

日层探测

都 亨

(中国科学院空间科学与应用研究中心,北京 100190)

[摘要] 文章介绍了日层探测的概况和研究日层的意义,以及日地空间在空间环境预报中的作用,从日层事件探测实例分析了目前日地空间监测的不足。

[关键词] 日层;行星际空间;探测

[中图分类号] P182.2 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)06-0046-05

1 前言

人类进入太空已经半个多世纪,但是人类“足迹”所到之处仍然没有超出太阳影响所及的范围,离地球最远的航天器还在向太阳系的边缘——日层顶——迈进,日层依然是人们关注的重点。

太阳系中,行星及其卫星、小行星、彗星虽然集中了太阳系绝大部分的物质,但是,太阳通过其辐射的高能带电粒子、由等离子体组成的太阳风,以及与之相伴的磁场和电磁辐射仍然控制了广袤的行星际空间中的各种过程,影响着生活在地球上的人类。因此,探测和研究日层具有极大的现实意义。

1.1 认识大尺度宇宙结构

日层是太阳携带着抛射出来的等离子体和磁场,在更大的背景等离子体环境——星际物质中——运行所形成的一个区域,其尺度大约是100 AU(astronomical unit,天文单位,1 AU为 1.5×10^8 km)左右,远远超越目前最远的行星海王星(离太阳的距离约为30 AU)和曾经最远的行星冥王星(离太阳的距离约为40 AU)(见图1)。日层是宇宙中典型的磁层结构,其他的恒星周围也会存在类似的结构。更大尺度上的星系,例如银河系,也可以看作是更大尺度上的磁层结构。日层是迄今为止可以直接探测的最大的宇宙结构,因此对日层进行的探测研究是认识大尺度宇宙结构的桥梁。

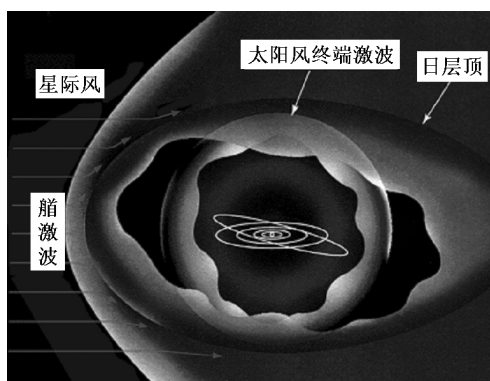


图1 日层结构示意图

Fig. 1 Heliosphere structure

1.2 预报空间环境

太阳对空间环境的影响,特别是对人类航天活动乃至生态环境的影响是通过日层中的日地空间环境传输的,因此对日层的探测和研究将大大提高空间环境预报(即所谓的空间天气)的质量。目前空间环境预报手段,主要还是在发现太阳表面爆发以后预测太阳抛射的物质的传播路径和扰动特性,来预报近地空间环境将可能发生的扰动,因此日层的环境状态对预报的质量有十分重要的作用。

1.3 有助于扩大人类活动范围

日层是人类向外扩展必须经过的区域,日层的探测和研究将为扩大人类活动范围铺平道路。

日层的直接探测虽然只进行了30余年,但是相

[收稿日期] 2008-03-17

[作者简介] 都亨(1935-),男,浙江海宁市人,研究员,研究方向为空间环境

为 VOYAGER 2 的飞行路径。

表 1 主要的日层探测航天器

Table 1 Main spacecraft for heliosphere detection

名称	发射日期	轨道类型	探测区域
PIONEER 10	1972-03-03	日心轨道	1 AU 到日层顶
PIONEER 11	1973-04-06	日心轨道	1 AU 到日层顶
HELIOS 1	1974-12-10	日心轨道	0.3 ~ 1 AU
HELIOS 2	1976-01-15	日心轨道	0.3 ~ 1 AU
VOYAGER 1	1977-09-05	日心轨道	1 AU 到日层顶
VOYAGER 2	1977-08-20	日心轨道	1 AU 到日层顶
SAKIGAKE	1985-01-08	日心轨道	0.8 ~ 1.15 AU
ULYSSES	1990-10-06	日心轨道极轨	高黄纬区
STEREO A	2006-10-26	日心轨道	~ 1 AU, 每年向地球后漂移 10°
STEREO B	2006-10-26	日心轨道	~ 1 AU, 每年向地球前漂移 20°
ICE	1978-08-12	L1	L1
ACE	1997-08-25	L1	
WIND	1994-11-01	L1	

