DOI：10.16418/j.issn.1000-3045.2001.04.002

学科发展

太空物理学的发展和瞻望*

刘振兴

（空间科学与应用研究中心 北京 100080）

摘要 概要评述了太空物理学的现状和发展前景，主要内容包括：20世纪太空物理学主要的发展成就；2001—2020年日地空间物理探测和研究的发展趋势和新举措；卫星、行星和恒星际探测的新创举；21世纪前20年我国太空间物理发展的设想。

关键词 太空物理学，发展，瞻望

太空物理学（也称空间物理学）是随着太空技术发展而迅速发展起来的一门新兴学科。1957年10月人造地球卫星的首次发射成功，开辟了人类探测太空的新纪元，极大地拓宽了人类认识宇宙的视野，提高了人类研究及开发利用太空的能力。太空探测是太空技术、太空开发和利用的基础。

1 20世纪日地空间物理的主要发展成就及发展趋势

1.1 人造卫星发射前日地物理发展的主要成就

近代日地空间物理研究，可说是从磁暴和极光成因研究开始的。早在20世纪初（1908）挪威科学家伯克兰（Birkland）在研究极光成因时，就指出极光是由外来的沿磁力线进入极区上空的电流引起的，从而提出了场向电流的概念，这对以后研究磁层和电离层间电耦合过程起了重要的作用。此后，他的学生史笃默（Stormer）在研究极光时计算了带电粒子在地磁场中的运动轨道，在此基础上，诺贝尔奖获得者阿尔文（Alfven）提出了带电粒子在地磁场中运动的引导中心近似理论，为以后研究辐射带粒子在地磁场中的运动规律建立了基础。

30年代，英国著名科学家贾普曼（Chapman）和他的合作者们开始研究磁暴形成理论。他们提出，太阳有时会发射出高导电的太阳微粒流（即现在所说的太阳风），这种太阳微粒流与地磁场相互作用，在地球周围形成一个“空穴”（即现在所说的磁层）。他们又提出，太阳微粒流可进入“空穴”形成环电流，认为这种环电流是引起地球磁暴的原因。贾普曼等提出的这些理论上的预言，为以后研究太阳风、磁层和磁暴做出了重要的贡献。1957年，阿尔

* 收稿日期：2001年5月25日

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

文提出太阳微粒流是磁化的，这种微粒流流过慧星时可形成慧星尾。1958 年帕克尔(Parker)提出太阳风是由日冕气体向外膨胀产生的，首次建立了太阳风理论。

1.2 人造卫星发射以来日地空间物理探测研究的主要成就

人造卫星发射以来的近半个世纪，日地空间物理的探测和研究的进展，大致可分为三个阶段。

1.2.1 普查阶段(50 年代末至 70 年代初) 这期间，原苏联和美国发射了大量的日地空间探测卫星。1958 年，美国探险者 1 号首次发现了地球辐射带，这是人造卫星上天以来的第一个重大发现。此后，对地球磁层和太阳风进行了普查，先后有一些新的发现，使人们对过去一无所知的地球磁层及太阳风和行星际磁场的基本特性有所认识。

在此计划基础上，卫星探测的大量科学数据和新的发现，推动了磁层物理研究的迅速发展。1961 年，阿克斯弗尔德(Axford)和亥耐斯(Hines)提出了太阳风和磁层相互作用的粘性磁层模型。同年，当吉(Pungey)提出重联磁层模型。这两个模型为以后的磁层研究建立了理论基础。此外，根据卫星探测数据，初步建立了稳态的磁层结构模型。

1.2.2 有组织和有计划的探测阶段(70 年代中期至 80 年代中期) 这期间，国际上开始注意从各层次孤立的探测研究发展到各层次间的耦合研究，组织了几个重要的国际太空物理探测计划，对推动太空物理发展做出了重要贡献。

(1) 1976—1979 年实施的国际磁层研究(IMS)计划。IMS 计划主要是探测和研究太阳风与磁层的耦合过程。其重要贡献，是证实了向阳面磁层顶边界层区的稳态重联过程；发现了瞬时重联产生的通量传输事件；发现了极光千米波辐射和电离层上行粒子事件；揭示了无碰撞激波的一些重要特性。

此期间理论研究也取得了大的进展，主要成就是：建立了几个磁层亚暴模式；提出了极光千米辐射理论；建立了几个瞬时磁场重联理论模型。

(2) 1981 年实施的动力学计划(DE)。DE 计划的主要科学目标，是探测研究磁层和电离层的耦合过程。这一计划推动了极光动力学及磁层-电离层-中高层大气动力学、光化学和电动力学耦合过程研究的发展。

