 双星计划的科学探测仪器

双星计划的两颗卫星上共有 16 台科学探测仪器。TC-1 卫星上载有 8 台,分别为磁通门磁强计(FGM)(Carr et al., 2005),电子与电流仪(PEACE)(Fazakerley et al., 2005),热粒子分析仪(HIA)(Rème et al., 2005),电位主动控制仪(ASPOC)(Torkar et al., 2005),电磁场波动分析仪(STAFF)(Cornilleau-Wehrlin et al., 2005),高能质子探测器(HEPD),高能电子探测器(HEED),重离子探测器(HID)(Liu et al., 2005)。TC-2 卫星上也载有 8 台科学探测仪器,分别为磁通门磁强计(FGM),电子与电流仪(PEACE),低能离子探测器(LEID),低频电磁波探测器(LFEW)(Liu et al., 2005),中性原子成像仪(NUADU)(McKenna-Lawlor et al., 2005a),高能质子探测器(HEPD),高能电子探测器(HEED),重离子探测器(HID)。两颗卫星上的科学探测仪器如表 1.1 所示。

表 1.1 TC-1 和 TC-2 上的科学探测仪器一览表

TC-1		TC-2	
简称	仪器全名(中英文)	简称	仪器全名(中英文)
FGM	磁通门磁强计, fluxgate magnetometer	FGM	磁通门磁强计, fluxgate magnetometer
PEACE	电子与电流仪, plasma electron and current experiment	PEACE	电子与电流仪, plasma electron and current experiment
HIA	热粒子分析仪, hot ion analyzer	LEAD	低能离子探测器, low energy ion detector
ASPOC	电位主动控制仪, active spacecraft potential controller	NUADU	中性原子成像仪, neutral atom detector unit
STAFF	电磁场波动分析仪, spatio-temporal analysis of field fluctuation	LF EW	低频电磁波探测器, low frequency electromagnetic wave detector
HEPD	高能质子探测器, high energetic proton detector	HEPD	高能质子探测器, high energetic proton detector
HEED	高能电子探测器, high energetic electron detector	HEED	高能电子探测器, high energetic electron detector
HID	重离子探测器, heavy ion detector	HID	重离子探测器, heavy ion detector

在双星计划的科学探测仪器中,我方共研制了8台,包括2台高能质子探测器、2台高能电子探测器、2台重离子探测器、1台低频电磁波探测器、1台低能离子探测器;欧方共研制了7台,包括2台磁通门磁强计、2台电子与电流仪、1台热离子分析仪、1台电位主动控制仪和1台电磁场波动分析仪。我方和欧方合作研制1台,即中性原子成像仪。

3. 双星计划与 Cluster 的协调探测

双星计划与 Cluster 配合,形成了人类历史上第一个地球空间“六点协调探测”系统(Liu et al., 2005; Dunlop et al., 2005; Zong et al., 2008; Pitout et al., 2008)。图 1.6 给出了双星计划的两颗卫星与 Cluster 计划的四颗卫星协调探测示意图。

双星计划与 Cluster 计划的协调探测体现在如下三个方面:①双星计划上的主要科学探测仪器与 Cluster 四颗卫星上的相应科学探测仪器相同;②双星计划的卫星轨道与 Cluster 卫星的轨道相辅相成;③双星计划与 Cluster 计划在科学数