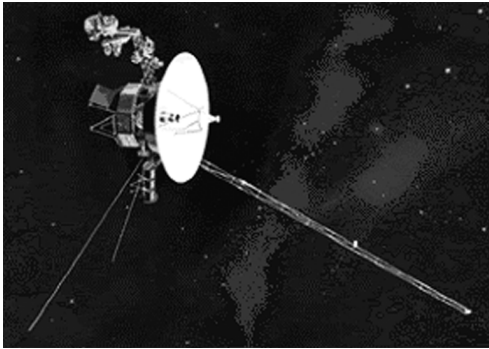


图 3 VOYAGER 航天器外形

Fig. 3 Spacecraft shape of VOYAGER

表 2 VOYAGER 的里程碑

Table 2 Milestone of VOYAGER

时间	事项
1977-08-20	VOYAGER 2 发射
1977-09-05	VOYAGER 1 发射
1979-03-05	VOYAGER 1 飞越木星
1979-07-09	VOYAGER 2 飞越木星
1980-11-12	VOYAGER 1 飞越土星
1981-08-25	VOYAGER 2 飞越土星
1986-01-24	VOYAGER 2 飞越天王星
1989-08-25	VOYAGER 2 成为第一个飞越海王星的航天器
1998-02-17	VOYAGER 1 超越 PIONEER 10 成为空间最远的人造物体
2002-08-01	VOYAGER 1 测量到高速带电粒子——电子和离子——增加了 100 倍, 太阳风速度明显下降, 表明它已穿越日层的“终端激波”(termination shock), 距离地球约 126×10^8 km, 无线电指令需要经过 12 h 才能到达航天器
2005-01-05	VOYAGER 2 发射后飞行了 10 000 d, 行程约 110×10^8 km
2005-01-21	VOYAGER 1 飞行了 10 000 d, 行程约 140×10^8 km
2007-12-31	VOYAGER 1 位置的日心坐标为距离 104.93 AU, 纬度 34.3° , 经度 124.6° VOYAGER 2 位置的日心坐标为距离 84.71 AU, 纬度 -27.7° , 经度 167.8°
~ 40 000 a	VOYAGER 1 飞行 1.6 AU 的距离后到达鹿豹座的 AC + 79 3888
~ 296 000 a	VOYAGER 2 飞行 4.3 AU 的距离后到达地球上看到的最亮的星体——天狼星

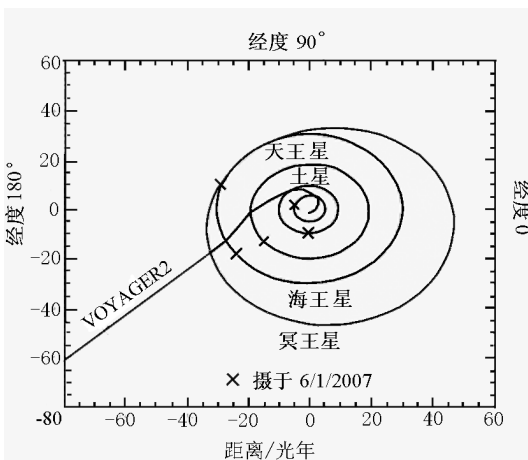


图 4 VOYAGER 2 飞行轨迹

Fig. 4 Orbit of VOYAGER 2

3 日层探测的几个重点区域

日层的体积十分庞大,从太阳到日层顶的距离约为 100 AU,人们除了关注日层的整体结构以外,还主要关注以下几个区域。

1)内边界层。是指靠近太阳的区域。内边界层是日层扰动的源头,它如何从太阳的色球层、日冕层向太阳风过渡以及太阳表面扰动如何向外传输等问题,是决定日层状态的主要因素。

2)日地空间。是指从太阳到地球之间的区域。关注这个区域的原因是它与地球环境的变化有密切关系,是“空间天气”的主要媒介。

3)外边界层——日层顶。太阳风沿径向向外运动,密度和速度逐渐降低,相应的动压也随之降低。到达一定的距离时,太阳风的动压和星际空间的星际物质具有了压力相平衡,于是形成日层的边界。由于目前只有一个探测器到达这一区域,对于它的位置、形状和结构仍不明了。

4)行星边界层。太阳风在向外扩展过程中将遇到八大行星,各个行星的磁场特性各不相同,既有磁场很强、磁层发育充分的行星,如木星,也有磁场很弱、太阳风几乎可以直接到达行星表面、磁层几乎不存在的水星。无论何种情况,太阳风、行星际磁场和行星或行星的磁场相互作用过程对行星的环境都有很大的影响。