1.2.3 日地系统整体探测研究阶段(80 年代中期至 90 年代末) 自 80 年代中期开始，国际上开始酝酿日地空间整体探测研究计划，结果形成了 1992—1996 年实施的、空前规模的国际日地物理(ISTP)计划。这个计划由 5 组核心卫星和 6 颗辅助卫星组成，主要科学目标是对日地系统整体变化的物理过程进行定量的了解，发展第一个日地系统整体模型的系统方法，推动对日地系统因果关系链最好的了解。这一计划的主要贡献，是利用多颗卫星的联合观测，第一次发现了日地系统链锁变化过程[1]。

此外对太阳的探测计划，发现了太阳大气的一些重要现象，如太阳冕洞和日冕物理抛射事件等。这些太阳事件，对地球空间环境有重要的影响。

1.2.4 太阳-行星空间物理的进展和主要成就

太空物理学分为两大分支：一是日地空间物理；二是太阳-行星空间物理。国际上一直对太阳-行星空间的探测非常重视。60 年代初开始，国际上即对内行星(包括水星、金星和火星)开始进行探测。70 年代初开始进行外行星(木星、土星、天王星和海王星)探测。到目前为止，太阳系中的 9 颗行星，除冥王星外，其余 8 颗行星都有太空飞船进行过探测。其中，还在火星上成功地实现了软着陆。

通过对地球以外 7 颗行星的探测，使人们对这些行星的磁层、电离、大气及行星的地形、地貌和地质等特性有了一些了解，对研究行星的起源、演化及生命起源等重大科学问题起了重要的推动作用。

1.2.5 发展趋势 总的来看，2000—2020 年国际上日地空间物理探测、研究的发展趋势是：(1)进一步开展日地系统整体联系过程的研究；(2)将地球空间环境和行星空间环境结合起来进行比较研究，了解地球空间环境未来的演化过程；(3)重视日地空间环境变化对航天活动、人类生存环境、人类在空间可居住性的研究；(4)在太空探测方面的发展趋势是：发展探测地球空间环境的小卫星星座探测技术；发展轻小型的场和粒子的探测仪器；发展集成

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的、轻小型的紫外、X 射线和中性原子成像仪器，发展抗辐射的加固包[2]。

2　21 世纪前 20 年，国际上在地球空间探测方面的举措

(1)在太阳和日球探测方面，发射靠近太阳(3 个太阳半径)的太阳探测器(Solar Probe)，了解日冕加热和太阳风加速过程及日冕物质抛射(CME0)和太阳风的产生机制；发射太阳极区成像卫星(Solar Polar Imager)，探测太阳高纬度的变化，对日冕物质抛射进行整体成像；发射太阳警戒卫星，监测太阳风扰动的三维结构、行星际激波的三维结构及日冕物质抛射在行星际空间的演化过程；发射日地关系观测器(STEREO)，追踪日冕物质抛射从太阳到地球的行踪，监测高能粒子加速的机制及其位置。

(2)在地球磁层探测方面，发射小型的磁层星座卫星(10—100 个)，分辨磁层的时空变化，研究磁层亚暴过程，磁层对流、三维电流体系和磁层能流的传输过程；发射磁层多尺度探测器，研究磁层顶边界层和磁尾离子体片区的磁场重联，磁层亚暴过程和大、中、小尺度的相互作用；发射立体的磁层成像卫星，进行整体磁层动力学的可视化观测，了解磁层亚暴的发展过程，跟踪磁层耦合链的因果关系。

(3)在中高层大气探测方面，发射电离层、热层、中层(ITM)动力学卫星，研究中高层大气和电离层质量、能量耦合的动力学过程；发射中层耦合卫星，了解中层大气的动力学和光化学过程及人为活动的效应，发射全球的电动力学卫星，研究磁层-电离层-低层大气间的电动力学过程。

通过上述的卫星探测，可全面了解日地系统联锁变化链的机理和因果关系。

3　卫星、行星和恒星际探测的新创举

21 世纪，人类对太空探测将有一些新的创举。人类将在月球上建成有生命保障系统的月球基地；登上火星，在火星上建立观测站，为开发利用火星作准备；飞出太阳系，对恒星际空间进行探测。

3.1　建立月球基地

月球探测具有重要的科学意义和开发应用前景。月球探测可深化人类对月球、地球和太阳系形成与演化的认识；月球可作为对地观测和深空探测的天然平台，在月球上建立对地监测站、天文观测站、深空探测前哨站和转运站及科学试验站；在月球上建立太阳能发电站，对核聚变燃料(^{3}He)进行开发；开发利用月球上的水冰，为人类在月球上的生存提供条件；为开发利用月球岩石和土壤中蕴藏的丰富矿产资源提供依据。预期在 2015 年前后人类可在月球上建成第一个有生命保障系统的月球基地。