4 日地空间探测

日地空间探测的主要任务是为近地空间环境预报提供最基本的数据,具体的探测目的有两方面,一方面是监测太阳表面发生的扰动现象,即日层扰动的源头,例如太阳耀斑爆发、日冕物质抛射等;另一方面是监测太阳表面抛出的物质向地球传输的过程。

太阳缓慢的 27 天的自转周期使监测太阳表面的任务比较复杂,因为太阳表面上背向地球一侧所发生的扰动,由于自转效应也可能影响地球空间环境,所以需要太阳背面进行连续监测。

太阳通过三种媒介影响近地空间环境:电磁辐射、高能带电粒子、等离子体。太阳的总电磁辐射(太阳常数)变化很小,但是电磁辐射中波长较短、能量较高的部分变化很大,太阳爆发时的紫外辐射和 X 射线的强度可能比平静时增加数十倍甚至数百倍。它们是影响地球高层大气的主要因素,增强

的紫外辐射和 X 射线可以使高层大气的温度和电离浓度大幅度增加,从而干扰无线电通信,航天器轨道也会因大气密度增加而受到影响。电磁辐射从太阳到地球的时间大约为 8 min,由于它是最快的传输方式,当地球上观测到太阳表面发生扰动时,增强的电磁辐射实际上已经到达。要预报电磁辐射的爆发,需要对太阳表面的物理过程和机理进行研究,对太阳爆发进行预报,属于太阳物理研究的范畴。

日地空间对太阳抛射物传输过程的影响,特别是日地空间的磁场结构对太阳宇宙线和日冕物质传输过程的影响,是近地空间环境预报的关键。太阳到地球之间的漫长路程(1.5×10^8 km)、日地空间复杂的磁场结构和太阳 27 天一周的自转运动,使得在地面上从观测到太阳表面的爆发,到抛射出来的物质到达近地空间有大约 2~4 天的时间滞后,为我们提供了可以提前预报的条件。如果掌握了太阳爆发的特征(如爆发区域的位置和时间、有无日冕物质抛射、抛射的速度等),以及实时的日地空间磁场和太阳风的结构,就有可能预报太阳表面的抛射物是否会到达近地空间和到达的时间,以及在近地空间引发的扰动特征。要提高预报的质量,获取和监视太阳抛射物在整个传输过程中的特征是十分重要的。先来看一个已经实现的例子(由于该例中卫星的数量、所在位置以及探测设备都存在很多不足,其结果并不理想,但对于今后应如何布置监测体系有一定的启示)。

1997 年 1 月 6 日太阳表面发生了一次巨大的耀斑爆发,它在随后的 5 天内诱发了特大的日地空间事件,导致了通信卫星 TELSTAR-401 停止工作。图 5 是对这次日地事件天基监测的简单概括。

图 5 的左侧代表太阳及其附近区域。太阳表面的观测是比较多的,例如,图 5-A1 是 YOHKOH 卫星的软 X 射线探测器拍摄到的太阳活动区的爆发过程,图 5-A2 是 SOHO 卫星的 MDI 设备拍摄到的日面照片。加上地面天文台拍摄到的可见光照片,基本上可以获得各个波段太阳活动区的信息。太阳表面提供的扰动源头的信息,对于预报是十分重要的。

SOHO 卫星的 LSASCO(large angle spectrometric coronagraph)首先探测到物质抛射(图 5-B),随后的连续探测表明,被抛射物质是向西南方向抛出的。