3.2　人类登上火星

火星探测的主要目标是：探寻火星是否存在或曾经存在过生命；火星表面是否存在过大面积的水体及对两极冰盖和地下水进行估计；火星大气的形成、演化及天气和气候特征；火星磁层和电离层特征；火星表面的矿物，火星地质、地化和内部结构特性；探寻火星可能开发和利用的资源。

美国制订了 21 世纪前 20 年的火星探测计划，包括火星全球勘测者系列(其中又包括着陆器、巡视车、轨道器和探头)，火星表面台站，载人火星计划和火星样品返回地球探测器。美国计划每两年发射一次火星探测器。在 2010 年前后实施载人火星计划，在 2015 年前后发射火星样品返回地球探测器。欧空局计划在 2003 年发射“欧洲快车”火星探测器。

未来的火星探测，将采取“多快好省”和“一星多用”的方针，即将轨道探测、登陆器探测、巡视车探测和探头探测结合起来。

3.3　水星和木星探测

计划在 2002 年发射水星轨道器(200Km—10 000Km的椭圆极轨)。该探测器的科学目标是研究行星磁场的起源和性质，磁层的结构和动力学，磁层等离子与水星表土的相互作用，外层大气的来源和成分及水星表面成分，近太阳行星的生长及对太阳日冕和高能粒子的观测。

计划发射木星极轨道器(倾角 90°，1.05—30 个木星半径)。该探测器的科学目标是：就地探测木星磁层的场和粒子；利用紫外和 X 射线波段成像测量极光的形态；利用近红外成像研究热层风，利用

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

能量原子成像测量近磁层和中磁层的热粒子，研究辐射带与大气的相互作用。

3.4 慧星尘探测

科学家们一直对慧星很感兴趣，因慧星被认为是太阳系中最古老的天体，它的物质构成与太阳系形成前的星云相似，因而它含有 46 亿年前太阳和行星形成前的尘埃和气体。有些科学家认为，产生地球生命的原始物质很可能是在慧星撞击地球时带到地球上来的。慧星探测可为研究太阳系和地球上生命的起源提供重要的途径。

1999 年 2 月 10 日，美国宇航局发射了一颗“星尘号”探测器，它将于 2004 年与围绕太阳运行的怀尔德－2 慧星相会。在离慧星的距离不到 100 公里处，对慧星尘埃和气体取样，预计于 2006 年 1 月 15 日携带样品返回地面。

星尘探测器的主要科学目标是：收集太阳系和其它星系中形成太阳系和行星的原始物质，利用显微镜和其它科学仪器对其进行原子水平上的分析研究；近距离拍照慧星图像，并用其它仪器探测研究慧星所需的其它数据；研究太阳及其行星的形成、地球上生命的起源和演化过程。

3.5 飞出太阳系探测恒星际空间

过去的深空探测器都是探测日球层（太阳系）内部，到目前为止，还未曾发射过恒星际探测器。虽然过去发射的先驱者 10 和 11 号飞船及旅行者 1 号和 2 号飞行器现已飞出太阳系，但不能对恒星际进行探测。像行星一样，太阳也有磁层，称为日球层。日球层的边界称为日球层顶，日球层顶是太阳风和恒星际等离子体的交界面。目前日球层顶的尺度还不确定，按最近的估计，太阳风流的终止激波可能在 80—90 个日地距离（AU），日球层顶比终止激波的距离还远一些。

21 世纪计划发射恒星际探测器，飞行器贴近木星和太阳到达 200AU 的距离。飞行器的速度是每年 10AU，到 200AU 大约需 20 年的时间，这是深空探测的一个新的里程碑。恒星际飞行器的主要科学目标是：确定恒星际空间的性质及其与银河系物质起源和演化的联系；探测日球层的结构及其与恒星际介质的相互作用；研究发生在日球层和恒星际介质中的基本物理过程。这些研究，对了解太阳系的起源和演化过程具有重大科学意义。

4 2000－2020 年我国太空物理发展设想

我国太空物理正在制订 2000—2020 年期间的太空物理发展战略规划和计划。我国太空物理的发展政策是：理顺国家对太空物理和太空探测的管理体制；建立太空探测卫星系列；提高太空科学在太空领域总经费中所占的比例；立足国情、突出重点、力求创新；加强国际合作，参加国际探测计划，提高在国际空间界的地位；建立太空科学的创新基地。