图 5 的右侧代表的是地球及其附近区域。有较多的卫星提供了各方面的信息,这些信息从预报角

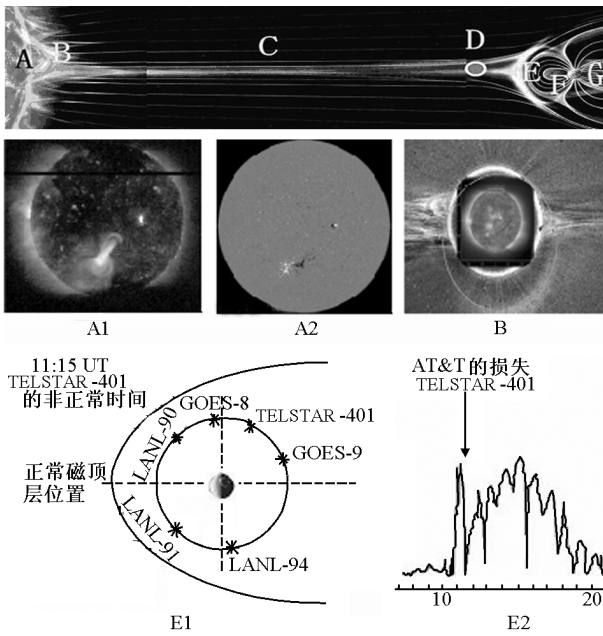


图5 日地事件天际监测项目示意图

Fig. 5 Solar - terrestrial events program

度来说主要是提供日地扰动的后果,由于它们发生的时间是在扰动到达以后,对预报本身并没有实质意义。图5-E1为地球同步轨道上主要探测卫星的分布,这些卫星得到了高能电子、离子和磁场数据。2颗极地轨道的国防气象卫星(defense meteorological satellite program, DMSP)在太阳同步轨道上测量了高能电子和离子。这次扰动对航天器的影响也有明确的结论。1997年1月13日,AT&T公司宣布该公司的通信卫星TELSTAR-401于1月11日早上6时15分与地面失去联系,原因不明。该卫星是洛克·希德马丁公司生产、于1993年发射的地球同步轨道电视广播卫星,造价2亿美元,预定使用寿命12年。卫星的损坏迫使AT&T公司立即将部分信道切换到其他卫星,在此次事件中公司共损失7.12亿美元。图5-E2中的曲线是洛斯-阿拉莫斯国家实验室的卫星所测得的地球同步轨道相对论电子强度,箭头所指的是卫星失效的时间,时间上的一致性说明这次事件和空间环境有密不可分的关系。

相对于太阳表面和近地空间环境的探测而言,在从太阳到磁层约 1.5×10^8 km的传输路径上,监测的项目明显偏少,只有2项测量。一项是在日地之间第一拉格朗日点上WIND卫星对太阳风参数进行的直接探测;另一项是间接测量,通过测量抛射的日冕物质在背景太阳风中运动时激发的射电辐射来

推测扰动的特性,频率范围约在数十千赫至数百千赫,其原理类似于太阳IV型射电爆发,从辐射的频率可以得知太阳风的密度,从频率移动的速率可以推测扰动激波的传播速度。

考虑到位于地球上游的太阳风扰动是目前空间环境预报最主要的依据,增加日地之间的日层环境监测将是提高预报质量的有效途径。监测位置的选择有很多,既可以和水星及金星探测结合,利用两个行星介于太阳和地球之间的位置优势(到太阳的距离分别为0.38 AU和0.72 AU)监测太阳风的扰动;也可以发射围绕太阳运动的监测器探测太阳风和磁场,提供传输过程中太阳扰动的特性,即可在扰动到达地球前1~2天发出预报,和位于日地第一拉格朗日点L1处的探测器相比,后者只能提供约1.5 h的预报时间。如果在围绕太阳运动的轨道上安置多个探测器,均匀分布在各个日心经度上(见图6),直接探测太阳风、行星际磁场,可以获得太阳风和行星际磁场的结构,更有利于建立扰动传播的模式,为模式预报、数值预报准备条件,提高预报的质量。如果在探测器上再安装日面探测设备和日冕物质抛射的探测设备,即可实现全方位地监测太阳表面活动,全过程地监测扰动的传输。

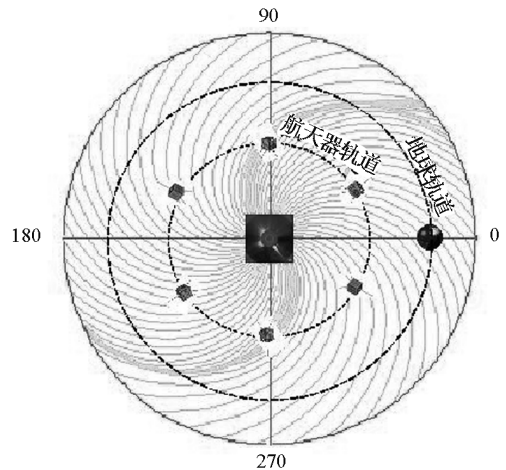


图6 行星际监测器轨道示意图

Fig. 6 Orbit sketch map of interplanetary detection facility

5 结语

日层是地球的周边环境,对现在和未来的人类生活都会产生重大影响,也是人类向外扩展时的必经之地。了解日层的重要性不亚于对某个行星或卫星的认识。日层探测的难度很大,需长期规划。

(下转 62 页)