在 21 世纪前 10 年，我国太空物理研究的战略主题是：日地空间系统的联锁变化过程和空间天气数值预报方法。主要研究目标是：深入了解日地空间联锁变化的物理过程，包括：太阳事件的产生机制及其在行星际空间的传播和演化过程；磁层空间暴对太阳活动和行星际扰动的响应过程；电离层和高中层大气对太阳活动、磁层空间暴和低层大气扰动的响应过程；发展比较行星环境研究；建立太空环境的动态模式，发展太空天气的数值预报方法。

2000—2020 年我国太空探测的战略思想和探测计划的设想是：21 世纪的前 15 年，重点是配合太空物理研究的战略目标，发展日地空间探测和月球探测。初步提出的探测计划有：

(1)地球空间双星探测计划（简称双星计划）。双星计划包括两颗小卫星：一是近地赤道卫星，近地点是 500km，远地点是60 000km，倾角 90°左右；二是近地极区卫星，近地点是 350km，远地点是 25 000km，倾角是 28.5°。在两颗卫星上，分别放有 9 台和 10 台探测仪器。这两颗小卫星相互配合，运行于目前国际上地球空间探测卫星尚未覆盖的近地空间主要活动区，形成自成系统、有特色和创新的地球空间探测计划。其主要科学和应用目标是：探测和研究近地空间环境中场和粒子的时空变化规律及磁层空间暴的触发机制，建立并发展太空环境的动态模型及物理预报方法，通过国际合作，提高我国太空探测技术和科学研究水平。双星计划与欧洲空间局 Cluster－II 相配合，形成 6 点探测的星座探测计划，将会成为 21 世纪初国际上重要的

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

日地空间探测计划。双星计划的近地赤道卫星计划在 2002 年 12 月发射，近地极区卫星计划在 2003 年 6 月发射[3]。

(2)亚太合作小卫星探测计划。这是一颗亚太空间技术与应用多边合作多任务小卫星(SMMS)，也是一颗太空科学探测和技术试验小卫星。卫星轨道是高度为 796km、倾角为98.6°的近圆形轨道。主要科学目标是探测和研究太阳活动和磁层扰动对电离层和中高层大气全球结构的影响。

(3)太空太阳望远镜。这是我国自行设计和研制的太阳望远镜项目，包括 5 台探测仪器。卫星的轨道参数是高度为 730km、倾角为 98.3°的圆轨。主要科学目标是：通过协同的、多波段的、高分辨率的不间断地观测，探测太阳气中的流体力学和磁流体力学过程中各种瞬变和稳态现象，实现太阳物理的重大突破。

(4)空间碎片和电磁辐射探测计划。

(5)在“十五”期间，提出我国的月球探测计划。

(6)在上述探测计划实施的基础上，不断提高探测计划的科学目标和探测技术水平，提出在 2015 年前实施的日地空间探测计划。

(7)在 2015 年后，我国将开展火星探测。

参考文献

1　Sun-Earth Connection Roadmap. Strategic Planning for the Years 2000—2020, NASA, 1998.

2　刘振兴. 中国空间物理学发展的回顾和展望. 周光召主编《科学进步与科学发展》(上册). 北京：科学出版社，1998 年，1—6.

3　刘振兴. 地球空间双星探测计划. 地球物理学报，2001 年，44(3).

The Expectation of the Development of Space Physics in 21th Century

Liu Zhenxing

(Center for Space Science and Applied Research, CAS, 100080 Beijing)

A brief expectation of developments of space physics research and space exploration is made for the two decades of 21th century. The main points include: (1) the developmental tendency of solar—earth space exploration and research during 2000—2020, as well as the new act that will be taken in solar—earth detection; (2) the exploration of moon, planets, comets and stars; (3) comparative research of planetary environment; (4) the expectation of the projects and programs of Chinese space physics during the first 20 years of 21th century.

刘振兴　空间物理学家。中国科学院空间科学与应用研究中心研究员，中国科学院院士，地球空间双量探测计划首席科学家，中国地球物理学会常务理事兼地磁和高空物理委员会主任，中国与欧洲空间局空间科学合作的中方首席科学家、中国 Cluster 科学数据研究中心主任，欧洲空间局 Cluster 科学数据系统指导委员会委员，国际地磁学和高空物理学协会(IAGA)中国委员会主席。长期从事近地层大气物理、高空大气物理、行星际物理和磁层物理研究。提出了太阳风-磁层-电离层-高层大气耦合的概念。曾获中国科学院自然奖一等奖(第一负责人)和国家自然科学奖三等奖(第一负责人)，四川省人民政府颁发的优秀科学技术著作奖和优秀图书金帆奖一等奖，全国优秀图书特别奖，全国科学大会奖，2000 年国际空间奖(Vikram Sarabhai 奖)等。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net